



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

**División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología**

**“GEOARQUEOLOGÍA DE LOS YACIMIENTOS DE
OBSIDIANA CON EXPLOTACIÓN PRE-HISPÁNICA
EN LA SIERRA DE LAS NAVAJAS, HIDALGO,
MÉXICO: ORIGEN E IDENTIDAD PETROLÓGICA”**

TESIS

Para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias-Geología



PRESENTA:

GERARDO ALONSO LÓPEZ VELARDE

Hermosillo, Sonora, octubre 2020

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Resumen

Sierra de las Navajas es un complejo volcánico compuesto por un paleo-estratovolcán de edad Cuaternaria, de composición riolítica y de afinidad hiperalcalina, que se caracteriza por la presencia de obsidiana de color verde. En este macizo rocoso, que se ubica al borde nororiente del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano en el Estado de Hidalgo, se localiza el Cerro de las Navajas. En dicha área se presentan los vestigios arqueológicos de explotación de obsidiana con mayor intensidad en Mesoamérica. Desde el Formativo temprano hasta la época Colonial, la extracción de obsidiana se ejerció por las culturas del Altiplano central y las sociedades colonizadas por medio de minería subterránea y a cielo abierto. Se identificó el origen de la obsidiana en el área de explotación de Cerro de las Navajas a partir de una cartografía geológica detallada, un estudio petrográfico, y un análisis geoquímico. Esta metodología explica su ocurrencia y su ubicación en tiempo y espacio durante las etapas eruptivas del volcán. En los resultados del estudio se muestra que el yacimiento arqueológico deriva de un mecanismo eruptivo explosivo, ligado al colapso parcial de un domo de lava con obsidiana que produjo un Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC). Este depósito, poco soldado, se caracteriza por la presencia de líticos de obsidiana en forma de bloques que alcanzan hasta 1 m de diámetro. Los análisis petrográficos de la obsidiana permitieron distinguir dos variedades: verde-dorada y verde-oscuro, que dependen de la concentración de cristales, litofisas, esferulitas y vesículas. Las obsidianas muestran una composición química global muy similar, no obstante, los cocientes Sr/Mn y Rb/Ti permiten diferenciar los eventos eruptivos ocurridos en Cerro de las Navajas. El interés por la calidad en la pureza vítrea y lo exótico de la obsidiana de Sierra de las Navajas fueron promotores de un complejo sistema de explotación desarrollado principalmente por el estado Teotihuacano, Tolteca y Azteca. El DFBC fue sepultado por eventos volcánicos posteriores, por reajustes estructurales de la Sierra, así como, por suelos derivados del intemperismo de las unidades volcánicas tobacíticas que componen la montaña. La ingeniería minera necesaria, exclusiva en la explotación de Cerro de las Navajas, es irreplicable y única en Mesoamérica.

Agradecimientos

Extiendo un fuerte agradecimiento a todas las instituciones y las personas físicas que hicieron posible este proyecto de investigación. Agradezco a CONACYT por apoyar económicamente mis estudios de posgrado. A mis directores Dr. Jesús Vidal y Dr. Alejandro Pastrana por sus cátedras y por su gran disposición. A mis sinodales, Dr. Francisco Paz y al Dr. Kinardo Flores.

Agradezco a la Universidad de Sonora, *alma mater*, en especial a la Dra. Diana Meza y al M.C. Abraham Mendoza por su orientación y su ayuda incondicional en el análisis de las muestras, y al técnico laboratorista Jorge Chan por su apoyo en los cortes de estas. Gracias a Alejandra Pómez, Luis Velderrain, y al grupo de investigación del protogolfo por su apoyo a lo largo de este trabajo.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto de Geofísica, en especial al Dr. Luis Alva y su grupo de investigación, por el gran apoyo en el trabajo de campo. Al Instituto Nacional de Antropología e Historia, en especial a Silvia Domínguez por su estancia en la Sierra. Al Colegio de Michoacán, especial al Dr. Rodrigo Esparza, a la Dra. Magdalena Sánchez y a Luis Velázquez por recibirme y ayudarme durante mi estancia de investigación

Agradezco sumamente a todas las personas que, gracias a ese gran corazón que se cargan, me ayudaron emocional y espiritualmente en este camino. A todos los habitantes del ejido del Nopalillo, en especial a Óscar y Alfonso. A toda la gente de La Piedad, Michoacán, con un fuerte agradecimiento a Lupita. Se merece lo mejor de esta vida. Gracias Génesis por la hospitalidad, tu compañía y tus enseñanzas. La mejor arqueóloga.

López Velarde, bello conjunto que no se cansa. Yela y Alma, gracias por cuidarme, apoyarme, asesorarme y orientarme en la vida. Uno de mis pilares, Mayra, gracias por amarme, escucharme y siempre tener disposición de apoyarme. A la Dra. Chiquita por ser un ejemplo de vida y por abrir brecha en la en la aventura de mi vida. A la Familia Guerrero López, Alán y Elí, una extensión más de mi corazón.

Turbulento causal. Cierre. Fuente y pena. Plena de pérdidas, dejamos huellas.
Cantando nos vamos, con nadie. Construye. Puentes para seguir andando.
Piedras en los zapatos, piedras en las manos. Piedras llenas. Perdidas ellas.
Maletas. Después nos resbalamos. Afuera. Después nos tropezamos.
Festejamos, da más. Un paso. Juntos, son más.

Eli

Roma

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Localización	5
1.2 Vías de acceso.....	6
1.3 Objetivos del estudio.....	7
1.3.1 Objetivo General.....	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4. Metodología de trabajo	8
1.5. Marco Teórico	9
1.5.1 Antecedes Geológicos	10
1.5.2 Antecedentes Arqueológicos	27
2. Geología del área de estudio.....	31
2.1 Cerro de las Navajas.....	31
2.2.1 Cruz de Milagro.....	34
2.2.2. Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas (CPD).....	35
2.2.3 Unidad Fluidal Itztetl (UFI)	35
2.2.4 Mina de Pómez de Alfajayucan	37
2.2.5 Mina de Pómez El Nopalillo	39
2.2.6 Mapa Geológico.....	42
2.2.7 Columna Estratigráfica.....	45
2.2.8 Secciones	47
3. Petrología.....	51
3.1 Caracterización de la obsidiana y las rocas asociadas	51
3.1.1 Petrografía	52
3.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)	66

.....	68
3.1.3 Geoquímica	68
3.1.4 Resultados.....	70
3.1.5 Nomenclatura de Obsidiana de la localidad de Cerro de las Navajas..	75
4. Minería prehispánica.....	79
4.1 Explotación de obsidiana prehispánica	79
5. Discusión	87
5.1 Geología de Cerro de las Navajas y evolución del paleo-volcán Sierra de las Navajas	87
5.2 Ocurrencia geológica de la obsidiana verde-dorada del yacimiento de Cerro de las Navajas.	92
5.3 Implicaciones petrológicas para la caracterización de la obsidiana.	98
5.4 Evento C del Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas Itztetl y sus formas de explotación.....	101
5.5 Geoarqueología de la Sierra de las Navajas.....	104
5.5.1 Geodinámica y dinámica social en Mesoamérica	104
5.5.2 Principales Yacimientos de Obsidiana en Mesoamérica	106
5.5.3 Origen geológico del yacimiento Sierra de las Navajas: Cerro de las Navajas.....	107
5.5.4 Color, calidad y textura de Sierra de las Navajas	109
5.5.5 Explotación prehispánica de obsidiana en Sierra de las Navajas	110
5.5.6 Dominio político y económico de Sierra de las Navajas	115
6. Conclusión.....	118
7. Bibliografía.....	121
8. Anexos	127
Anexo 1: Cortes PaPa, PePa y PePe según la petrofábrica.	127

Anexo 2: Evaluación Geoquímica cuantitativa en cubos de obsidiana en un equipo portátil de FRX.	132
Reporte de las mediciones de los materiales de referencia de obsidiana en el equipo Niton FXL	132
Discusión	135
Anexo 3: “Protocolo de Geoquímica para la identificación geoquímica de obsidianas: método cualitativo para un equipo portátil y uno semi-portátil de FRX, caso Sierra de las Navajas”	136
Anexo 4: Difracción de Rayos X (DRX).....	142
Anexo 5: Evaluación Cualitativa en equipo portátil FRXP (LADIPA).....	147

1. Introducción

La trascendencia cultural de México a través del tiempo permite identificar a la nación como un pueblo lleno de tradiciones y una larga historia. Independiente de la globalización y el neocolonialismo que, producen una constante pérdida de las bases culturales, a México lo caracteriza una complejidad de su patrimonio natural y cultural. Por lo que los avances y los aportes del conocimiento científico, han sido de gran ayuda para conocer y engrandecer la historia de la nación mexicana. Es por lo que la generación de nuevos datos, hipótesis y temáticas en la arqueología requiere del conocimiento especializado de otras ciencias.

La riqueza natural de México se identifica por su geología; específico la gran diversidad de sus montañas y la actividad volcánica en el centro del país. El ser humano durante su llegada a esta parte del continente americano ha utilizado los beneficios que le brinda la naturaleza para su desarrollo como especie. Entre dichos beneficios naturales, la obsidiana en Mesoamérica se utilizó en grandes volúmenes como instrumentos de trabajo y como materia prima. Su uso se empleó en las actividades domésticas, en el trabajo de diversos oficios artesanales, en la confección del armamento, también se elaboraron objetos ornamentales y artefactos mágico-religiosos (Pastrana & Carballo, 2017). En específico, Pastrana y Domínguez (2009) mencionan que el uso de la obsidiana se relaciona directamente con el desarrollo económico, militar, religioso y comercial de las organizaciones estatales del centro de Mesoamérica.

La obsidiana representa un bien material obsequiado por la naturaleza que, según Saunders (2001), como cualquier material natural transformado en materia cultural, era un objeto físico y un concepto metafísico. Sin embargo, la ocurrencia natural de esta materia prima está restringida a yacimientos con ciertas condiciones geológicas y geográficas que intervinieron en el desarrollo político-económico de las sociedades mesoamericanas. Dependiendo de la región cultural y de la región fisiográfica, se generó un interés político por el control de los principales yacimientos en Mesoamérica. La importancia política y militar que ejercía el dominio de un yacimiento de obsidiana directamente aplicaba una respuesta económica para las

sociedades de Mesoamérica. Asimismo, económicamente permitió el desarrollo de rutas de comercio entre regiones culturales y negociaciones de bienes materiales en mercados locales y regionales.

Tras algunas reuniones y simposios de arqueometría de obsidias en México ([Pastrana, 2015](#); [Vidal-Solano, 2015](#)), la discusión y la exposición sobre la importancia petrológica en los estudios de caracterización de los materiales vítreos se intensificaba ([Pastrana, 2017](#); [Vidal-Solano, 2017](#)). Esto permitió que se estrecharan relaciones entre algunos investigadores interesados en promover una metodología alterna sobre los estudios arqueométricos tradicionales. Se construyó un proyecto Geoarqueológico integral que fuera capaz de atender la complejidad geológica del yacimiento de obsidiana de Sierra de las Navajas. De la misma manera que ayudara a resolver las principales problemáticas arqueológicas sobre las características fisicoquímicas de la obsidiana, su ubicación estratigráfica y las técnicas mineras empleadas en su explotación prehispánica y colonial ([López-Velarde et al., 2018](#)).

Sierra de las Navajas es el yacimiento de obsidiana con mayor intensidad de explotación reportado en Mesoamérica. La Sierra se encuentra ubicada en un complejo volcánico al SE del estado de Hidalgo, México. Nombrada originalmente como Cerro las Navajas ([Humboldt, 1827](#); [Ordóñez, 1900, 1901](#)), la Sierra se trata de un paleo-estratovolcán de edad cuaternaria que se ubica en el borde nororiente del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVT) ([Lighthard, 2001](#)) ([Fig. 1](#)). El paleo-volcán es de composición riolítica, de afinidad geoquímica hiperalcalina y sus rocas son clasificadas como comenditas ([Lighthard, 2001](#)). Esta ocurrencia volcánica y geológica presenta características geoquímicas e isotópicas de una probable fuente magmática de manto astenosférico; afectado por componentes tectónicos de subducción lo cual es considerado como un fenómeno natural poco común en el CVT ([Núñez-Velázquez et al., 2020](#)).

Actualmente es posible sugerir que a nivel mundial Sierra de las Navajas es un yacimiento de características geológicamente únicas. El proceso volcánico de la Sierra produjo diversos pulsos eruptivos con litofacies vítreas, donde se formó obsidiana, y que generaron la ocurrencia de depósitos que fungieron como

yacimientos, en superficie y en subsuelo. Esto permitió que la riqueza material de obsidiana, en Sierra de las Navajas, se distribuyera por Mesoamérica. Desde el punto de vista arqueológico, [Argote-Espino et al. \(2010\)](#) menciona la presencia de por lo menos cuatro áreas de explotación en el yacimiento: Nopalillo-Durazno, Cruz de Milagro, Oyamental y Sembo. Debido a sus ligeras variaciones geoquímicas, [Argote-Espino et al. \(2010\)](#) identificaron con métodos estadísticos en estos yacimientos dos tipos de obsidiana en Sierra de las Navajas, obsidiana negra y obsidiana verde.

En el flanco SO de Sierra de las Navajas se encuentra la localidad de Cerro de las Navajas. En este lugar reside el área de explotación de Nopalillo-Durazno, donde se presenta la mayor evidencia de explotación prehispánica en restos materiales. Cerro de las Navajas, zona arqueológica en estudio por el del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), exhibe la ocurrencia geológica superficial y de subsuelo necesaria para identificar la formación de este yacimiento ampliamente estudiado. Sin embargo, la configuración geológica del yacimiento de obsidiana verde oscura-dorada ha dificultado la interpretación de los estudios arqueológicos previos ([Pastrana, 1998](#)).

La naturaleza de la ocurrencia geológica en subsuelo del yacimiento de Cerro de las Navajas complica el mejor entendimiento arqueológico de las estrategias y métodos de explotación cronológicamente regulados por las culturas del centro de Mesoamérica ([Pastrana, 2009](#)) ([Fig. 1](#)). La localidad de Cerro de las Navajas presenta una gran evidencia arqueológica derivada de su larga secuencia cronológica de explotación. Los cambios como patrones de asentamiento de las poblaciones involucradas, las necesidades principales de la sociedad y el control político de la obsidiana, se ven reflejados en la estrategia de explotación que se proponen aquí como un promotor de complejidad social.

El yacimiento de obsidiana verde oscura-dorada de Cerro de las Navajas en Sierra de las Navajas ha sido considerando la fuente principal del desarrollo de los Estados Teotihuacano, Tolteca y Azteca ([Pastrana, 2002](#)). Por lo tanto, desde el Formativo temprano ([Cobean, 2001](#)) hasta la Colonia ([Pastrana y Fournier, 1996](#); [Pastrana et al. 2019](#)), Sierra de las Navajas se podría considerar como un punto de

convergencia geológico, geográfico y social estratégico, de carácter socioeconómico y político, para las culturas del centro del México mesoamericano.

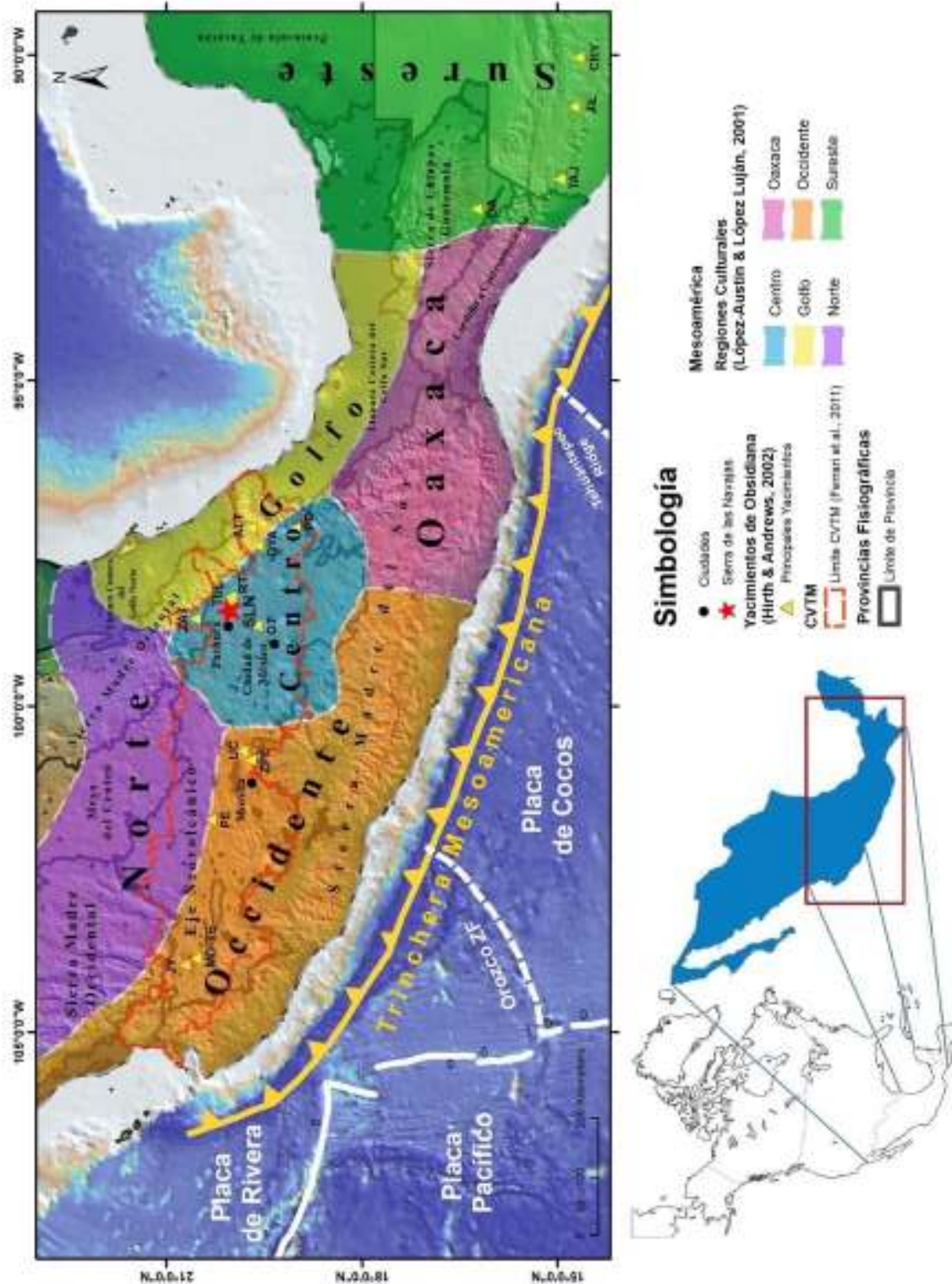


Fig. 1. Mapa Geoarqueológico de Mesoamérica, donde se presentan los principales yacimientos de Mesoamérica, la fisiografía de Mesoamérica, las regiones culturales de Mesoamérica, el límite tectónico del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT, Ferrari et al., 2012) y la tectónica asociada a la región de Mesoamérica. SLN = Sierra de las Navajas, OT = Otumba, PE = Peñajero, ZPE = Zinapécuaro, UC = Ucarepo, JY = Joya, RT = Rancho Tenango, PO = Pico de Orizaba, JIL = Jilotepec, CHY = El Chayal, OA = Ojo de Agua, TAJ = Tajumulco, MO-TE = Mora-Teuchtitlán

En el presente trabajo se busca caracterizar geológicamente el área de Cerro de las Navajas, ubicado en la porción SO del complejo volcánico de Sierra de las Navajas, con el fin de explicar la formación geológica de los depósitos con obsidiana y la relación que guardan con las estrategias sociopolíticas de la explotación minera por las culturas prehispánicas del centro de Mesoamérica. Asimismo, por medio de las técnicas analíticas de Fluorescencia de Rayos X portátil y petrografía, se busca caracterizar petrológicamente a las principales variedades de obsidiana.

1.1 Localización

El presente estudio se llevó a cabo en la localidad de Sierra de las Navajas, que se ubica al norte de la Cuenca de México, en los límites NE de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) (Fig. 1). Es la porción E de la Sierra de Pachuca en el estado de Hidalgo a ~18 km al E de la ciudad de Pachuca, a ~50 km al NO de la antigua ciudad de Teotihuacán y ~70 km de Tenochtitlán. El área de estudio se ubica en la localidad de Cerro de las Navajas, tiene aproximadamente 3200 msnm de elevación y se sitúa en el cuadrante limitado por las coordenadas: 20° 15'-20° 00' N y 98° 40'-98° 20'. Su ubicación se puede consultar en la carta topográfica 1:50,000 TULANCINGO-F14D82, INEGI (1999).



Fig. 2 Vista panorámica del campamento del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en el Cerro de las Navajas, Sierra de las Navajas.

1.2 Vías de acceso

El campamento del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en Sierra de las Navajas (véase Fig. 2) se ubica a ~ 6 km al ENE desde el entronque (sentido Tulancingo-Pachuca) partiendo de la ciudad de Pachuca de Soto hacia el E, por la carretera federal 132 de Pachuca-Tulancingo (Fig. 3). En dicho entronque se gira a la derecha y se tiene que andar sobre la carretera a Real del Monte hasta llegar al poblado de El Nopalillo. Ahí se encuentra el acceso hacia la zona arqueológica por un camino de terracería que se encuentra de moderado a buen estado (Fig. 4).

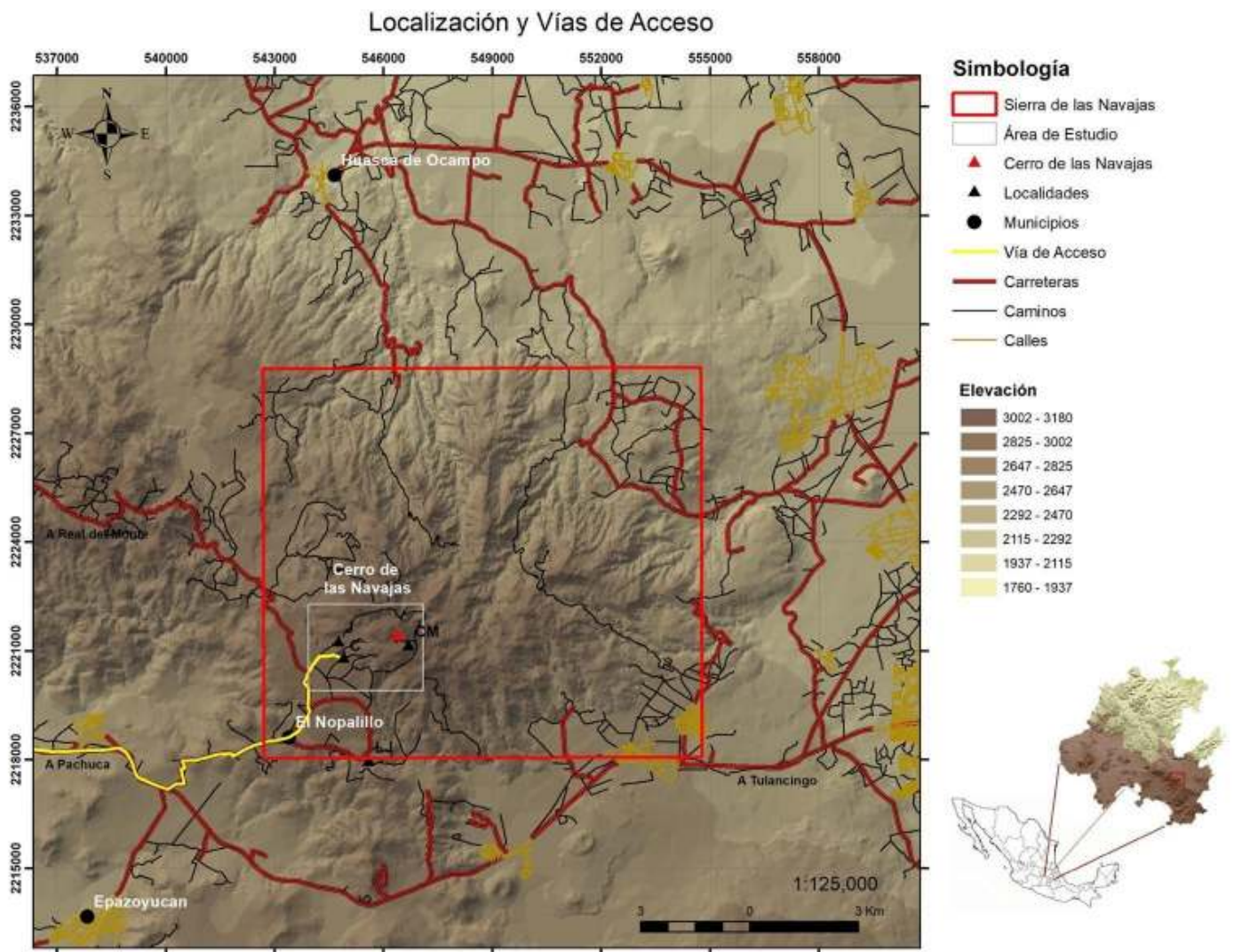


Fig. 3 Mapa del modelo de elevación de Sierra de las Navajas que muestra las principales vías de acceso a la zona arqueológica del INAH y distintos sectores de la Sierra. La línea de color amarillo muestra la ruta de acceso principal desde la ciudad de Pachuca.



Fig. 4. Anuncio turístico de Sierra de las Navajas sobre la carretera Tulancingo-Pachuca.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

El principal objetivo principal del presente estudio es realizar un estudio geoarqueológico de los yacimientos de obsidiana en Sierra de las Navajas. En él se busca distinguir las problemáticas geológicas durante el proceso de explotación prehispánica por medio del minado a cielo abierto y a profundidad. Reconocer la calidad y lo exótico de la obsidiana de Sierra de las Navajas a partir de su formación volcánica, su identidad petrológica, y su relación con la explotación minera.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1.- Realizar un mapa geológico a detalle del yacimiento de obsidiana en el Cerro de las Navajas y de sus relaciones con las unidades litológicas circundantes.
- 2.- Caracterizar petrográficamente a la obsidiana del yacimiento de Cerro de las Navajas,
- 3.- Caracterizar por DRX y ED-FRX a la obsidiana del yacimiento de Cerro de las Navajas.
- 4.- Explicar la formación geológica de los yacimientos de obsidiana.

5.- Proponer rasgos y elementos petrológicos que puedan ser útiles para los estudios de procedencia de la obsidiana de Sierra de las Navajas.

1.4. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se separó en cinco etapas considerando la temporalidad de las actividades durante dos años. En la primera etapa se contempló la Estructuración del Trabajo de Tesis. Los elementos por considerar fueron la Recopilación y Análisis Bibliográfico de la información existente acerca de la relación geológica del lugar y la explotación arqueológica. Se realizó un Proyecto de GIS del área de estudio, que integró la información disponible de la topografía, imágenes de satélite-fotos aéreas, la geología de trabajos previos y la ubicación de los yacimientos explotados. Con la compilación de datos se realizó una interpretación de la cartografía para desarrollar un plano geológico preliminar, que sirviera de apoyo para el plan de reconocimiento de campo y el muestreo.

La segunda etapa consistió en el Trabajo de Campo considerando el Reconocimiento y Levantamiento Geológico detallado de las unidades volcánicas involucradas en las regiones clave del área de estudio. Se realizó un muestreo de las unidades volcánicas considerando los mecanismos de sedimentación de las rocas piroclásticas. Asimismo, se realizó la toma de ejemplares de las obsidianas para cortes orientados, secciones delgadas y análisis geoquímicos, principalmente. La primera temporada de campo se llevó a cabo del día 21 al 29 de noviembre del 2018, teniendo 8 días de trabajo de campo efectivo, en donde se hizo un reconocimiento general del área y un muestreo selectivo de las unidades geológicas más relevantes del área. La segunda temporada se llevó a cabo de los días 22 al 25 de abril del 2019, teniendo cuatro días de trabajo de campo efectivo.

En la tercera etapa se efectuó la preparación de las muestras en donde se generaron los orientados y secciones delgadas para petrografía y geoquímica en el Laboratorio de laminado del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Este proceso se realizó con un mayor cuidado debido a que es de suma importancia reconocer la fábrica de la obsidiana previamente al corte de la muestra. Para esto es necesario seguir el protocolo de procesamiento y análisis de las

muestras de obsidiana hecho en la presente investigación en conjunto con los encargados del Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (**Véase Anexo 3**). La trituración de las muestras se llevará a cabo en el Laboratorio de Geoquímica y Mineralogía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Una vez concluido el proceso de pulverización se realiza la Selección y Preparación de Polvos en algunos ejemplares para su análisis de Difracción de Rayos X (DRX).

En la cuarta etapa se llevó a cabo el estudio analítico de la petrografía en cortes orientados y láminas delgadas de las rocas cristalinas y las obsidianas. Asimismo, se seleccionaron 10 muestras para los estudios analíticos que comprende la ejecución de los análisis geoquímicos en cortes orientados en el equipo semi-portátil de ED-FRX (SPFRX) Thermoscientific Niton FXL del Laboratorio de Geoquímica y Mineralogía del Departamento de Geología UNISON y en el equipo de fluorescencia de rayos x portátil Thermoscientific Niton XL3t en el Laboratorio de Análisis Y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA). Una vez seleccionadas las muestras se llevó a cabo los análisis de Difracción de Rayos X (DRX), en el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

Como última parte del proceso de investigación, en la quinta etapa se integraron los resultados, su procesado, la interpretación y la discusión de resultados, considerando todos los aspectos en conjunto.

1.5. Marco Teórico

En este apartado se presentan los trabajos previos de mayor relevancia y más actualizados con respecto a la arqueología asociada a la Sierra de las Navajas, así como la geología a nivel región y local. Derivado de una compilación de documentos compuestos por libros, artículos científicos, reseñas y compilaciones de textos que tratan el tópico de la obsidiana en Sierra de las Navajas. Se generó una síntesis con el objetivo de conocer el proceso geológico que hace tan especial al yacimiento de obsidiana de Sierra de las Navajas; indagando sobre la minería y explotación de las sociedades prehispánicas del centro de Mesoamérica.

1.5.1 Antecedes Geológicos

Al hablar del complejo volcánico de Sierra de las Navajas es inevitable mencionar su ocurrencia dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). El CVT es el arco volcánico neógeno más grande de América del Norte, abarca 160,000 km² y una longitud de casi 1000 km ubicado en el centro de México (Ferrari et al. 2011) (Fig. 1).

Según Ferrari y colaboradores (2011) el CVT presenta una alta heterogeneidad magmática producida por la dinámica de subducción. Sin embargo, según Ferrari et al (2011) existe una relación directa entre el volcanismo de alto contenido en sílice, el volcanismo bimodal y el retroceso “roll back” del slab de la placa en subducción (Placa de Cocos). El fenómeno de un volcanismo de alto contenido en sílice se asocia al inicio de la migración de la zona de trincheras del arco volcánico. La migración de la trincheras sugiere que el frente volcánico, después del episodio de movimiento de elevación del slab (~7 Ma), este comenzó a generar un retroceso (rollback) lo que indujo el aumento de su profundidad. Según Ferrari y colaboradores (2011), este escenario pudo producir volcanismo de alto contenido en sílice, originado por la fusión parcial de zona de la corteza inferior producido por la progresiva exposición al manto astenosférico a medida que el slab retrocedía.

Según Milán y colaboradores (1993), en el CVT se presentan por lo menos siete calderas volcánicas, distribuidas a lo largo del cinturón. Más recientemente algunos vestigios de actividad volcánica con alto contenido en sílice han sido reportados. Según Ferrari et al., (2011) desde finales del Plioceno en distintas áreas, las rocas de firma calco alcalinas–volumétricamente dominantes–se asocian en tiempo y en espacio con lavas de firma de intraplaca. Además, los centros volcánicos cuaternarios de composición riolítica y afinidad hiperalcalina se suman a esta diversidad composicional.

1.5.1.1 Marco Geológico Regional

De acuerdo con la síntesis geográfica del estado de Hidalgo realizada por el INEGI en (1992) se describen las características geológicas y estructurales de las rocas

que afloran en las provincias Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y la Llanura Costera del Golfo Norte que cubren el estado de Hidalgo.

En Hidalgo, el carácter estructural de esta cordillera es acentuado por pliegues complejos recostados hacia el noreste, y grandes fallas de empuje, que han arrancado de raíz fragmentos del basamento Precámbrico y Paleozoico, e imbricado a la secuencia mesozoica suprayacente (Provincia Sierra Madre Oriental). La continuidad de los fenómenos volcánicos durante casi todo el Neogeno, se manifiesta en el gran espesor y en la extensión que cubren las rocas ígneas del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), donde pueden encontrarse domos riolíticos, volcanes compuestos, conos cineríticos enteros y erosionados, y mesetas formadas por flujos piroclásticos y derrames de basalto.

La Provincia del CVT cubre una gran porción del estado de Hidalgo, y está constituida predominantemente por rocas volcánicas Neogenas y Cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), de composición y textura variada, las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete que, en algunas localidades, como Pachuca, alcanza varios miles de metros de espesor.

El Neógeno es predominantemente volcánico, constituido por el Grupo Pachuca (Oligoceno-Mioceno). Comprende ocho formaciones, con derrames andesíticos a dacíticos, basaltos y brechas cubiertas por tobas y derrames riolíticos a dacíticos y escasos basaltos, cuyo espesor conjunto es de 2 000 m. Cubren discordantemente a sedimentos cretácicos (Geyne et al., 1963). La sucesión más completa ocurre en la Sierra de Pachuca, la compone ocho formaciones: Santiago (Riolita Santiago), Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo y Tezuantla (Fig. 5). Sin embargo, se describen a continuación seis de las ocho formaciones que tienen un contacto geológico regional directo con Sierra de las Navajas.

Formación Pachuca

Denominación propuesta por Geyne et al. (1963), esta formación se constituye por una serie de capas lacustres de arcilla, cubiertas por derrames andesíticos y dacíticos interestratificados con varios miembros tobáceos lenticulares, alternados con brechas y aglomerados volcánicos. Su localidad tipo está en la mina San Juan

Pachuca, en el estado de Hidalgo. Su espesor varía de 300 a 500 m, sobreyace a la Formación Corteza y subyace a la Formación Real del Monte. Su edad es Oligoceno Medio (Fig. 5).

Formación Real del Monte

La designación fue propuesta por Geyne et al. (1963) y se constituye por derrames lávicos de rocas volcánicas intermedias (andesíticas - dacíticas) con piroclastos. La localidad tipo se ubica en el poblado de Real del Monte. El espesor es de 350 m y yace discordantemente sobre la Formación Pachuca y subyace a la Formación Santa Gertrudis. Le corresponde edad Mioceno Medio-Tardío (Fig. 5).

Formación Santa Gertrudis

Nombre propuesto por Geyne et al. (1963) para designar un conjunto de rocas volcánicas andesíticas a dacíticas con piroclastos. Su localidad tipo se halla en la población de Real del Monte, en la veta Santa Gertrudis, de las minas La Rica y La Purísima. Espesor: 350 m. La unidad sobreyace a la Formación Real del Monte y subyace a la Formación Vizcaína. Se le asigna edad Oligoceno Tardío (Fig. 5).

Formación Vizcaína

Introducida esta denominación por Geyne et al. (1963), esta unidad está compuesta por derrames de lava y capas de brechas andesíticas a dacíticas. Su localidad típica se halla en el poblado de Real del Monte. Comúnmente el espesor varía de 200 a 400 m; por acuífero se reduce hasta a 20 m. La unidad sobreyace a la Formación Santa Gertrudis y subyace a la Formación Cerezo. Se le asigna edad Mioceno Temprano (Fig. 5).

Formación Cerezo

La definió Geyne (1963) y está compuesta por derrames lávicos, brechas volcánicas de andesita, dacita y riocacita. Su localidad tipo se encuentra en el poblado El Cerezo. El espesor es de ~220 m. Sobreyace a las formaciones Vizcaína y Santa

Gertrudis; subyace a la Formación Zumate. Le corresponde edad Mioceno Tardío - Plioceno Temprano (Fig. 5).

Formación Zumate y Formación Tezuantla

Asimismo, existen unidades volcánicas en las zonas circundantes a la Sierra que han sido descritas, que no pertenecen a la estratigrafía de la Sierra de Pachuca y que representan una relación volcánica con los complejos de Sierra de Pachuca y Sierra de las Navajas. Estas unidades corresponden a un proceso volcánico posterior al Grupo Pachuca (Fig. 5). Entre las interpretaciones del Servicio Geológico Mexicano (2002) sus productos volcánicos pertenecen a un proceso diferentes al Grupo Pachuca.

Cenozoico	Neógeno	Mioceno	Grupo Pachuca	Fm. Tezuantla
				Fm. Cerezo
				Fm. Viscaína
	Paleogeno	Oligoceno		Fm. Santa Gertrudis
				Fm. Real del Monte
				Fm. Pachuca
				Fm. Santiago (Riolita Santiago)

Fig. 5. Columna estratigráfica del Grupo Pachuca.

Traquita Guajolote

Se compone de una lava vesicular de color gris, holocristalina, de textura porfídica, con feldespatos, plagioclasa y cuarzo. Aflora en el cerro Gordo, ubicado al Este de la Sierra de Pachuca. Según Núñez-Velázquez (2018), esta unidad subyace al complejo volcánico de Sierra de las Navajas. Se le asocia una edad del Pleistoceno temprano (Fig. 6).

Fonotefrita de Cerro Gallo

Esta unidad se compone de una fonotefrita de nefelina normativa. El punto de emisión se localiza al norte y ligeramente al oeste de Cerro Gordo. Es la única roca

nefelina-normativa encontrada cerca de Sierra de las Navajas. Presenta abundantes fenocristales de olivino y plagioclasas comparados con los escasos encontrados en los basaltos y andesitas basálticas, que rodean a Sierra de las Navajas. Se le atribuye al Plioceno temprano (**Fig. 6**).

Formación Atotonilco el Grande

Segerstrom (1961) propuso esta denominación. La localidad tipo de esta unidad se ubica en el noroeste de la población de Atotonilco el Grande. Está constituida por capas de conglomerado, tobas aglomeráticas, depósitos fluviales, capas de ceniza volcánica y pómez. El conglomerado está formado por gravas, arenas y limos. La formación sobreyace en discordancia a rocas terciarias. Su contacto superior está cubierto por derrames basálticos y depósitos aluviales del Cuaternario (**Fig. 6**). Representa el relleno de valles y cuencas lacustres endorreicas, cerradas por corrientes fluviales que transportaron material producto de la erosión y formaron grandes abanicos aluviales, así como acumulaciones lacustres complementadas por intensa actividad ígnea. Se le asigna edad pliocénica tardía.

Basaltos del Cañón

Según **Lighthard (2001)** los flujos de lava volcánica más antiguos expuestos en el área son una secuencia de cinco flujos de lava basáltica expuesta en el Arroyo Alcholoja al norte de Las Navajas. Estos localmente subyacen los depósitos de avalancha de escombros de Sierra Las Navajas. La secuencia superior de esta unidad basálticas, la Fm. San Cristobal, expuestos cerca del pueblo de San Bartolo en el cañón de Alcholoja, han sido fechados a 2.41 ± 0.08 Ma (**Fig. 6**).

Riolita Navajas (Complejo Volcánico Sierra de las Navajas)

Unidad constituida por derrames de lava riolítica gris claro, de estructura fluidal con vesículas, horizontes de brecha y toba riolítica, interestratificados entre sí y con pequeñas cantidades de material volcánico epiclástico. La localidad tipo se ubica en el cerro Las Navajas, al SE de Pachuca. También se expone en masas densas, compactas. Contiene fenocristales de cuarzo y sanidino. Se estima un espesor de

600 m. Sobreyace discordantemente a diversas formaciones volcánicas del Grupo Pachuca, y directamente sobre las formaciones Soyatal-Mezcala. Se interdigita con las formaciones San Cristóbal y Atotonilco el Grande. Queda cubierta discordantemente por la Traquita Guajolote (López-Reyes et al., 1997). Se le asigna edad Plioceno – Pleistoceno (Fig. 6).

Suelo o Aluvión

Depósitos no consolidados producto de la desintegración de las rocas, compuestos por cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas. Ocurren a lo largo de las márgenes de los ríos Tortugas y Tulancingo así como de los arroyos confluentes en la cuenca de este río.

Cenozoico	Cuaternario	Pleistoceno	Complejo Volcánico Sierra de las Navajas	
			Fm. Guajolote (Traquita)	
	Neógeno	Plioceno	Fm. San Cristobal 2.41±0.08 Ma	
			Prismas Basálticos de Sta. María Regla 2.58±0.15 Ma	
			Fm. Atotonilco El Grande	
			<i>Hiatus</i>	
			Fonotefrita Cerro Gallo	
			<i>Hiatus</i>	
	Paleogeno	Oligoceno	Grupo Pachuca	Fm. Tezuantla
				Fm. Cerezo
				Fm. Viscaína
				Fm. Santa Gertrudis
				Fm. Real del Monte
				Fm. Pachuca
Fm. Santiago (Riolita Santiago)				
	<i>Hiatus</i>			

Fig. 6. Columna estratigráfica que muestra la relación temporal entre el Grupo Pachuca y las unidades geológicas regionales de la Sierra de Pachuca.

1.5.1.2. Marco Geológico Local

Algunos autores han descrito formalmente la geología local de la Sierra (Lighthard, 2001; Lighthard, 2004; Donato et al., 2017; Núñez-Velázquez, 2018). La geología

del aparato volcánico de Sierra de las Navajas consiste principalmente en depósitos piroclásticos y coladas riolíticas, con numerosos conos cineríticos y derrames basálticos (Lighthart, 2004). En 1900 el geólogo Ezequiel Ordoñez describe a detalle toda la secuencia volcánica de la zona. Pastrana (1998) hace una compilación de los textos de Ezequiel Ordoñez (1900, 1901) publicada por el Instituto de Geología de México donde menciona el trabajo realizado por Ordoñez acerca del análisis del enfriamiento de lavas riolíticas y la cristalización de minerales en la obsidiana como parte de una amplia investigación llamada las Riolitas de México.

También, Pastrana (1998) hace una síntesis sobre otros estudios geológicos, donde menciona que los escasos trabajos que comprenden directamente a la zona del yacimiento de la Sierra de las Navajas, el área de formación de la obsidiana, son las observaciones geológicas de Humboldt (Humboldt, 1866; Thiemer-Sachse, 1892) y Holmes (Holmes, 1900 y 1919). El autor menciona textualmente que “a) En el área donde se ubican los materiales arqueológicos de la explotación prehispánica, no se observan afloramientos de obsidiana ni de alguna otra roca. La obsidiana fue explotada en una pendiente donde los depósitos posiblemente estratificados, yacen bajo la superficie a diferentes profundidades. b) Debido al tamaño de los bloques y nódulos, la obsidiana debió ocurrir en considerables masas de textura homogénea y colores negros, grisáceos, verdes pálidos satinados y brillantes. c) Las características particulares de la formación de la obsidiana en las Navajas y su ubicación estratigráfica, requieren un estudio específico”.

Recientemente se generó un estudio petrogenético de Sierra de las Navajas. Núñez-Velázquez (2018), menciona que el fechamiento realizado a lavas de obsidiana por el método K-Ar, le permitió obtener una edad de 2.2 Ma para la unidad Lavas Riolíticas de Obsidiana (Núñez-Velázquez, 2018). Al igual que Lighthard (2001), Núñez-Velázquez (2018) separa el complejo volcánico de las Navajas en dos eventos importantes, el pre- y post- colapso del paleo edificio volcánico. El análisis bibliográfico del presente estudio permitió estimar una edad aproximada de 2 Ma para este evento (Fig. 5), reportada por Lightahard (2001) y Núñez-Velázquez (2018).

Según [Lighthard \(2001\)](#) el basamento expuesto al norte de Sierra de las Navajas, son rocas sedimentarias plegadas de la Sierra Madre Oriental y secuencias volcánicas terciarias no relacionadas con Sierra de las Navajas. Los afloramientos de estas rocas se encuentran en colinas aisladas y en el cañón del Río Grande de Tulancingo. Expuestos en las paredes del cañón, hay varios cientos de metros de calizas marinas y lutitas finamente intercaladas. [Carrasco-Velázquez et al. \(2009\)](#) estimaron una edad para el basamento de Sierra de las Navajas que reporta [Lighthard \(2001\)](#). Fecharon la secuencia volcánico-clástica en 38.1 Ma, que consiste en una brecha andesítica de la Fm. Las Espinas, intercalada con la Fm El Morro.

En la Sierra se reporta un volcanismo máfico que [Lighthard \(2001\)](#) describe como basaltos ligeramente alcalinos, mugearita (traqui-andesita basáltica) y conos de ceniza de andesita basáltica y flujos de lava que erupcionaron alrededor de la base de Sierra de las Navajas, particularmente al N y E. De nueve conos de ceniza individuales en el área, seis son predominantemente alcalinos (basaltos y mugearitas). Esta asociación de basaltos medianamente alcalinos, con centros de riolita hiperalcalina es común donde el volcanismo hiperalcalino se asocia con tectónica extensional.

[Lighthard \(2001\)](#) menciona que durante la etapa inicial de vulcanismo en Sierra de las Navajas tres flujos hicieron erupciones en complejos: el complejo Las Minas, el complejo Guajalote y el complejo Ixatla, todos encontrados expuestos en los flancos sur y oeste de Sierra las Navajas. Señalando dice que estos depósitos piroclásticos intercalados y flujos de lava de riolítica ricos en obsidiana construyeron la estructura volcánica original de Sierra de las Navajas. La mayoría de los depósitos piroclásticos son depósitos pumicíticos no consolidados, aunque depósitos de cenizas de piedra pómez, depósitos de bloques, cenizas y tobas soldadas también se encuentran en toda el área de estudio.

El paleo estratovolcán se vio envuelto en un proceso destructivo que [Lighthard \(2001\)](#) describe como un colapso sectorial del lado norte del volcán que produjo una avalancha catastrófica de escombros. La desestabilización de la pendiente asociada aparentemente a este colapso expuso el magma, causando una

erupción explosiva. Los depósitos piroclásticos de esta erupción se superponen directamente a la avalancha de escombros a 48 kilómetros de Sierra de las Navajas.

En el estudio geológico que realizan [Lighthard \(2001\)](#) y [Núñez-Velázquez \(2018\)](#) reportan que más allá del complejo volcánico de Sierra de las Navajas, la unidad de avalancha de escombros está cubierta cerca por lavas basálticas medianamente alcalinas. Más al norte esta unidad se encuentra cubierta por depósitos lacustres probablemente depositados por lagos efímeros entre húmedos, y por varios depósitos de flujo de pómez, uno de los cuales se asoció con el evento de avalancha. Los conos de ceniza y los flujos de lava ligeramente alcalinos varían en composición desde basaltos a mugearitas y andesitas basálticas y parece estar químicamente relacionado con el vulcanismo hiperalcalino en Las Navajas.

De esta manera, la información sobre las unidades volcánicas de Sierra de las Navajas, fue recaudada a partir de la descripción hecha por [Lighthard \(2001\)](#) y [Núñez-Velázquez \(2018\)](#). Se hizo una revisión de estos trabajos para comparar las unidades y las formaciones volcánicas reportadas por las autoras; con el fin de elaborar una columna estratigráfica compuesta más clara y unificada para la geología de Sierra de las Navajas.

Erupciones piroclásticas

Según [Lighthard \(2001\)](#) la Sierra Las Navajas está construida principalmente por depósitos piroclásticos riolíticos intercalados con lava de riolítica de composición similar. Los materiales piroclásticos están expuestos dentro de Sierra Las Navajas en canteras o como afloramientos erosionados, frecuentemente con alturas de 30 metros o más. Según [Núñez-Velázquez \(2018\)](#), esta unidad se distribuye al SO de la Sierra y se asocia a los primeros pulsos eruptivos del paleoestratovolcán.

Complejo de flujo Las Minas

[Lighthard \(2001\)](#) describe esta unidad volcánica como un complejo que contiene riolita con bandas de flujo de obsidiana y depósitos piroclásticos extensos, representa el vulcanismo más silíceo en Sierra de las Navajas. Las rocas del Complejo de Flujo Las Minas se encuentran al sur y al oeste de lo que hoy es el

pico más alto de la Sierra, Cerro Las Navajas, en el flanco noroeste cerca del pueblo de Ixtula Sembo y como bloques dentro de la avalancha de escombros al norte.

Esta unidad se conoce como el complejo de flujo Las Minas porque casi todas las minas de obsidiana pre-Colonial y todas las modernas en Sierra de las Navajas se han dirigido a la obsidiana verde de este complejo de flujo. La obsidiana del Flujo Las Minas es típicamente de color verde botella en la sección delgada, libre de cristales, con una fractura concoidea perfecta e iridiscente.

Los bloques que carecen completamente de vesículas aparecen negros en la muestra de la mano, pero los bordes finos delgados y afilados, casi siempre se observan verdes. La obsidiana Las Minas que no es verde es poco común. Sin embargo, a veces puede aparecer de color marrón verdoso o marrón en la sección delgada. Las esferulitas son raras, excepto en muestras altamente erosionadas, y los fenocristales están ausentes.

Las riolitas masivas del Flujo Las Minas son de color beige o azul gris claro en la mano muestra, generalmente afaníticas con microfenocristales de feldespato alcalino, anfíboles sódicos y piroxenos. Son comunes las bandas de flujo muy delgadas en la escala de milímetros, al igual que la tinción de oxidación marrón alrededor de los micro fenocristales máficos. El color parece ser en gran medida un artefacto efecto de la intemperie. En la sección delgada la desvitrificación a menudo esferulítica o fragmentado, la matriz consiste en intercrecimientos de cuarzo y feldespato con pequeños cristales dispersos de aenigmatita. arfvedsonita. riebeckita y aegerina, Micro fenocristales incluyen feldespato, cuarzo, aenigmatita arfvedsonita. y/o aegerina.

Complejo de flujo Guajolote

[Lighthard \(2001\)](#) menciona que los flujos del complejo Guajolote se ubican en el flanco suroccidental de la Sierra de las Navajas, en dirección oeste, hacia la comunidad de Guajolote. Los flujos están compuestos por obsidiana roja y riolitas vidriosas con bandas de flujo. Según [Núñez-Velázquez \(2018\)](#), Las Lavas El Guajolote, son rocas de composición dacítica y contienen fenocristales de anfíbol,

plagioclasa y cuarzo. Estratigráficamente se encuentran emplazadas en discordancia sobre el Grupo Pachuca de la Sierra de Pachuca

Complejo de flujo Ixatla

Según [Lighthard \(2001\)](#) las riolitas Ixatla entraron en erupción antes y después del colapso del sector del volcán. El flujo Ixatla caracterizado por una obsidiana marrón claro, libre de fenocristales, comenzó en erupción antes del colapso del sector y está expuesto tanto a lo largo del flanco sur de Las Navajas como en el depósito de la avalancha de escombros al norte.

Las riolitas de Ixatla se encuentran dentro del depósito de avalancha de escombros. Uno de estos flujos se expone como un paquete intacto, con la capa rica en obsidiana característica en la parte inferior y riolitas cristalinas en la parte superior, dentro del depósito de avalanchas de escombros en las paredes del Arroyo Alcholoaya.

La obsidiana transparente de Ixatla marrón o gris a veces es cristalina en la muestra de la mano, pero con microcristales extremadamente pequeños de feldespatos y aegerina visibles en la sección delgada. Las bandas de flujo de escala fina, vistas como variaciones de color en la escala de milímetros, son comunes tanto en la obsidiana como en las riolitas cristalinas. Los flujos riolíticos están claramente divididos en bandas, alternando bandas delgadas de obsidiana y riolita cristalina o desvitrificada. Los piroclásticos asociados con este complejo parecen ser depósitos a nivel de aire relacionados con pequeñas erupciones que acompañaron el emplazamiento de riolitas después del colapso.

Complejo de flujo El Horcón

Según [Lighthard \(2001\)](#) las riolitas de El Horcón se exponen mejor como altos picos remanentes tanto dentro del anfiteatro colapsado como desbordando los bordes este y oeste de la escarpa de avalancha. Estos picos (Cerro Ladera Grande, Cerro El Horcón, Cerro Jacal y Cerro La Providencia) son las características más distintivas visibles en Sierra de las Navajas.

Las riolitas de El Horcón a veces contienen bandas de flujo de obsidiana rica en sanidina que aparece gris opaco en la muestra de la mano y marrón o gris verdoso en los bordes delgados.

Abundantes fenocristales y microfenocristales que varían en tamaño a aproximadamente 4 mm, incluye sanidina, óxidos opacos y aenigmatita. Las riolitas cristalinas aparecen en la muestra de la mano y en la sección delgada de forma similar a los otros flujos de riolita ya descritos, aunque los fenocristales de feldespatos son a menudo un poco más grandes y abundantes que en los otros flujos.

Las erupciones piroclásticas asociadas con el complejo El Horcón fueron aparentemente muy explosivos, por lo que la mayoría de los depósitos piroclásticos atribuidos a este flujo se encuentran al norte de Sierra Las Navajas, están separadas del depósito de la avalancha de escombros subyacente por una capa de suelo, lo que indica un lapso significativo entre el colapso del sector y las erupciones piroclásticas.

Traquita comendítica de Cerro Gordo

[Lighthard \(2001\)](#) menciona que el área se caracteriza por las traquitas comendíticas que estallaron en el Cerro Gordo, al oeste de Sierra de las Navajas. El complejo volcánico de Cerro Gordo es contemporáneo con la Sierra. Donde las riolitas post-colapso desbordan el escarpe de la avalancha occidental, donde también se desbordan traquitas comendíticas asociadas con el complejo de Cerro Gordo. Por el contrario, las lavas traquíticas de Cerro Gordo parecen haber cubierto el extremo norte del oeste de la franja de avalancha.

Avalancha de escombros

[Lighthard \(2001\)](#) le da una importancia especial a este evento volcánico que se presenta en la zona. La Sierra de las Navajas generó un depósito masivo de avalanchas de escombros que resultaron del colapso del sector del flanco norte del volcán aproximadamente hace 2 millones de años. La avalancha de escombros viajó ~48 km al norte de Sierra de las Navajas y cubrió un área de al menos 510 km². La distribución del depósito dentro y al norte del cañón del Río Grande de

Tulancingo coincide con la proyección hacia el norte y hacia el noreste de las paredes del colapso de depresión lejos del volcán.

Los flujos de El Horcón posteriores al colapso desbordaron el escarpe oriental, cubriéndolo en gran medida. La ubicación del escarpe se infiere debajo de El Horcón, que fluye en base a la expresión topográfica y en los límites orientales de la exposición a la avalancha. El sistema de fallas normales, con tendencia al NW, corta la avalancha de escombros después de su emplazamiento, de modo que la superficie superior del depósito al norte de la falla es aproximadamente 100 metros más alta que al sur de la falla.

El depósito tiene un volumen estimado de $32 \pm 9 \text{ km}^3$. Debido a que una gran parte del depósito está enterrado debajo de basaltos y suelos, el espesor original y la extensión máxima del depósito de avalancha de escombros son desconocidos.

El depósito consiste en bloques intactos de riolita, obsidiana, basalto y a veces traquita de contenidos en una matriz fina. La obsidiana es tanto del complejo Las Minas como del complejo Ixatla. Las traquitas, que se pueden encontrar como grandes bloques en el depósito de avalanchas de escombros deben haber sido tomadas de la unidad de Cerro Gordo al norte de Sierra de las Navajas.

Conos cineríticos y flujos de lava asociados

Según [Núñez-Velázquez \(2018\)](#), los conos cineríticos están formados de escoria de color gris oscuro a negro con presencia de oxidación. Los productos piroclásticos y tefras son afaníticos y vesiculares ([Núñez-Velázquez, 2018](#)). [Lighthard \(2001\)](#) destaca una alineación de los conos de ceniza que se asocia a procesos de los esfuerzos de deformación tectónica en la región, evidenciada en fallamiento de tipo normal al norte de Tulancingo en el cañón de Río Grande. La tendencia se puede ver en los conos de ceniza de Cerro Tezontle, Cerro Aguatepec, y Cerro Tepenacasco que juntos forman una alineación al noroeste, casi perpendicular a en los conos de ceniza Cerro Tecoco, Cerro Verde y Cerro Prieto, que forman una alineación casi paralela al suroeste de la mencionada anteriormente.

Depósitos lacustres y Suelo

Los depósitos lacustres, indican que probablemente se hayan generado grandes montículos en el depósito de avalanchas de escombros, que afectaron significativamente el drenaje; tales montículos son característicos de las avalanchas de escombros volcánicos jóvenes. Desde entonces, estos montículos han sido degradados y erosionados, dejando solo los depósitos del lago como evidencia de su emplazamiento y como parte del depósito de avalanchas.

Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Lacustres y Suelo		
		Pleistoceno	<i>Hiatus</i>		
			Basaltos Canyon (Conos de escoria) 1.87±0.03 Ma		
			Traquita Comendítica Cerro Gordo		
			Evento de Colapso ± 2.0 Ma (Avalancha de Escombros)		
			Complejo Volcánico de Sierra de las Navajas	Flujo El Horcón	
				Flujo Ixatla	
				Flujo Guajolote 2.2±0.05 Ma	
				Flujo Las Minas	
		Fm. Guajolote (Traquita)			

Fig. 7. Estratigrafía compuesta de Sierra de las Navajas

Según la cartografía regional reportada por el INEGI, el trabajo cartográfico y geológico de las unidades volcánicas reportadas por [Lighthard \(2001\)](#) y [Núñez-Velázquez \(2018\)](#) en Sierra de las Navajas, se resume en una columna estratigráfica con los principales eventos asociados a la región de la Sierra de Pachuca y Sierra de las Navajas ([Fig. 8](#)).

Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Lacustres y Suelo		
		Pleistoceno	<i>Hiatus</i>		
			Basaltos Canyon (Conos de escoria) 1.87±0.03 Ma		
			Traquita Comendítica Cerro Gordo		
			Evento de Colapso ± 2.0 Ma (Avalancha de Escombros)		
			Complejo Volcánico de Sierra de las Navajas	Flujo El Horcón	
				Flujo Ixatla	
				Flujo Guajolote 2.2±0.05 Ma	
				Flujo Las Minas	
			Fm. Guajolote (Traquita)		
	Neógeno	Plioceno	Fm. San Cristobal 2.41±0.08 Ma		
			Prismas Basálticos de Sta. María Regla 2.58±0.15 Ma		
			Fm. Atotonilco El Grande		
			<i>Hiatus</i>		
			Cerro Gallo (Fonotefrita)		
			Mioceno	Grupo Pachuca	Fm. Tezuantla
	Fm. Cerezo				
	Fm. Viscaína				
	Fm. Santa Gertrudis				
	Fm. Real del Monte				
Fm. Pachuca					
Fm. Santiago (Riolita Santiago)					
<i>Hiatus</i>					
Paleogeno	Oligoceno	<i>Hiatus</i>			
		Eoceno medio-tardío	Fm. Las Espinas (Brecha Andesítica) 38.1±1.4 Ma		
			Fm. El Morro (Fm. Soyatal)		

Fig. 8 Columna estratigráfica compuesta según los antecedentes bibliográficos, que resume a los eventos geológicos en la región circundante a Sierra de las Navajas.

1.5.1.3. Geoquímica de rocas volcánicas en La Sierra de Las Navajas

Las investigaciones de [Lighthard \(2001\)](#), [Donato et. al. \(2017\)](#), y [Núñez-Velázquez \(2018, 2020\)](#) son los trabajos que han reportado datos geoquímicos para el flanco SO del paleoestratovolcán de Sierra de Las Navajas. En ellos se menciona que los datos geoquímicos tienen la finalidad plantear una relación petrogenética, así como de asociar geoquímicamente las unidades geológicas identificadas en el complejo volcánico de Sierra de las Navajas ([Lighthard, 2001](#) y [Núñez-Velázquez, 2020](#)). Por otro lado, [Donato et. al. \(2017\)](#), persigue una identificar la química y la mineralogía que le otorgan una variedad textural a las obsidianas en la Sierra de las Navajas.

En su estudio [Lighthard \(2001\)](#), procesó a partir de FRX y activación neutrónica más de 220 muestras. En sus resultados menciona que la química de las muestras de obsidiana, realizada, muestra una pequeña variación sin importar la localidad de sus flujos. Estableciendo que el volcanismo de Sierra de las Navajas se reconoció con una afinidad hiperalcalina y una identidad magmática difusa por ubicarse en un contexto de magmatismo de calco-alcalino a alcalino.

El mismo autor señala que el enriquecimiento de Zr y Nb, es una característica particular de los magmas híperalcalinos y que los elementos Zr, Nb, Rb, Th, Ba, y Ti, ayudan a distinguir entre los flujos en Sierra de Las Navajas y el Cerro Gordo (cuerpo rocoso ubicado al W, entre Sierra de Pachuca y Sierra de las Navajas).

En temporalidad según la estratigrafía local de Sierra de las Navajas la unidad “Las Minas Flow” ([Fig. 7 y 8](#)), contiene el yacimiento de obsidiana verde ([Lighthard, 2001](#)). Esta unidad se compone por riolita, con bandas de flujo de obsidiana y depósitos piroclásticos extensos, y representa el volcanismo más silíceo en la Sierra ([Lighthard, 2001](#)). Según [este mismo autor](#) el complejo Las Minas presenta características geoquímicas particulares y únicas con las composiciones geoquímicas más bajas en compuestos mayores de TiO₂, MgO, K₂O, La, Ce, Nd y Sm, y las más altas de Rb, Zr, Nb, Hf, Cs, Yb, Lu, Zn, Pb, y Cl de toda las riolitas de la Sierra de las Navajas.

Por otro lado, el trabajo realizado por [Donato y colaboradores \(2017\)](#) reporta solo los datos geoquímicos realizados a las obsidianas encontradas en la unidad

Flujo Las Minas, muestran una variación en la concentración de los elementos, TiO₂, FeO tot, Zr, Nb, Ba, Rb, Y y REE, en dos dominios geoquímicos principales, en particular bajo los casos de los cocientes TiO₂/FeO_{tot}, Rb/Ba y Zr/Nb. Asimismo, presenta una relación entre la geoquímica de las obsidias estudiadas en Flujo Las Minas y su posición estratigráfica, considerando que las estudiadas en la unidad inferior, clasificada como una lapillita de caída libre presenta valores distintos en Ba, Nb y Rb en comparación a las estudiadas en una unidad superior nombrada como Brecha.

Recientemente [Núñez-Velázquez \(2020\)](#) propone agrupar al volcanismo en cuatro eventos magmáticos: Evento de rocas Pre-Navajas (antes de la formación del volcán), de composición andesítica-dacítica, carácter calcoalcalino y patrones de elementos traza asociados con procesos de subducción. Los eventos Pre-Colapso y Post-Colapso, forman el volcán y tienen un carácter hiperalcalino (tipo comendítico).

Características fisicoquímicas de la obsidiana de Sierra de las Navajas

La obsidiana de Sierra de las Navajas ha sido caracterizada por dos estudios previos ([Tenorio et al., 1998](#) y [Donato et al., 2017](#)). Según [Tenorio et al., \(1998\)](#), las variedades en los colores de obsidiana que existen en Sierra de las Navajas—la verde que es continua y homogénea, y la verde grisácea—no dependen de los estados de oxidación del Fe, sino del contenido de “burbujas”. Por otro lado, [Donato et al., \(2017\)](#), mencionan que las obsidias verdes de la Sierra de las Navajas muestran muchas vesículas estiradas, ubicadas en planos preferenciales y alargadas en una sola dirección. La sección de vesículas generalmente se aplana y está en el rango de algunas decenas de micras. Asimismo, [Donato et al., \(2017\)](#) mencionan que para las vesículas se confirma una porosidad cerrada relativamente alta: se encontró una densidad numérica de 1600 vesículas/mm³ en el volumen analizado para una vesiculación de 2,2% vol. están ampliamente distribuidas con un tamaño promedio de $0.13 \pm 0.28 \times 10^5 \text{ mm}^3$, y una longitud promedio del eje mayor de $54 \pm 44 \text{ mm}$ con un ángulo polar promedio de $29.4^\circ \pm 15.0^\circ$.

1.5.2 Antecedentes Arqueológicos

La obsidiana es un material vítreo natural de origen volcánico que fue fundamental en los cambios culturales de distintas sociedades del mundo: Mesoamérica, Mediterráneo, Asia Menor y Pacífico antes del descubrimiento y difusión del acero. Las ubicaciones geográficas de dichas sociedades muestran una correlación espacial con las principales ocurrencias naturales de obsidiana del mundo. El uso de los recursos naturales como fuente de materia prima en las sociedades ha formado parte del desarrollo substancial de cada cultura.

De manera general, [Heide & Heide \(2011\)](#) mencionan que, en épocas muy tempranas de la historia cultural de la humanidad, esta se caracterizó por la capacidad de usar materiales líticos para producir instrumentos de trabajo y armas. El uso de obsidiana determinó el desarrollo de civilizaciones antiguas mucho antes de la invención y producción de herramientas metálicas. Además, los descubrimientos arqueológicos proporcionan evidencia de un comercio amplio de obsidiana.

Sierra de las Navajas, explotación Teotihuacan-Azteca y comercio

En [2011 Pastrana y colaboradores](#) hacen una buena recopilación acerca de las formas y las estrategias de explotación de la obsidiana en la Sierra de las Navajas y comentan que las características geológicas del yacimiento condicionaron a la minería teotihuacana a profundidad y a cielo abierto. [Pastrana et al. \(2011\)](#) mencionan que fue la primera extracción a gran escala, con una serie de grandes trincheras a cielo abierto que removieron, como material de la excavación minera, considerables volúmenes de riolita, lapilli y ceniza volcánica para la extracción de bloques de obsidiana de dimensiones, forma y calidad adecuada para la talla, desde una profundidad que alcanzó los 20 m.

Asimismo, según [Pastrana et al. \(2011\)](#) las limitantes de este tipo de explotación son que los grandes volúmenes de material de extracción imposibilitan ampliar las excavaciones, además de los potenciales derrumbes. Por este conjunto de características limitantes, fue que se requirió una inversión de trabajo creciente, siendo necesario desarrollar la minería a profundidad por medio de tiros y túneles

en donde los volúmenes de remoción de tierra son significativamente menores. Las técnicas, el instrumental y las formas de organización del trabajo de ambos tipos de minerías son diferentes, y a lo largo del tiempo subsistió la explotación subterránea profunda que continuó en las explotaciones correspondientes a las culturas tolteca, azteca y colonial.

La evidencia arqueológica del sitio muestra que el yacimiento fue explotado desde la época del Formativo Temprano (Cobean, 2001), pasando a una etapa de intensa explotación desde el Preclásico tardío hasta la época de la Colonia (Pastrana, 2002).

Las evidencias de explotación que existen en Sierra de las Navajas son evidentes. El paso del tiempo trae consigo una destrucción natural y antropogénica de los vestigios arqueológicos de explotación y asentamiento en la Sierra. Sin embargo, es importante mencionar que Cobean (2002) reporta que la obsidiana de Sierra de las Navajas se comerciaba en forma de navajas prismáticas desde el Formativo Temprano (ca. 1200 a. C.) a través de buena parte de Mesoamérica. En este periodo parece que el volumen de producción de obsidianas fue mayor en los yacimientos de Ucareo-Zinapecuaro y Paredón (ubicados al occidente del Cinturón Volcánico Transmexicano).

Según Cobean (2002) La Sierra de Pachuca (Sierra de las Navajas) fue la fuente principal de obsidiana para la mayoría de los grandes estados precolombinos del centro de México, especialmente para Teotihuacan, Tula y Tenochtitlan. Las investigaciones arqueológicas y los análisis de elementos traza nos indican que en el sur de Mesoamérica la presencia de obsidiana de Pachuca se correlaciona con la expansión política o el "imperialismo económico" de los estados del centro de México.

En 2011, con respecto a la obsidiana, Pastrana y colaboradores hacen un análisis al desarrollo urbano de la civilización teotihuacana en su fase Tamimilolpa (200-400 a.C.) en donde se cita lo siguiente: "El desarrollo de la urbe teotihuacana estuvo relacionado directamente con la explotación y utilización de la obsidiana gris-negra del yacimiento de Otumba, ubicado a una distancia de 18 km al Este del asentamiento urbano (Spence, 1981). A partir de la fase Tlamimilolpa se detecta el

suministro y la creciente distribución de la obsidiana verde-dorada, procedente de la Sierra de las Navajas (Pachuca), situada a una distancia de 50 km al noroeste de Teotihuacán. La obsidiana verde se empleó en actividades artesanales, militares y religiosas, y a través del tiempo se convirtió en un bien inalienable del Estado teotihuacano”.

Importancia durante la Colonia

La Sierra de las Navajas para la época de la colonia [Pastrana & Fournier \(1998\)](#) mencionan que los cambios económicos y tecnológicos en el modo de vida indígena ocurridos a raíz de la conquista hispana, incluyen la cría de ganado menor y mayor, la agricultura de cultígenos europeos como el trigo y la caña de azúcar, la explotación minera, así como la introducción de instrumentos de trabajo de metal. No obstante, la sustitución de los implementos propios de la cultura prehispánica hechos con materiales líticos por objetos de hierro o cobre, fue un proceso paulatino dada la escasez y el costo elevado de los metales.

Tanta importancia en la cultura teotihuacana representó la obsidiana de Sierra de las Navajas, que llevó a generaciones indígenas casi 1200 años después a seguir explotando la misma fuente de vidrio volcánico para satisfacer sus necesidades domésticas, y del trabajo artesanal. Según [Pastrana et al. \(2019\)](#), la explotación de la obsidiana verde del yacimiento de Sierra de las Navajas es particularmente relevante por la presencia de materiales arqueológicos que muestran una secuencia de cambios e interrupciones de la explotación alrededor del 1428-1720 D.C., en la cuenca de México.

Según [Pastrana & Fournier \(1998\)](#), las fases del proceso general de trabajo reflejan que se organizó de la manera más eficaz posible acorde con las características geológicas del yacimiento y con el nivel de destreza técnica de la población. Esta organización implicó necesariamente una dirección general a gran escala regulando la minería, la talla, y el mantenimiento de los trabajadores y el transporte de los productos para satisfacer una creciente demanda de obsidiana verde paralela a la consolidación y expansión de la Triple Alianza tenochca. [Pastrana & Fournier \(1998\)](#) mencionan que la última fase de explotación sistemática

se realizó entre aproximadamente 1521 y 1540, aun cuando hay evidencias ocupacionales que datan de fines del siglo XVII e incluso del XVIII. La explotación minera azteca fue un proceso de trabajo especializado y organizado en etapas consecutivas en serie, a diferencia de la colonial que fue en paralelo e intermitente, es decir, que cada trabajador realizaba todas las etapas individualmente (ibid).

[Pastrana et al. \(2019\)](#) mencionan que la información arqueológica de Sierra de las Navajas permitió identificar que durante el periodo postclásico tardío la demanda poblacional de obsidiana fue principalmente de cuchillos bifaciales, núcleos prismáticos, raspadores, artefactos de alto prestigio para la elite del estado. Por otro lado, durante el periodo colonial temprano, aunque se seguía produciendo los núcleos de navajas prismáticas, se comenzó a producir un nuevo tipo de “raspadores” de gran tamaño. Lo cual podría corresponder a un cambio en las necesidades de la sociedad colonial con la introducción de ganado.

En la época colonial temprana la explotación del yacimiento de Sierra de las Navajas está indicada por la concentración de diversas construcciones y campamentos alrededor de una capilla Franciscana del siglo XVI, para la evangelización de los mineros ([Pastrana et al. 2019](#)). En síntesis, los materiales arqueológicos de este importante yacimiento de obsidiana verde obscura-dorada reflejan una larga secuencia de explotación prehispánica, colonial y moderna, con cambios e interrupciones que denotan etapas de estabilidad y de crisis de las sociedades que lo explotaron.

2. Geología del área de estudio

A grandes rasgos la geología cuaternaria de la región se distribuye en el área construyendo topográficamente el edificio de un paleo-estratovolcán, que se compone principalmente de distintos eventos volcánicos piroclásticos. La geomorfología del volcán permite observar que, estructuralmente, ha tenido por lo menos dos colapsos importantes los cuales le dan su forma topográfica actual (Fig. 9 y 12).

El tipo de vegetación boscosa de encinos, pinos y zacatón de alta montaña limita la observación de los afloramientos de rocas en el área. Sin embargo, existen zonas en donde de manera natural, y por el efecto antropogénico, es posible observar algunas de las unidades rocosas que componen al stratovolcán. El trabajo de campo permitió observar la relación que existe entre los eventos efusivos y explosivos. Así como su ocurrencia, naturaleza y distribución puestas en evidencia gracias a la minería moderna y prehispánica principalmente de la Mina de Pómez de Alfajayucan y de la Mina de Pómez el Nopalillo.



Fig. 9. Vista panorámica del flanco NNE de la sierra, desde la cima de Cruz del Milagro (mirador).

2.1 Cerro de las Navajas

El trabajo de campo se centró en la localidad del Cerro de las Navajas, ubicado en el flanco SO del paleovolcán (Fig. 11 y 12), entre la localidad de Cruz de Milagro (CM, Fig. 9), la localidad de El Jariyal (J). Una de los rasgos fisiográficos de esta localidad es que se contiene uno de los dos puntos más altos de la sierra (CM),

alcanzando los ~3180 msnm. Este lugar guarda los vestigios volcánicos mejor preservados de la etapa constructiva del paleovolcán de Sierra de las Navajas (SLN). En el área de Cerro de las Navajas (Fig. 11), se describieron las dos unidades rocosas con mayor distribución en el área: la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas y la Unidad Fluidal Itztetl.



Fig. 10. Entrada a la zona arqueológica del INAH, en la localidad de Cerro de las Navajas



Fig. 11 Vista panorámica hacia el SE de la localidad de Cerro de las Navajas. Las líneas amarillas discontinuas indican la zona central de la localidad.

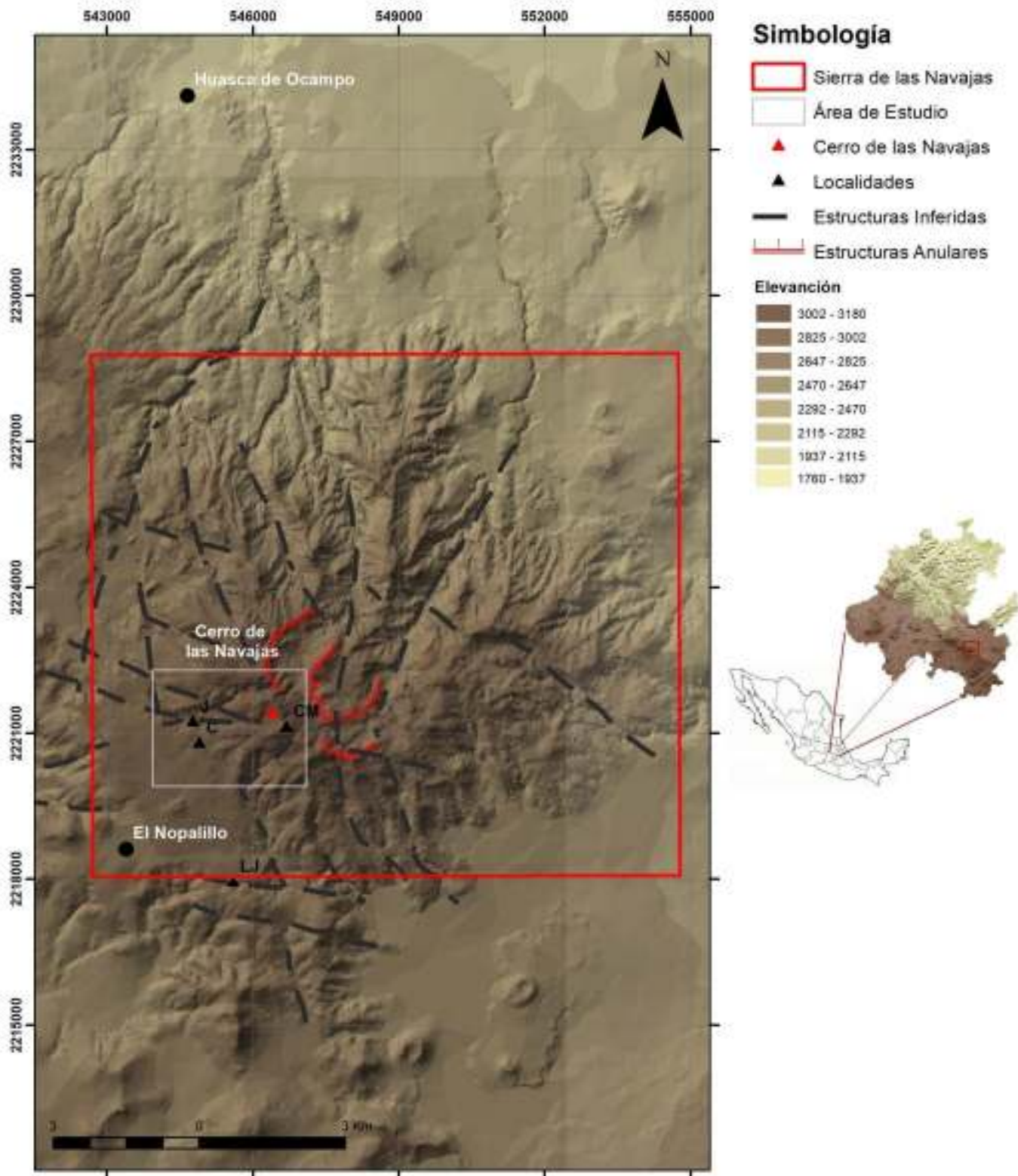


Fig. 12. Mapa que muestra la localización del área de estudio indicada como Cerro de las Navajas recuadro de color gris. El recuadro de color rojo indica el área geomorfológica estimada para la Sierra de las Navajas. J = Jariyal, C = Campamento, CM = Cruz de Milagro, LJ = La Joya.

Estas dos unidades fueron caracterizadas a nivel de campo en muestras de mano, en las minas modernas de pómez de Alfajayucan y el Nopalillo (cielo abierto y subterránea profunda), Mina de Javier Amador y Mina de Pedro Castelán (subterránea profunda). Tomando como referencia su directa relación con la ocurrencia de la obsidiana, las minas modernas se han convertido en el sitio los puntos principales de observación para esta investigación.

2.2.1 Cruz de Milagro

En el presente estudio, el área de Cruz de milagro (CM) representa uno de los sitios geológicamente más importantes, para identificar la ocurrencia de formación de la obsidiana verde. Hacia la zona NE de CM afloran en forma de crestas, de tamaños decimétricas a métricas, una riolita fluidal de color beige y tonalidades grisáceas, que la caracteriza un alto contenido en litofisas. En ocasiones es posible observar bandas de obsidiana con espesores no mayores a 5 cm. Las crestas presentan una actitud semi vertical de 230/72 (Regla de la Mano Derecha). Fue posible reconocer litofacias que van de zonas con menor contenido en litofisas, un alto contenido en litofisas (Fig. 13 B), un alto contenido en litofisas con bandas de obsidiana (Fig. 13 A) y una riolita pumicítica.



Fig. 13. Fotografías de los tipos de afloramiento en Cruz de Milagro. En A se observa la riolita con bandas de obsidiana y en B se muestra la riolita fluidal con alto contenido de litofisas.

2.2.2. Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas (CPD)

La unidad se identificó como la compilación de diferentes eventos piroclásticos explosivos en donde se presentan los tres mecanismos formacionales (depósitos de bloques y ceniza, oleadas e ignimbrita) (Fig. 14). Es de espesor desconocido porque la base del flujo no aflora, sin embargo, el espesor mayor observado en campo es de ~25 m. De la base a la cima se observa: (a) una ignimbrita representada por una litofacies de una lapillita pumicítica con fragmentos líticos y marekanitas, (b) una oleada de base y, (c) un Flujo de Depósito de Bloques y Cenizas—con bloques de obsidiana verde, de perlita y de fragmentos líticos de riolita.

Esta unidad fue identificada gracias a la minería moderna de pómez y se interpreta que, la lapillita pumicítica ignimbrítica de composición riolítica, representa el sustrato principal del flanco SO del paleo-edificio volcánico de Sierra de las Navajas.



Fig. 14. Fotografía de la cantera de Mina de Pómez El Nopalillo. Se muestra de la base a la cima la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas.

2.2.3 Unidad Fluidal Itztetl (UFI)

Esta unidad aparentemente aflora estratigráficamente sobre la cima de la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas. Es normal verla aflorar sobre los caminos cerca de las minas. Es una riolita fluidal vesicular de color gris a lila grisáceo con fenocristales de feldespatos alcalinos. Estos afloramientos fueron caracterizados en las minas de pómez de Alfajayucan y El Nopalillo.

La unidad presenta litofacias descritas de la base a la cima como a) base vítrea, b) zona de alto contenido de vesículas y finalmente c) masiva. Aparentemente esta unidad se distribuye por todo el flanco SO de Sierra de las Navajas con espesor que van de los 10 a los 40 m, con variedades en litofacias (Fig. 15). Una característica que resaltar de esta unidad se observa en la litofacias base vítrea, donde ocurre una variedad de obsidiana negra con fenocristales de Sanidino (<2 cm) que presenta bandas con tonalidades de color café, gris y azul grisáceo. En ocasiones se observa pura y sin alteraciones visibles, sin embargo, normalmente se observa altamente perlitzada.

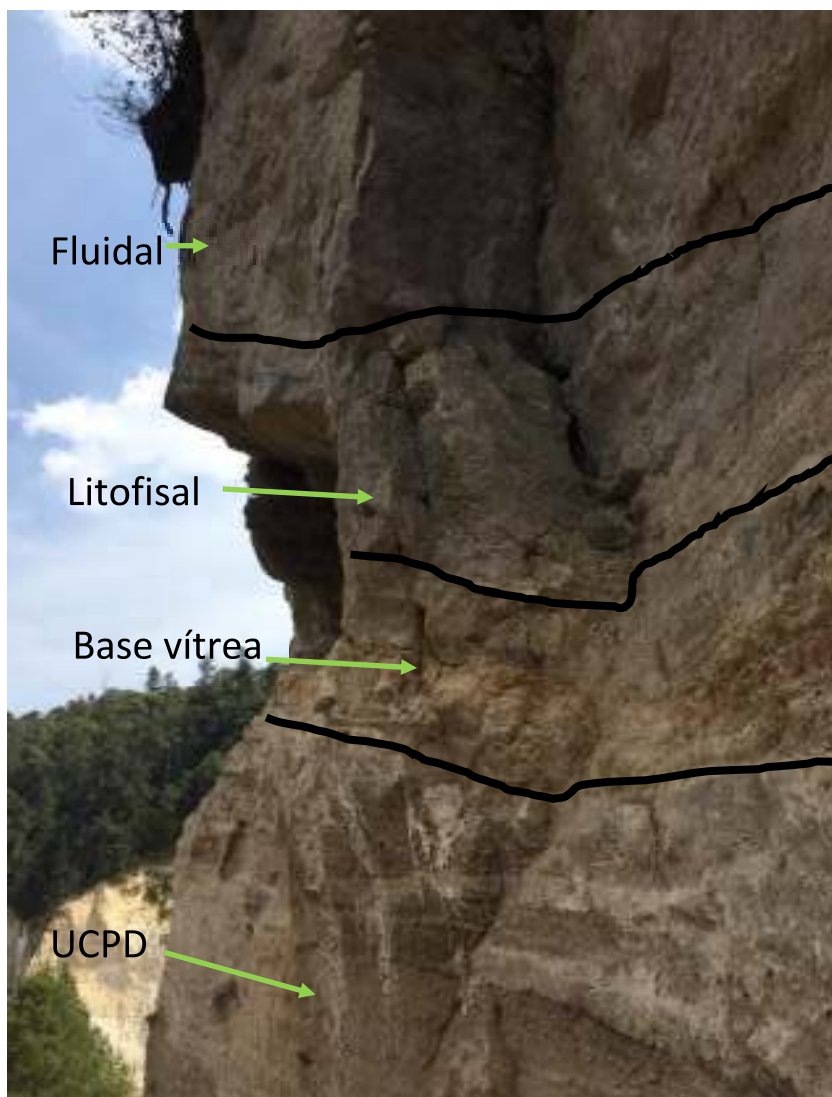


Fig. 15. Cantera de la Mina de Pómez El Nopalillo, donde se muestra las litofacias de la Unidad Fluidal Reomórfica.

2.2.4 Mina de Pómez de Alfajayucan

La exposición rocosa en la mina (Fig. 16), permite observar una secuencia compuesta por lo menos por dos unidades volcánicas de distinta naturaleza. A la base se encuentra la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas (UCPD) es de origen piroclástica ignimbrítica y a la cima la Unidad Fluidal Itztetl (UFI) la cual es un derrame riolítico fluidal.

La UCPD es una secuencia compuesta por procesos de mecanismos ignimbríticos que de la base a la cima se compone de una Lapillita de pómez ignimbrítica con alto contenido en líticos y presenta una actitud 74/ 26 (regla de la mano derecha, RMD). Se observa poco solada y es de color café amarillento muy claro (Fig. 17). Es de composición presumiblemente félsica y se encuentran los granos sostenidos. No se aprecia alteración.

Los líticos no varían mucho en tamaño (2 – 7 u 8 cm). Se observan algunas estructuras primarias del flujo como la imbricación de los fragmentos. Es importante mencionar que los fragmentos líticos no presentan una gran diversidad, solo se pueden observar fragmentos <8 cm de una riolita fluidal bandeada, de una ignimbrita y escasos fragmentos de perlita con marecanitas de obsidiana verde oscura.

La secuencia se encuentra en contacto ligeramente discordante por una litofacies compuesta de toba de lapilli lítica no soldada y poco consolidada de aparente composición riolítica con fragmentos de obsidiana menores a 1 cm, con actitud estructural 69/26. Presenta una ligera alteración argílica de color beige. La obra minera permite observar un corte perpendicular-paralelo (PePa, Ver Anexo 1) del flujo piroclástico asociado a la ocurrencia del eje mayor de los líticos y las pómez, en los cuales se observó un sistema de imbricación en los fragmentos

Hacia la cima el contacto entre la UFI y la UCPD se encuentra una roca aparentemente sedimentaria. Ya que presenta composición polimíctica de fragmentos subredondeados sostenidos en una matriz de color rojizo. Esta roca se ha interpretado como un paleo suelo o la superficie del sustrato de la UFI (Fig. 17).



Fig. 16. Vista panorámica de la Mina de Pómez de Alfajayucan.

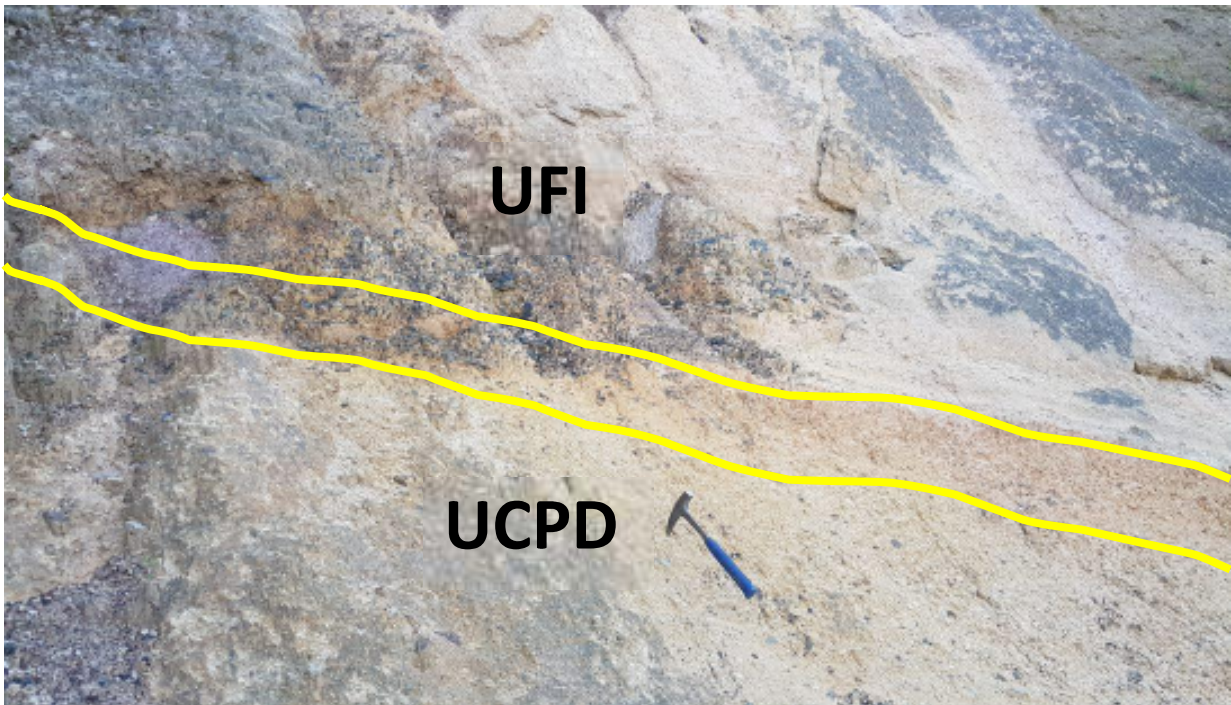


Fig. 17. Talud de la Mina de Pómez de Alfajayucan donde se muestran las dos unidades divididas por el paleosuelo marcado de por dos líneas de color amarillo.

La UFI está representada por un derrame riolítico fluidal que hacia la base presenta una litofacies de base vítrea contorsionada (Fig. 18). Este derrame se puede apreciar que avanzó hacia los bajos paleotopográficos sobre la ladera con una dirección de flujo ~ 265/18. La obsidiana asociada a esta litofacies es de color negra u oscura, presenta fenocristales de felsespato alcalino (FA) y una perlitización en desarrollo con marekanitas. Por esta particularidad del vidrio, se le ha llamado Unidad Fluidal Itztetl (UFI).



Fig. 18 Litofacies Base vítrea contorsionada.

2.2.5 Mina de Pómez El Nopalillo

El corte de esta mina permite observar dos paquetes, compuestos cada uno por dos unidades volcánicas, con distinta relación litológica. En ambas ocurre a la base una unidad de Corrientes Piroclásticas Densas (CPD) que se presenta como sustrato de dos eventos volcánicos de distinta naturaleza. Sin embargo, en esta mina se distingue el paquete de *La Barranquilla de la Mina de Pómez el Nopalillo* por su

característica piroclástica y el paquete los *Túneles de la Mina de Pómez el Nopalillo* resalta el carácter efusivo del área (**Fig.19**).



Fig. 19. Vista panorámica de la Mina de Pómez El Nopalillo. La línea amarilla divide el paquete de La Barranquilla (izquierda) del paquete de los Túneles (derecha).

La Barranquilla de la Mina de Pómez el Nopalillo

En la Barranquilla a la base se observa una Lapillita de pómez ignimbrítica con alto contenido en líticos y presenta una actitud 180/37 (RMD). Se encuentra poco solada y es de color café amarillento muy claro. Es de composición presumiblemente félsica sin alteración visible y presenta líticos que no varían mucho en tamaño (2 – 7 u 8 cm). Se observan algunas estructuras primarias de flujo como imbricación de los fragmentos. Es importante mencionar que los fragmentos líticos no presentan una gran diversidad, solo se pueden observar fragmentos <8 cm de una roca riolítica fluidal bandeada y de una roca piroclástica de tipo ignimbrita.

Existe un contacto discordante discordante de la Lapillita de pómez con una oleada piroclástica de base que subyace a un Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC) que se ha nombrado como DFBC Itztetl (**Fig. 20**). En esta zona está compuesto principalmente por bloques decimétricos y centimétricos de obsidiana verde la mayoría con perlitización en desarrollo y otras más oscuras con esferulitas bandeadas siguiendo la fábrica del vidrio. Están sostenidas en una matriz de pómez de tamaño centimétrico. En este afloramiento resulta difícil describir toda la secuencia litológica debido a que es peligroso por la inestabilidad del talud de la mina, pero se puede apreciar que al DFBC Itztetl la sobreyace una unidad parecida a la lapillita basal pero con una textura más fina en sus fragmentos.

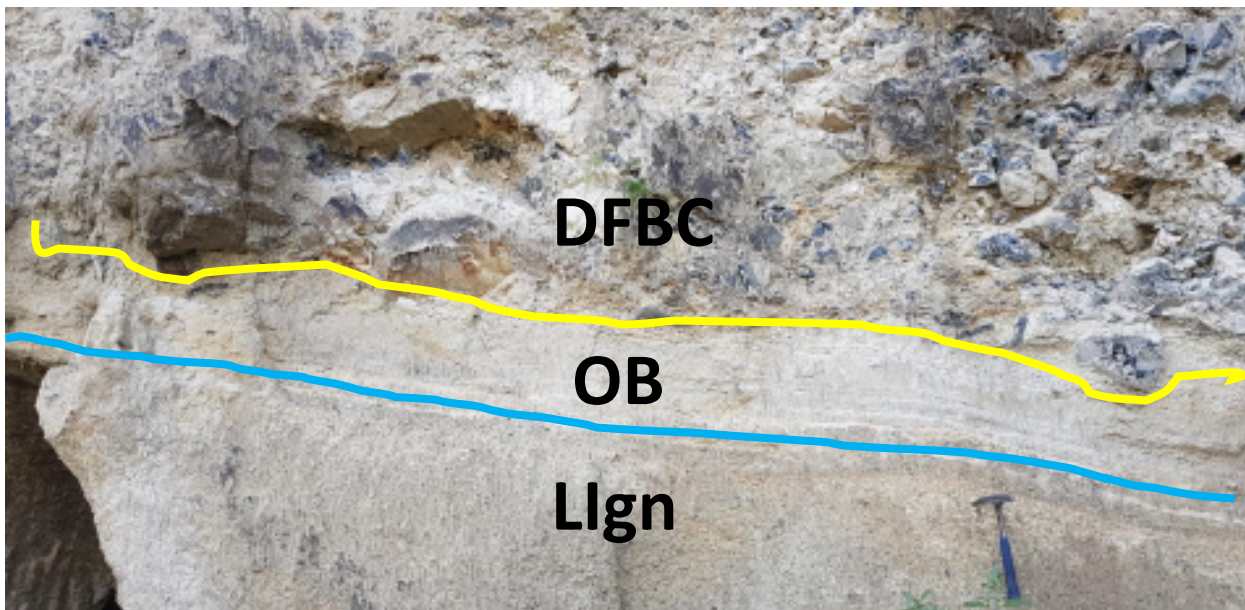


Fig. 20. Talud que muestra la unidad de CPDI. La línea amarilla representa la base del DBCI y la línea azul a la oleada de base o el contacto con el sustrato. DFBCI=Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas Itztetl, OB=Oleada de base y LIgn=Lapillita Ignimbrítica.

Túneles de la Mina de Pómez el Nopalillo

En este paquete volcánico a la base como ya se había comentado, se presenta la unidad Lapillita de pómez ignimbrítica siendo el sustrato de la unidad efusiva suprayacente. Dentro de los túneles se pudo reconocer la orientación de la unidad (180/ 37). En este paquete la lapillita está en contacto con un derrame riolítico fluidal. En la zona de contacto, en la base del derrame se presenta una brecha de avance vítrea completamente contorsionada. Es difícil acercarse al afloramiento ya que es una pared de unos 20 m de alto, pero es posible apreciar una posible perlitización en el vidrio. En el contacto es posible observar una zona de color naranja oxidado y una superficie irregular. Se piensa que el derrame posiblemente al descender por la ladera se emplaza en una superficie topográficamente baja y no consolidada con agua o bastante húmeda, como un paleo arroyo provocando esta oxidación y el desarrollo de estructuras peperíticas (Fig. 21).



Fig. 21 Túnel de la Mina de Pómez, en donde se muestra el contacto o la superficie de derrame.

2.2.6 Mapa Geológico

En el siguiente apartado se presentan dos mapas cartográficos con diferente escala: un mapa geológico regional de Sierra de las Navajas y un mapa cartográfico local de la localidad del Cerro de las Navajas. En conjunto con el trabajo cartográfico realizado en la presente investigación, se hizo una recopilación de los trabajos cartográficos hechos en la región de Sierra de las Navajas (Fig. 22) por Lighthard (2001) y Núñez-Velázquez (2018). Asimismo, gracias a los recorridos hechos en las minas modernas de obsidiana y de pómez se construyó un mapa geológico en superficie, agregando los eventos volcánicos interpretados en subsuelo (Fig. 23). Es importante mencionar que debido al tipo de vegetación se infirieron los límites espaciales de las unidades volcánicas y los eventos asociados a ellas.

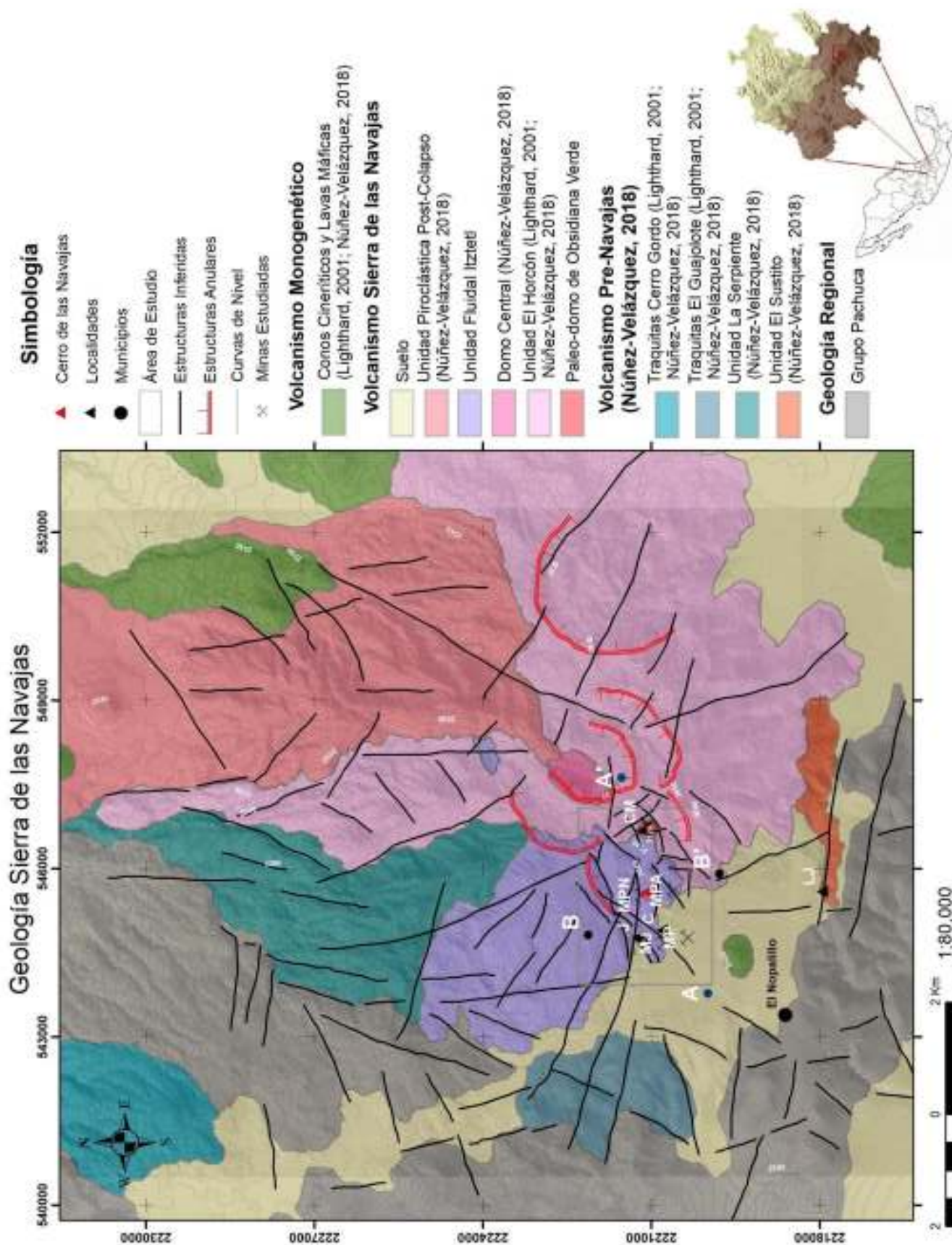


Fig. 22. Mapa cartográfico de Sierra de las Navajas donde se muestra la geología asociada a la Sierra y el sistema de estructuras inferidas en la región.

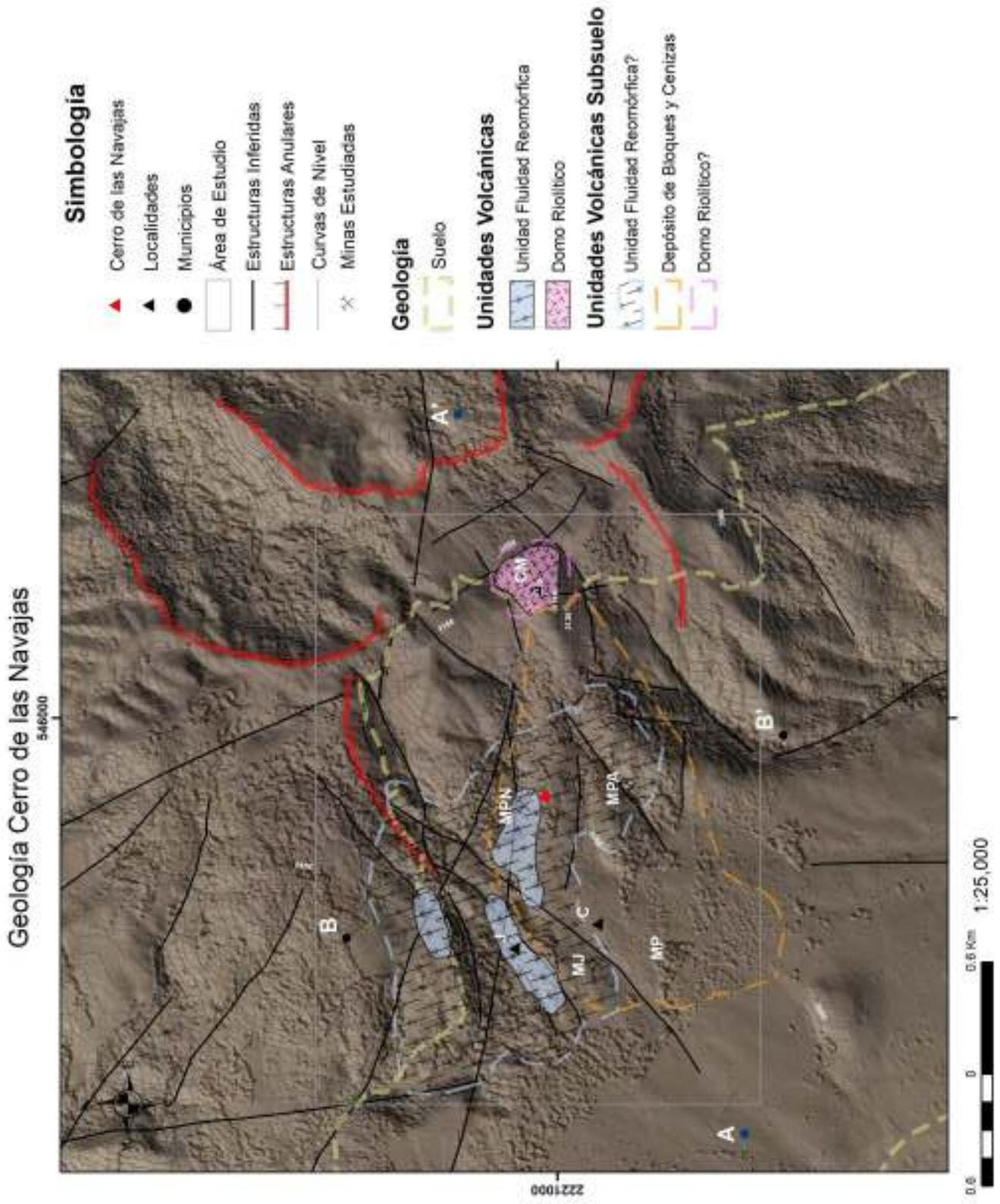


Fig. 23 Mapa geológico local que muestra a la geología del área, la cronología de explotación prehispánica (Pastrana, 2002) y la minería moderna.

2.2.7 Columna Estratigráfica

A partir del trabajo de campo se construyó la columna estratigráfica compuesta del Cerro de las Navajas. Se reconoció que la geología superficial en el Cerro de las Navajas, las canteras de la Mina de Pómez de El Nopalillo y de la Mina de Pómez de Alfajayucan, así como la geología subterránea de las minas modernas de obsidiana se pueden dividir estratigráficamente en por lo menos dos unidades litológicas distintas y cinco eventos volcánicos representativos del flanco SO de la Sierra.

En la columna compuesta (Fig. 24) se observa que la unidad más antigua es la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas, está formada de dos eventos volcánicos distintos. El primero se clasificó como una erupción piroclástica de mecanismo ignimbrítico, de composición riolítica (Ver Evento A en Fig. 24). Este evento es el de mayor espesor (>20 m) y varía en litofacies, pero se compone principalmente de dos rocas distintas: es una Lapillita de pómez con bajo contenido en fragmentos líticos muy poco soldada que representa al sustrato de la columna, a la cual la sobreyace una Toba de lapilli de pómez con las mismas características que la lapillita.

El segundo evento identificado es la inyección y formación de un domo de posible composición riolítica, que lo compone una riolita con alto contenido en litofisas, del que actualmente solo afloran sus raíces de manera subvertical en la localidad de Cruz de Milagro, ubicada en la cima del Cerro de las Navajas.

El tercer evento volcánico es una erupción piroclástica horizontal representada por un mecanismo de Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC), llamada DFBC Itztetl. Este evento es de composición riolítica y se compone de dos litofacies: una toba de oleada de base, seguido de una brecha piroclástica con bloques de obsidiana verde-dorada, perlita y riolita con alto contenido en litofisas, y bloques de pómez.

El cuarto evento divide la segunda unidad llamada Unidad Fluidal Itztetl, identificada a través de sus litofacies manifiesta un ambiente de tipo fluidal, el cual no ha sido posible reconocer su mecanismo de formación volcánica (colada volcánica o Ignimbrita reomórfica). Es importante mencionar que la litofacies vítrea

de este evento es una obsidiana de color negro con fenocristales de sanidino (<15% de cristalinidad).

Finalmente, el quinto evento cubre estratigráficamente a los demás eventos. Está representado por una roca que no fue posible visitar por su ubicación, pero por su disposición y ocurrencia en campo, es posible que sea una unidad piroclástica de caída libre.

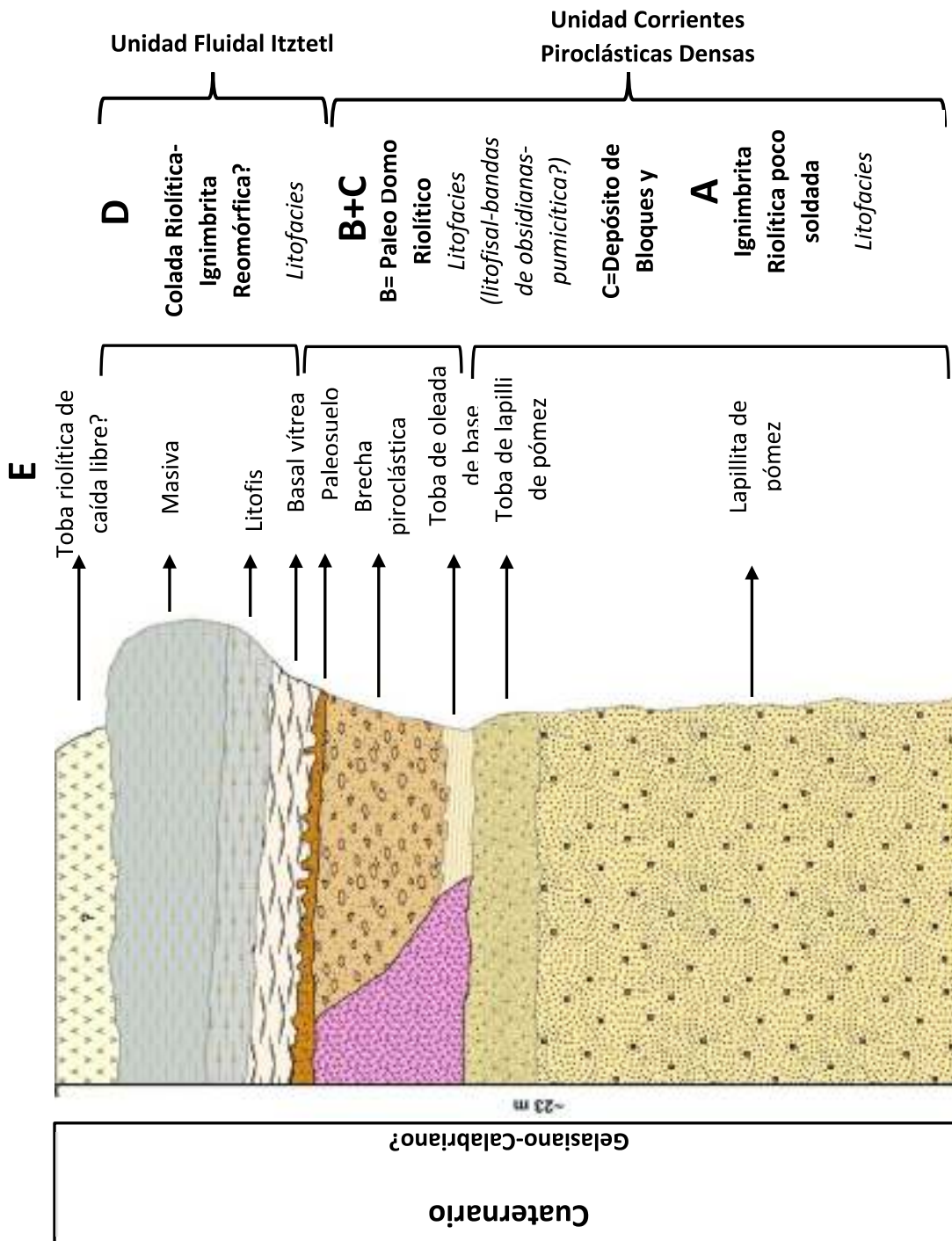


Fig. 24 Columna estratigráfica del Cerro de las Navajas, ubicado en el flanco SO de Sierra de las Navajas.

Las relaciones de corte nos permiten observar la cronología de los eventos volcánicos en la porción SO de la SLN. Es posible decir que en esta zona el evento A representa la base del paleo estratovolcán de Sierra de las Navajas, que es cortado por el evento B, del cual se genera un domo riolítico. Existe una relación espacial entre el evento B y C, del cual aparentemente es un producto piroclástico de una erupción local que sufre el domo riolítico. Estratigráficamente se presenta un paleosuelo que divide el evento C del D. En algunas ocasiones es posible reconocer que el evento D ocurre como un evento que cubre toda esta zona, lo cual dificulta identificar su mecanismo de formación volcánica.

El quinto evento volcánico en Cerro de las Navajas, el evento E, no fue posible asignarle una descripción formal. A pesar de que fue identificado en campo no pudo ser descrito a detalle por la dificultad y el peligro en la exposición de sus afloramientos.

A la columna estratigráfica compuesta de Cerro de las Navajas se le asignó una edad del Galasiano-Calabriano. Las relaciones de cortes geológicos ubicadas en esta localidad permiten ubicar estratigráficamente en dicha edad gracias al fechamiento de las unidades volcánicas identificadas por [Lighthard \(2001\)](#) y [Núñez-Velázquez \(2018\)](#).

2.2.8 Secciones

La cartografía realizada en el Cerro de las Navajas y los datos estructurales tomados durante en el trabajo de campo permitieron generar secciones que ayudaran a interpretar el comportamiento estructural de la Sierra. Se tomaron en cuenta las principales variaciones litológicas y estructurales observadas en el mapa del Cerro de las Navajas ([Fig. 23](#)). Se construyeron dos secciones (A-A' y B-B'), con el objetivo de mostrar la interpretación del yacimiento de obsidiana. Su distribución entre ellas es casi perpendicular y muestran diferentes zonas de la Sierra.

La sección A-A' es la que recorre una mayor distancia en el mapa. Su orientación es SO-NE y muestra un corte longitudinal del yacimiento ([Fig. 25](#)). La importancia de esta sección destaca en que se puede observar la distribución del yacimiento de obsidiana representado como el Depósito de Flujo de Bloques y

Cenizas Itztetl, asociado directamente como un producto piroclástico de la unidad del Domo Riolítico.

En la sección es posible reconocer el echado de las unidades piroclásticas de tipo ignimbríticas, junto con el Depósito de Bloques y Cenizas Itztetl, buzando hacia el NE. En sentido estricto, este buzamiento no puede ser posible debido al proceso de sedimentación que caracteriza a estos fenómenos volcánicos explosivos. En lado NE de la sección se presentan dos fallas de tipo normal donde su buzamiento es oblicuo entre ellas. Se interpreta que el movimiento de estas fallas ha llevado a su posición actual a las unidades piroclásticas de esta porción de la Sierra. En la Figura 23, es posible observar las estructuras inferidas para la zona del complejo volcánico de Sierra de las Navajas. Las líneas discontinuas de color rojo de mayor grosor muestran las posibles estructuras regionales y las de menor grosor las estructuras de reajuste del edificio volcánico.

La sección B-B' es la que presenta una menor distancia en el mapa. Su orientación es NW-SE y muestra un corte transversal del yacimiento. Por lo mismo es posible observar la distribución lateral inferida del yacimiento (Fig. 26). En esta zona no existe una capa de suelo y paleosuelo de espesor importante que cubra a las unidades volcánicas. No fue posible encontrar el contacto inferior de la Unidad Piroclástica Ignimbrítica.

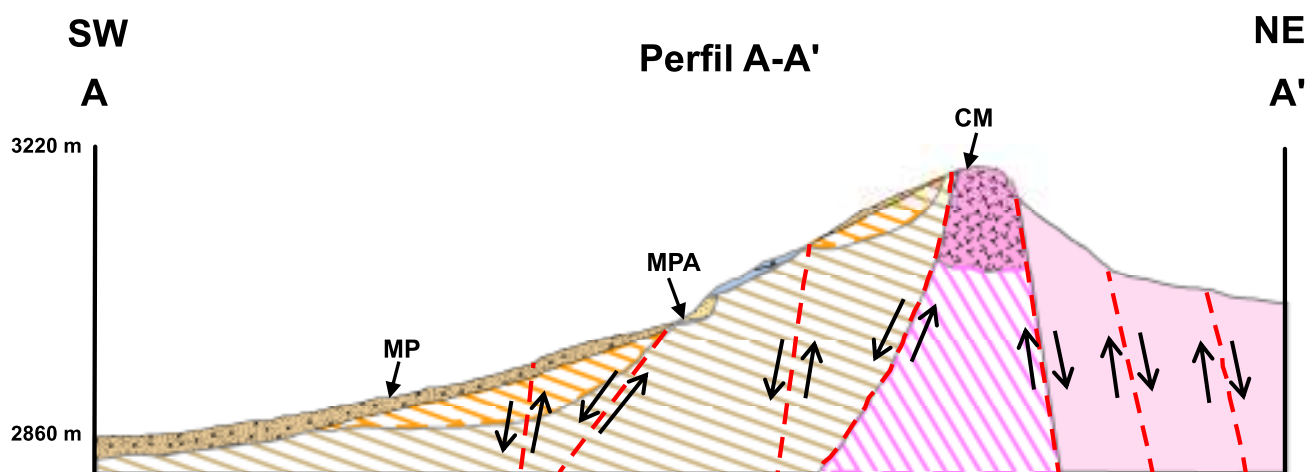


Fig. 25 . Perfil geológico A-A' del flanco SO del paleovolcán de Sierra de Las Navajas. MP = Mina de Pedro, MPA = Mina de Pómez de Alfajayucan, CM = Cruz de Milagro. Las flechas de color negro indican el sentido del movimiento de las fallas inferidas.

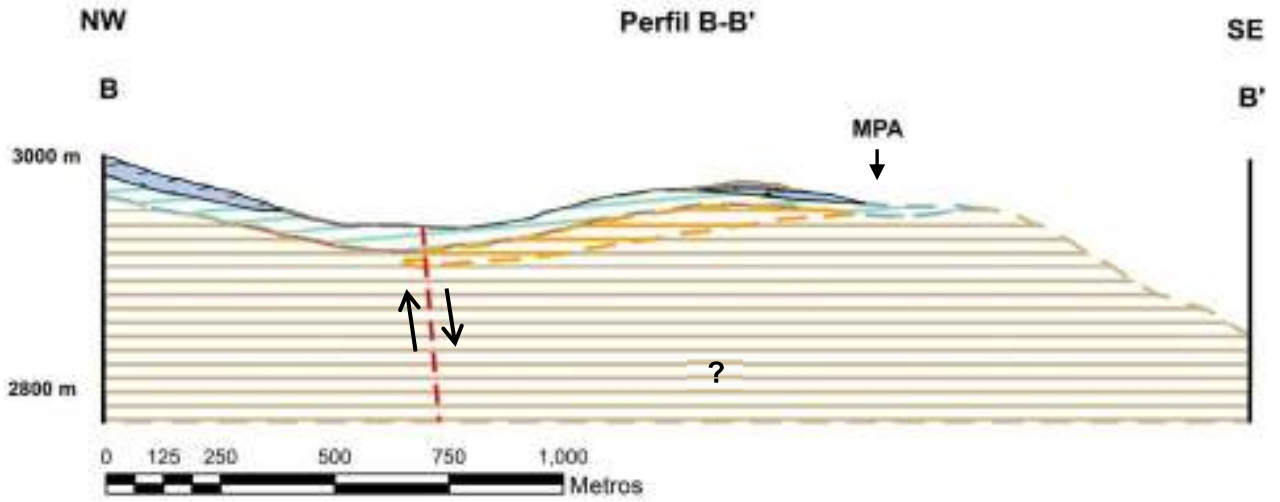


Fig. 26. Perfil geológico B-B' del flanco SO del paleovolcán de Sierra de Las Navajas. MPA = Mina de Pómez de Alfajayucan. Las flechas de color negro indican el sentido del movimiento de las fallas inferidas.

Simbología

- Estructuras inferidas
- Suelo
- Unidad Fluidal Reomórfica
- Paleosuelo
- Unidad El Horcón
- Depósito de bloques y Cenizas Itzteti?
- Domo Riolítico
- Domo Riolítico?
- Unidad Piroclástica Ignimbrítica Itzteti
- Unidad Piroclástica Ignimbrítica Itzteti?

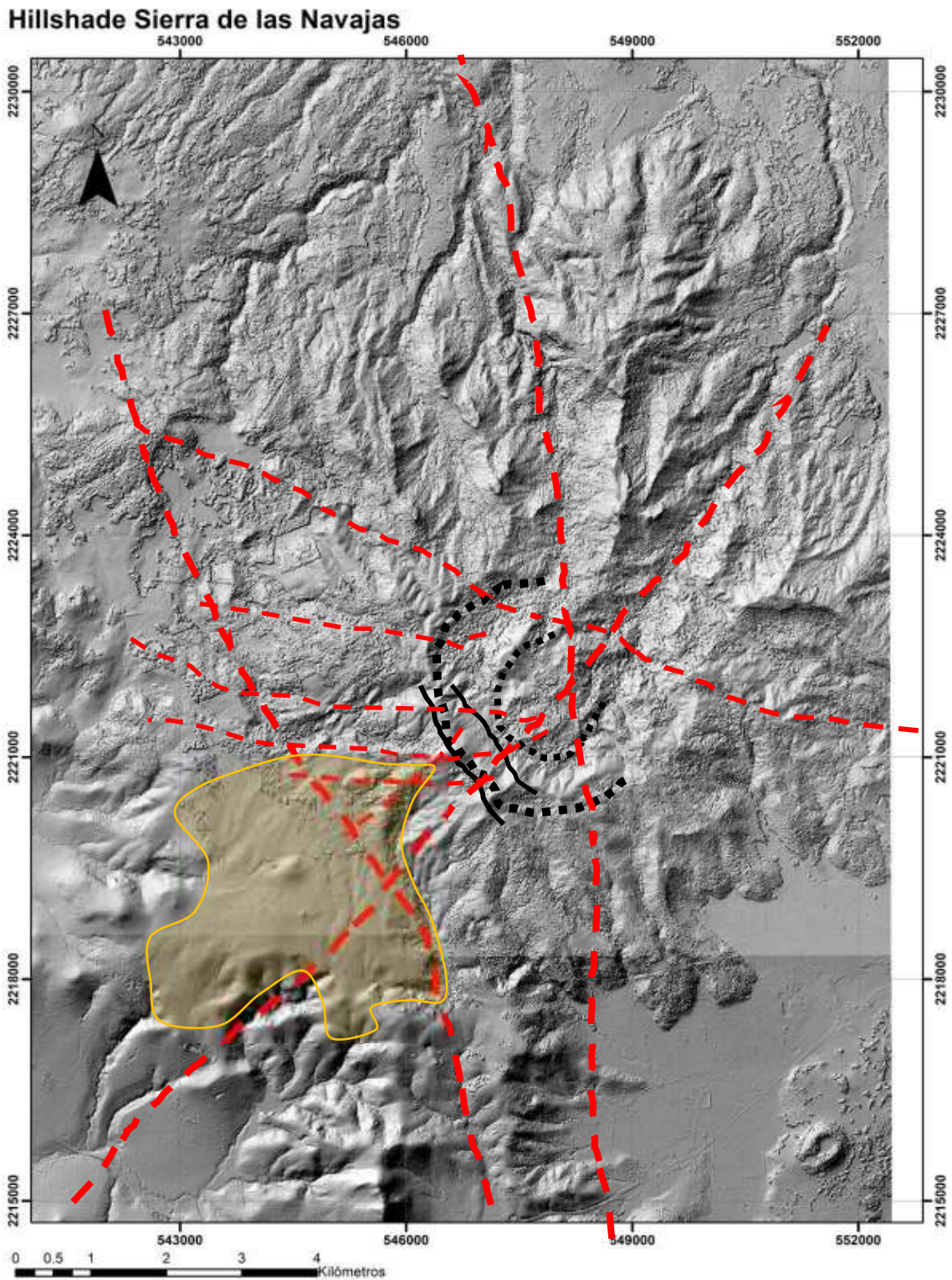


Fig. 27 Mapa de elevación de la Sierra de las Navajas, donde las líneas discontinuas de color rojo se infieren estructuras regionales y locales que controlan el dominio estructural de la Sierra. Las líneas punteadas de color negro exhiben los anillos principales del paleo aparato volcánico. Las líneas de color negro representan las estructuras asociadas al proceso de reajuste del aparato volcánico, que controlan estructuralmente la unidad del Domo Riolítico. El polígono de color naranja indica la distribución subterránea del Evento C interpretada a partir de los rasgos geomorfológicos observados en el modelo de elevación de Sierra de las Navajas.

3. Petrología

El presente capítulo hace referencia al carácter petrológico del estudio con el fin de cumplir uno de los objetivos específicos de esta investigación. El interés de incluir esta disciplina geológica es obtener una visión distinta a los métodos tradicionales de caracterización de obsidiana. Asimismo, explicar la ocurrencia de los yacimientos de obsidiana en Sierra de las Navajas y la procedencia de los artefactos arqueológicos de este yacimiento.

3.1 Caracterización de la obsidiana y las rocas asociadas

Para la caracterización del yacimiento de obsidiana del Cerro de las Navajas se analizaron todos los elementos rocosos asociados al proceso de formación del yacimiento. La identificación petrológica de las unidades litológicas consistió en el estudio de Petrografía al microscopio polarizante, Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X, respetando la petro-fábrica original de las muestras. Como resultado se obtuvo la identidad estructural-textural, mineralógica y geoquímica de los vestigios volcánicos en esta porción de la Sierra de las Navajas.

En una muestra de roca volcánica es importante considerar que los componentes físicos y químicos se encuentran distribuidos de acuerdo con un arreglo en el espacio (fábrica), por lo que reconocer una superficie de análisis en función de la dirección de flujo permite obtener características espaciales que pueden mostrar variaciones sustanciales. Es importante saber que las estructuras primarias de flujo en la roca volcánica, van a tener diferente representación según el corte de la roca observado, por lo que en los diferentes estudios analíticos realizados en este trabajo, se partió de una determinación de la petro-fábrica de cada muestra y la selección de la superficie correcta para en ella realizar los diversos análisis, que permitieran tener un control espacial de los datos obtenidos ([Ver Anexo 1](#)).

3.1.1 Petrografía

El análisis petrográfico se llevó a cabo en un microscopio petrográfico Leica, con objetivos de 4x, 10x y 40x. En el trabajo de campo se muestrearon 5 sitios que presentan una relación estratigráfica única del Cerro de las Navajas (**Véase Columna Estratigráfica**). Tres de ellos son las minas modernas: Mina de Pómez el Nopalillo, Mina de Alfajayucan y Mina de “Javier”, los otros dos sitios corresponden a Cruz de Milagro y El Jariyal. El objetivo del análisis consistió en caracterizar los eventos volcánicos identificados en las unidades rocosas (**ver Fig. 23**) y encontrar su asociación mineralógico-textural en eventos volcánicos únicos por medio de rasgos petrográficos comunes entre ellas.

Evento A

Según la estratigrafía compuesta de Cerro de las Navajas, el evento A es el más antiguo. En él se analizaron petrográficamente lapilli de pómez, marekanitas y fragmentos líticos de la litofacies más antigua (Lapillita de Pómez ligeramente lítica). Se analizaron los piroclastos juveniles de pómez del tamaño de lapillis de pómez en cortes tipo PePa, que presentan una asociación mineralógica en fenocristales de Feldespato Alcalino (FA) + Plagioclasa (Plg) + Ox de Fe-Ti—en este orden decreciente de abundancia—y microfenocristales de Aegirina (Aeg) + Fayalita (Fay) representativos de un magma anhidro y rico en Fe, típico de una afinidad hiperalcalina.

Se consideró oportuno analizar a la variedad de bloques líticos que se presentan en la roca para obtener información de los eventos anteriores a la erupción explosiva. Los fragmentos líticos se identificaron como a) rocas volcánicas que presentan una asociación mineralógica de fenocristales de FA + Biotita (Bio) y microfenocristales de FA, contenidos en una matriz equigranular de Cuarzo (Qz) y microcristales de Aegirina (Aeg), y b) una roca brechada con líticos de rocas volcánicas de textura traquítica. En otros líticos se observó una riolita vítrea microcristalina de textura fluidal, compuesta por varias facies con obsidiana y perlita. En esta litofacies de Lapillita de Pómez, existe la ocurrencia de marekanitas (menores a 3 cm, en forma de lágrimas de apache) de color verde como núcleos

subredondeados, dentro de los líticos con facies perlíticas, los cuales se presentan de manera escasa (Fig. 28 A y B). Los cortes orientados en estas obsidianas mostraron una fábrica moderadamente evidente con presencia de diminutas litofisas (Fig. 29 A). Petrográficamente, en los cortes de esas marekanitas se observan una gran cantidad de minerales de Sanidina, orientados que definen su paleo-dirección de flujo, destacando su origen lávico. Así, es posible decir que es un sólido hipocristalino donde la fábrica está representada por una abundante presencia de cristales de Sanidina (San) y plagioclasa? (Fig. 29 C), junto con la ocurrencia de aglomeraciones de inclusiones fluidas esféricas, que conforman a las litofisas observadas (Fig. 29 D), sin mostrar ningún tipo de alteración.

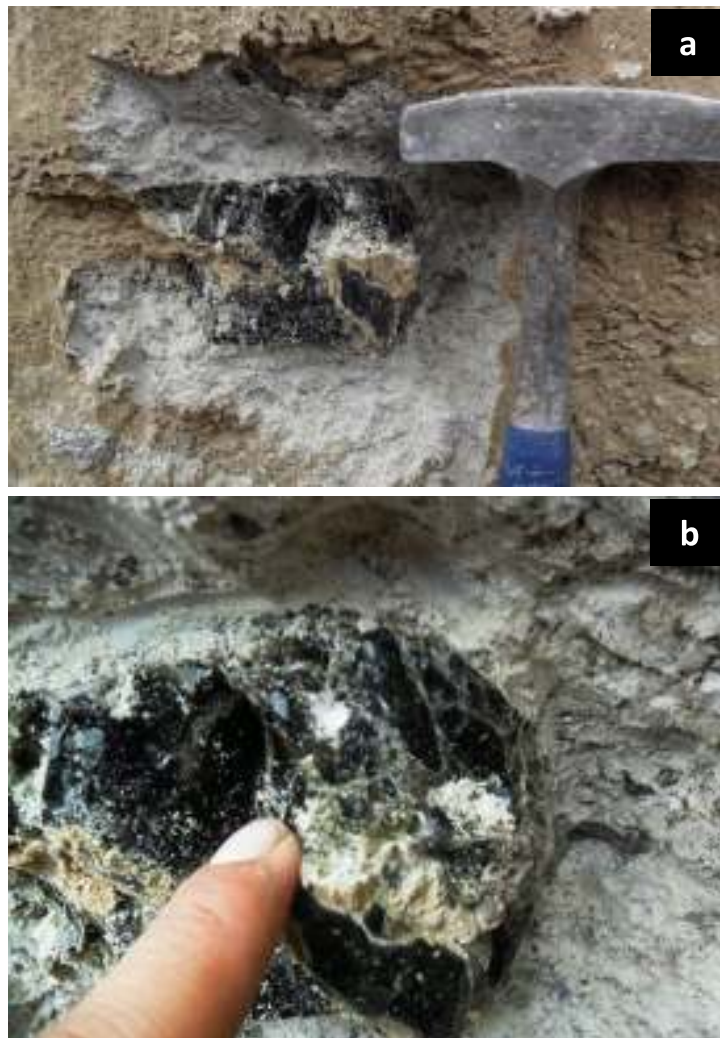


Fig. 28. Fotografías de la ocurrencia en campo de las Marekanitas del evento A. En a = Lítico en tamaño de bloque de compuesto de marekanitas y en b = Detalle de las marekanitas en el lítico del evento A.

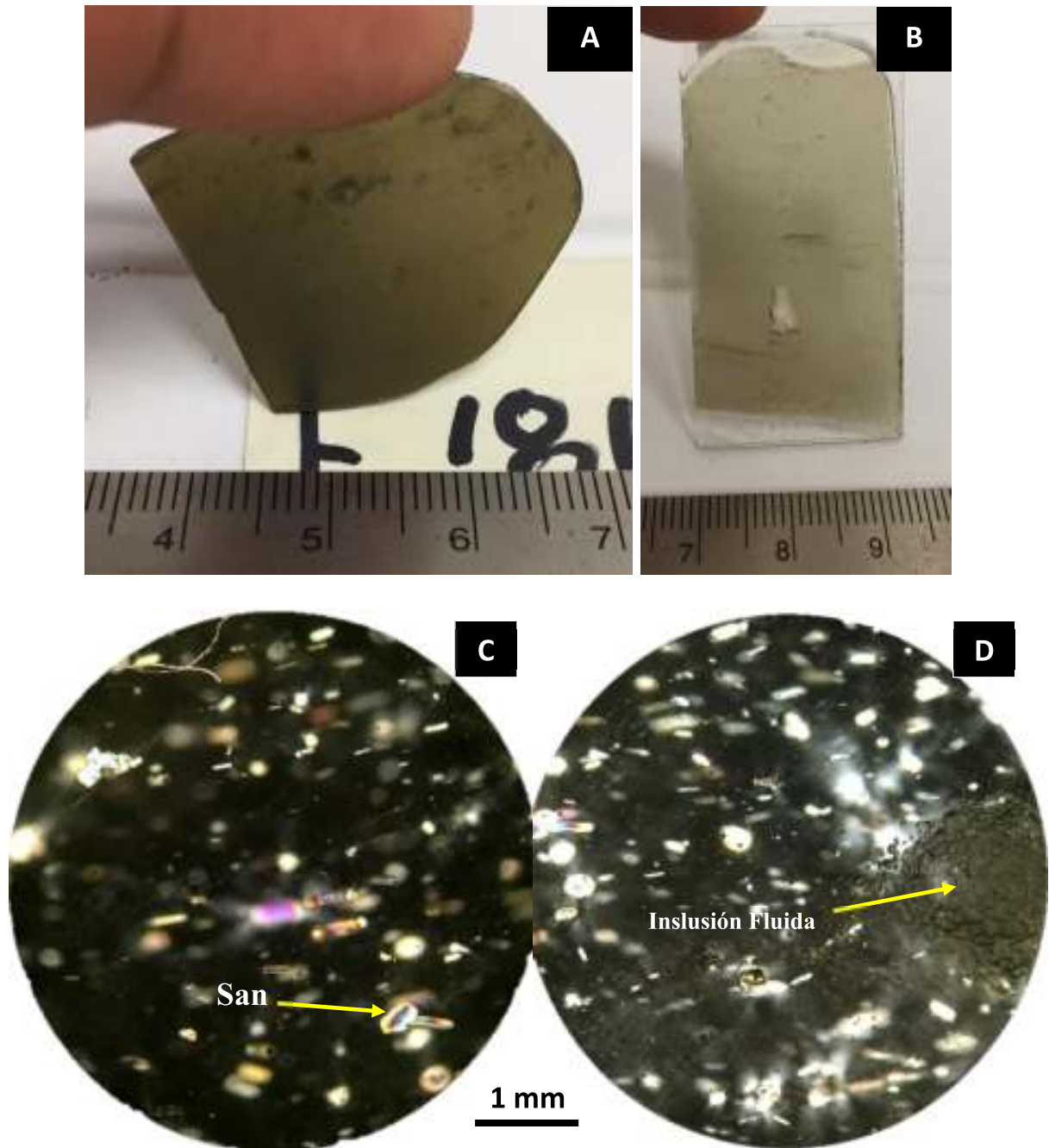


Fig. 29. Fotografías de los cortes tipo PePa de las muestras de marekanitas. A = Marekanita con litofisas, B = Marekanita pura, C y D = Aspecto petrográfico de la fotografía A. En C y D es posible observar la gran cantidad de cristales de San y Plg? con una orientación según la paleo dirección de flujo. En D se observa una inclusión fluida orientada según la paleo dirección de flujo.

Tabla 1. Condensado del análisis petrográfico y las principales variedades de las muestras representativas del Evento A pertenecientes a la litofacies Lapillita de Pómez de la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas ubicada en la localidad de Mina de Pómez de Alfajayucan.

Descripción Muestra	Clave Muestra	Corte	Asociación Mineralógica (Fenocristas , Microfenocristales y matriz)	Texturas	Alteración
Pómez Lapilli	SLN-1815 D	PePa	Feno- FA + Plg Micro- FA + Plg + Aeg + Fay	Pumicítica	Oxidación
Fragmento de Brecha Riolítica	SLN-1815 C1	PePa	Feno- FA + Bio Micro- FA	Fluidal y Litofizal	No
Fragmento de Brecha Riolítica	SLN-1815 C2	PePa	Feno- FA Micro- FA + Aeg + Bio + OxFe-Ti	Brechoide-Litofizal	No
Marekanita	SLN 1810	PePa	Micro- FA + Plg	Microporfírica	No

Evento B

La unidad del Paleo-domo riolítico de Cruz de Milagro, está representada por tres litofacies: a) *Riolita Litofisal*, b) *Riolita Pumicítica?*, y c) *Riolita litofisal con bandas de obsidiana*. Las litofacies a) En la roca, que representa este evento bajo el microscopio, se observa una asociación mineralógica de fenocristales Aeg + Qz + Óxidos de Fe-Ti (Ox Fe-Ti) —en ese orden de abundancia— microfenocristales Aeg + Anfíbol (Anf, Hornblenda?) + Qz + Fayalita (Fay), con una matriz de microcristales de cuarzo con cristales y fayalita?. Los fenocristales no son abundantes, pero los microfenocristales aparecen con una mayor regularidad. La matriz presenta una cristalización tardía de cuarzo y fayalita, la cual en algunas zonas desarrolla una textura equigranular, granofírica y microgranofírica, reconociendo en la matriz, zonas con presencia de triquitas. Esta litofacies exhibe un alto contenido de esferulitas principalmente de tipo esféricas y axiolíticas (Fig. 30 B y C) que indican bajas temperaturas (<400° C).

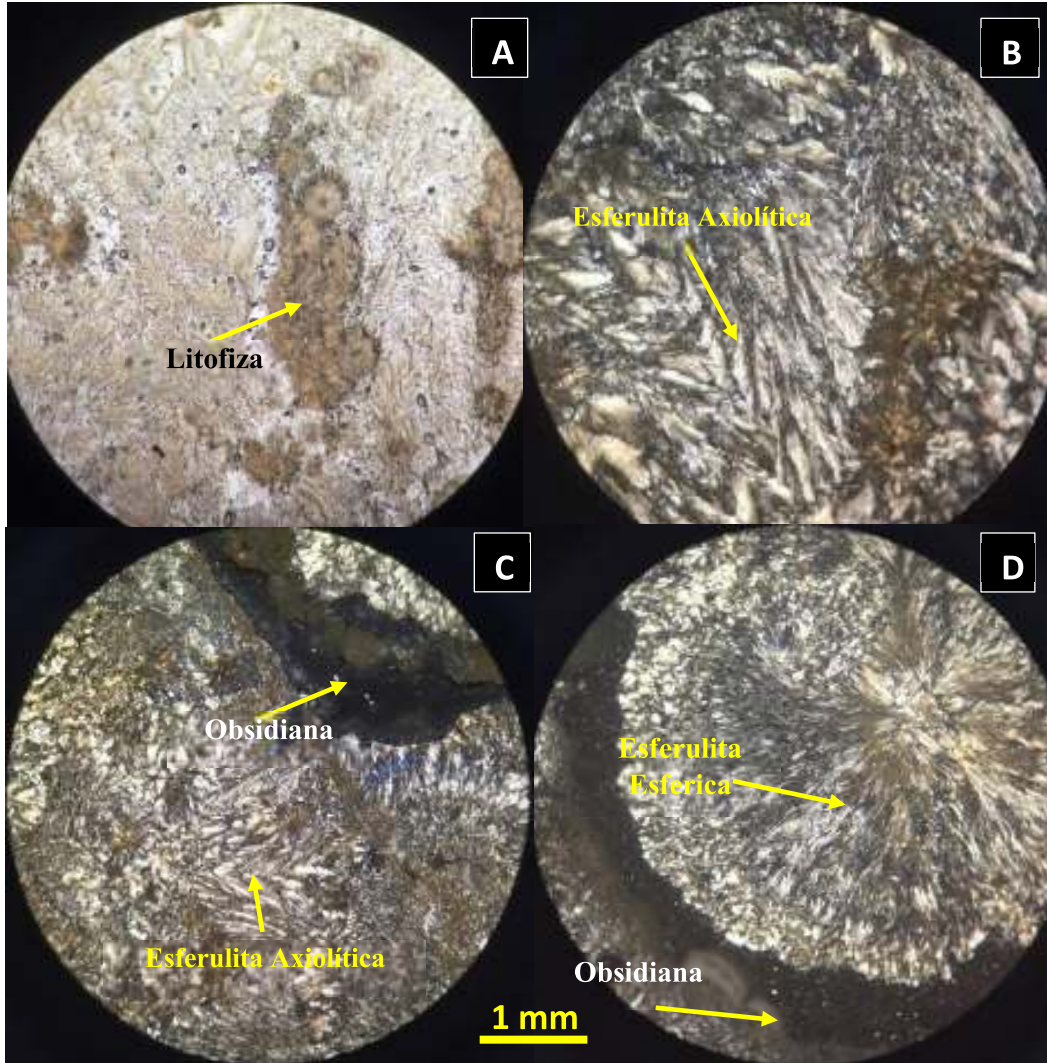


Fig. 30. Fotomicrografías con cortes tipo PePa de las rocas representativas del evento B. A = Luz polarizada que muestra una zona litofizal, B = Luz analizada se muestra la textura plumosa, C = Textura plumosa en contacto con una zona de obsidiana, y D = Esferulita en contacto con obsidiana.

Por su asociación mineralógica, la roca es de composición riolítica. En la litofacies b) el análisis petrográfico permitió identificar una descripción similar a la litofacies a), no obstante, la textura de tipo pumicítica?, puede solo representar un estado de alteración argílica, en desarrollo de una matriz con litofacies litofizal, debido a que no se observaron texturas que indicaran un contenido de pómez. Por otro lado, en las litofacies c) los niveles rocosos presentan la misma descripción que

la litofacies “a)”, a diferencia que en ella destaca una matriz regularmente holocristalina con zonas de vidrio (obsidiana), que ocurren en forma de bandas (Fig. 30 C y D).

Tabla 2. Condensado del análisis petrográfico y las principales variedades de las muestras representativas del Evento B, pertenecientes a la Unidad de Paleo Domo Riolítico ubicada en la localidad de Cruz de Milagro.

Descripción Muestra	Litofacies	Clave Muestra	Corte	Asociación Mineralógica (Fenocristas , Microfenocristales y matriz)	Texturas	Alteración
Lítico	Riolita Litofisal Pumicítica?	SLN-1814	PePa	Feno- Aegirina (Aeg) + Cuarzo (Qz) + Ox Fe-Ti . Micro- Aeg + Anfíbol (Anf) + Qz + Fayalita (Fay)	Esferulítica	Argílica
Lítico	Riolita Litofisal	SLN-1902	PePa	Micro- Aeg	Plumosa, Litofisal y Esferulítica	Oxidación
Lítico y obsidiana	Riolita Litofisal con bandas de obsidiana	SLN-1902-2	PePa	Micro- Aeg Matriz- Sanidino (San) + Fay + Aeg	Plumosa, Litofisal y Esferulítica	Oxidación
Lítico	Riolita Litofisal Pumicítica?	SLN-1903	PePa	Feno- Qz ± Aeg Micro- Aeg + Qz Matriz- Qz + Aeg + Triquitas	Litofisal	Argílica

Evento C

Este evento, representa el yacimiento de obsidiana de verde-dorada de Cerro de las Navajas. A excepción de su discreta ocurrencia como afloramiento en Cruz de Milagro, esta unidad volcánica solo se pudo observar ampliamente en las minas de pómez y las minas modernas de obsidiana. Está representado por la unidad de Flujo de Bloques y Cenizas, de la cual solo se analizó petrográficamente los elementos que componen a la roca de la litofacies de brecha piroclástica con riolita litofisal y bloques de obsidiana: a) la matriz y, b) los líticos de obsidiana.

a) Ocurre una roca hipocristalina litofisal brechada, donde los fenocristales están ausentes en la roca (Fig. 31 A y B), en las zonas correspondientes a la matriz microcristalina se desarrollan microfenocristales de Aeg?. Estos cristales ocurren con un menor tamaño en los fragmentos brechados. En la matriz y en los bordes de los fragmentos se pueden observar una oxidación en desarrollo. Los líticos

brechoides de riolita, presentan en los bordes por texturas esferulítica de tipo axiolítica (Fig. 31 D) producto de la desvitrificación.

b) Se trabajaron un total de 10 muestras de líticos, presentes como bloques de obsidiana (verde-oscuro y verde-dorada). A las muestras se les hizo cortes orientados PePa (Fig. 32, y véase Anexo 1) para caracterizar petrográficamente al vidrio. Se han reconocido características en la muestra de mano, y petrográficas, comunes entre algunas muestras de obsidiana que, por ejemplo, permiten categorizar las muestras de obsidiana según sus estructuras de flujo, variando de muy evidente a evidente (Fig. 33).

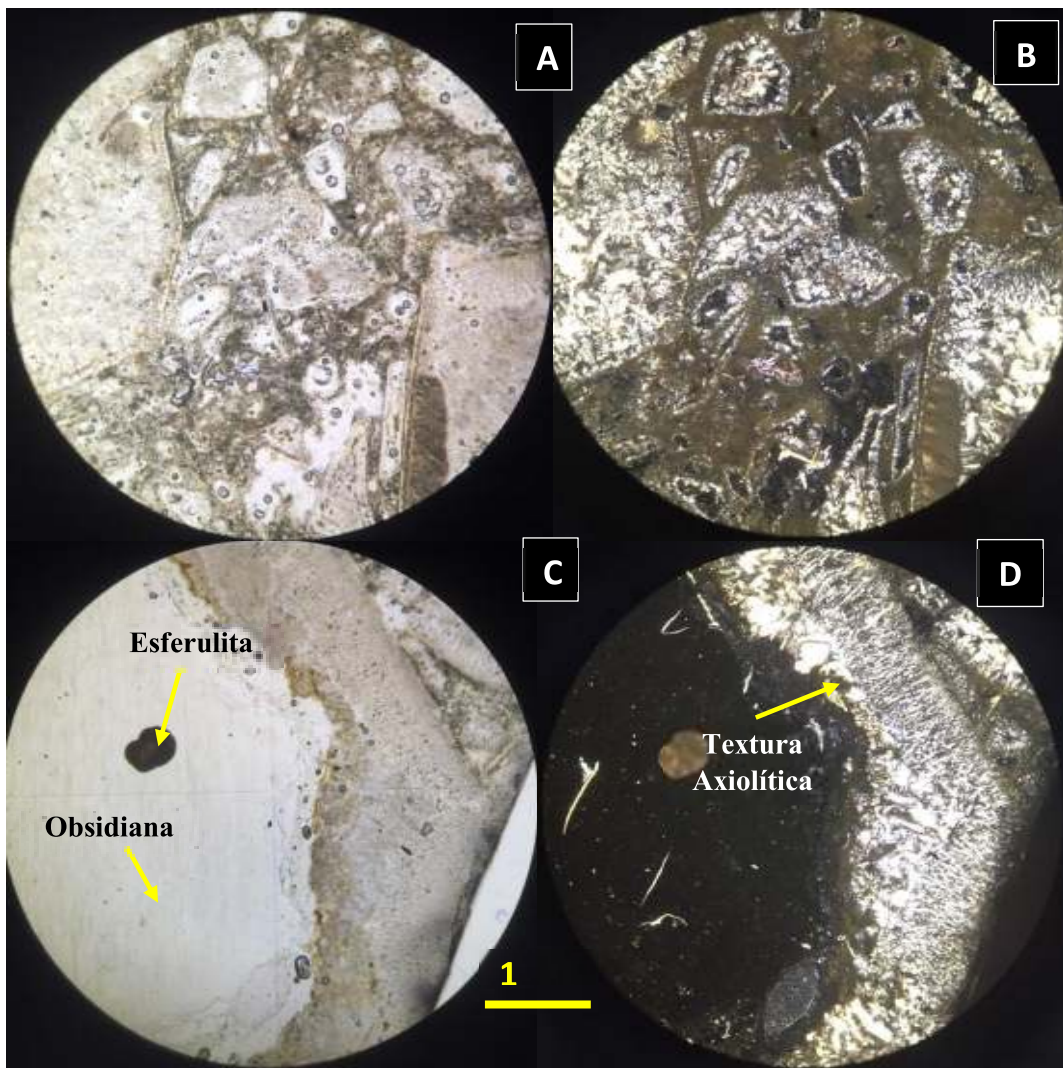


Fig. 31. Fotomicrografías con cortes tipo PePa de las rocas representativas del evento C. A y B en luz polarizada (A) y luz analizada (B) muestran el aspecto anguloso de los fragmentos brechoides. C y D = muestran un lítico de obsidiana rodeado por una cristalización de esferulitas axiolíticas dentro del depósito piroclástico.

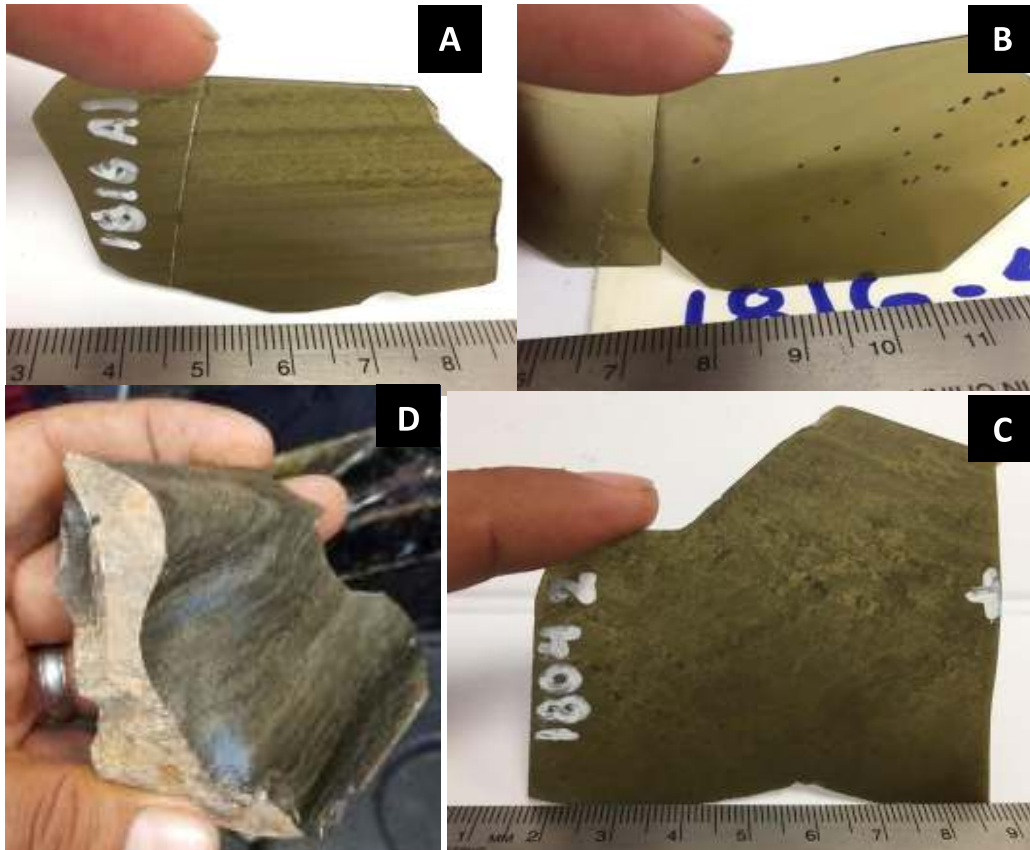


Fig. 32. Fotografías de los cortes que muestran los diferentes tipos de obsidiana verde según sus características de evidencia en el flujo. **A=** Flujo evidente (obsidiana verde-oscuro) , **B =** Poco evidente (obsidiana verde-oscuro), **C=** Moderadamente evidente (obsidiana verde-dorada) y **D =** Muestra de mano de una obsidiana verde-dorada.

Petrográficamente la obsidiana es un sólido hialocristalino, que varía dependiendo del tipo de obsidiana. La obsidiana verde-oscuro se caracteriza por ser vítrea, afanítica, con la presencia muy escasa o nula de fenocristales o microfenocristales. Por otro lado, la obsidiana verde-dorada, que presenta una ausencia fenocristales y microfenocristales, se caracteriza por la gran abundancia de inclusiones fluidas menores a 150 micras, orientadas según el flujo, angulosas y en ocasiones decrepitadas (Fig. 34 A y B). La fábrica en las obsidianas se deduce gracias al arreglo de las inclusiones fluidas y las litofisas. En ocasiones la obsidiana verde-oscuro presenta una textura fluidal, que por al intemperismo desarrolla un mínimo grado de alteración, observándose una tonalidad amarillenta.

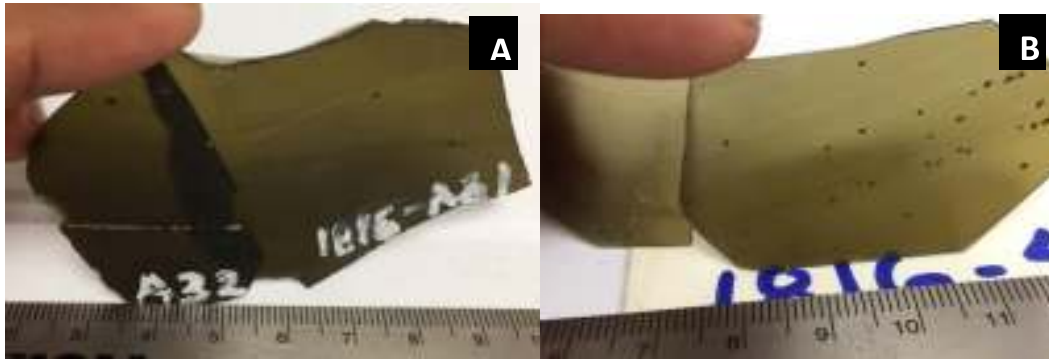


Fig. 33. Fotografías que muestran qué tan evidente es la fábrica en muestras de obsidiana verde-oscura. A = poco evidente y B = muy evidente.

La obsidiana verde-dorada muestra un flujo evidente, con un arreglo de partículas que aparentemente hacen lucir difusa la fábrica (Fig. 32 C). Petrográficamente, su fábrica presenta una orientación preferencial de su gran contenido de inclusiones fluidas angulosas, en los que se determinó petrográficamente su contenido por una facie solida. Por ejemplo, se experimentó adaptando una luz dirigida al microscopio petrográfico. Se montó una lámpara dirigiendo la luz hacia el corte de la obsidiana verde-dorada, y se pudo observar que las inclusiones reflejan la luz (Fig. 34 C). La cantidad de inclusiones fluidas que reflejan la luz depende del ángulo de incidencia, puesto que si se acerca a los 90° , la gran mayoría de inclusiones reflejan la luz, pero si se acerca a los 0° , la gran mayoría no reflejan.

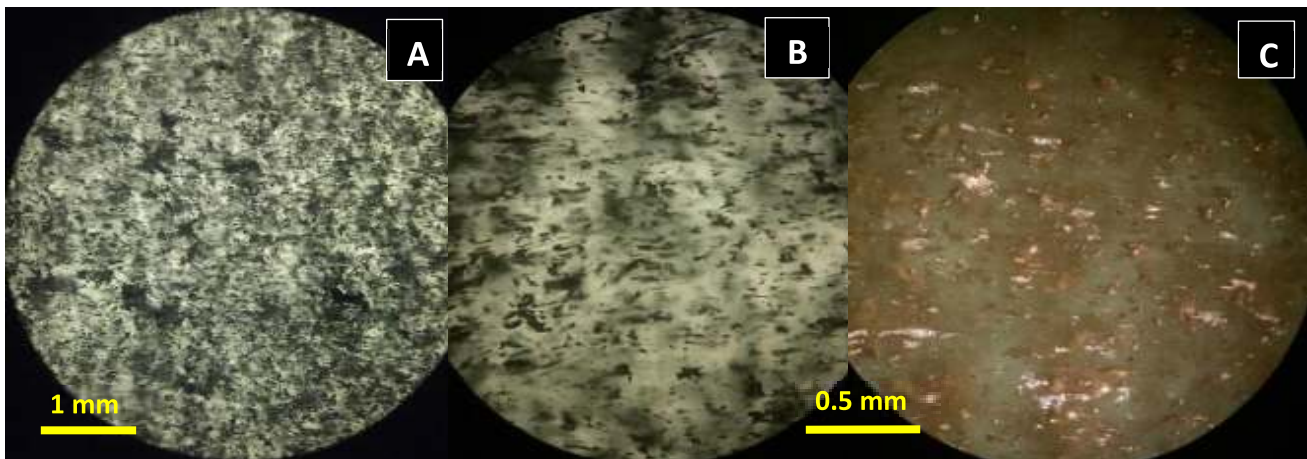


Fig. 34. Fotomicrografías de cortes tipo PePa de una obsidiana dorada del evento C. A = En luz analizada se observa el alto contenido de inclusiones fluidas angulosas que dominan la obsidiana dorada. B y C = En luz analizada se observa con un objetivo de mayor aumento (10x), la ocurrencia de las inclusiones. Asimismo, en C se presenta el fenómeno óptico que produce el efecto de iridiscencia.

Tabla 3. Condensado del análisis petrográfico y las principales variaciones de las muestras representativas del Evento C.

Descripción Muestra	Litofacies	Clave Muestra	Localidad	Corte	Asociación Mineralógica (Fenocristras, Microfenocristales y matriz)	Texturas	Alteración
Lítico	Brecha Piroclástica	SLN-1904	Cruz de Milagro	PePa	Matriz- Aeg	Plumosa y Esferulítica	Oxidación
Obsidiana verde	Brecha Piroclástica	SLN-1904 A	Cruz de Milagro	PePa	No visible	Flujo	No
Obsidiana verde	Brecha Piroclástica	SLN 1816-A1	Mina de Pomez el Nopalillo	PePa	No visible	Inclusiones fluidas angulosas	No
Obsidiana verde	Brecha Piroclástica	SLN 1816-A3	Mina de Pomez el Nopalillo	PePa	No visible	Litofisas	No
Bloques de Pómez	Lapillita de pomez ligeramente lítica	SLN-1816 B	Mina de Pómez de El Nopalillo	PePa	Micro- FA + Plg + Ox Fe-Ti + Aeg + Fay	Pumicítica	Oxidación
Obsidiana verde-dorada	Brecha Piroclástica	SLN 1804-1	Mina de Javier	PePa	No visible	Inclusiones fluidas angulosas	No

Evento D

La presente unidad se analizó petrográficamente en sus tres litofacies: *a) masiva fluidal*, *b) litofisal* y *c) base vítrea*. La litofacies, *a) masiva fluidal*, muestra una roca bandeada hipocristalina con una asociación mineralógica de fenocristales Sanidina (San) + Aegirina (Aeg) + Anf (Hbl?) + Cuarzo (Qz) + Ox Fe-Ti —en ese orden de abundancia—, con micro Fenocristales que varían 100 a 200 μm de San + Aeg + Hbl + Ox Fe-Ti + Qz, contenidos en una matriz equigranular de feldespato alcalino (FA) entre cruzado y cuarzo. La matriz se observa microcristalina con zonas de vidrio y un alto contenido de triquitas orientadas según el flujo de la roca, donde en ocasiones es posible reconocer una desvitrificación y una oxidación sobre las bandas de flujo. Se observan microestructuras de cizallamiento dúctil producido por la dinámica de la viscosidad del flujo, en donde el grado de cristalinidad, como los glómeros de San y los fenocristales de San, producen contorsiones en las estructuras de flujo.

En la litofacies, *b) litofisal*, se observa una roca hipocristalina de textura porfídica, litofisal y fluidal. Presenta un bajo contenido de fenocristales de San euhedrales, subredondeados, y una ausencia de microfenocristales. La textura litofisal de la roca no permite reconocer la textura de la matriz, ni su asociación

mineralógica. Al igual que la litofacies a), en la matriz se identificaron zonas de vidrio con un alto contenido de triquitas.

La litofacies, de c) *base vítrea*, está definida por una obsidiana negra con fenocristales de San + Aeg (Fig. 35 A y B), y una perlita negra con un alto desarrollo de perlitización. La obsidiana negra presenta fenocristales de San <5 mm, se encuentran subredondeados y orientados según la paleo dirección de flujo.



Fig. 35. En A se muestra una fotografía de la obsidiana negra perteneciente a la litofacies de base vítrea del evento D. En B se muestra una fotografía del corte tipo PePa de la obsidiana negra del evento D para el análisis petrográfico.

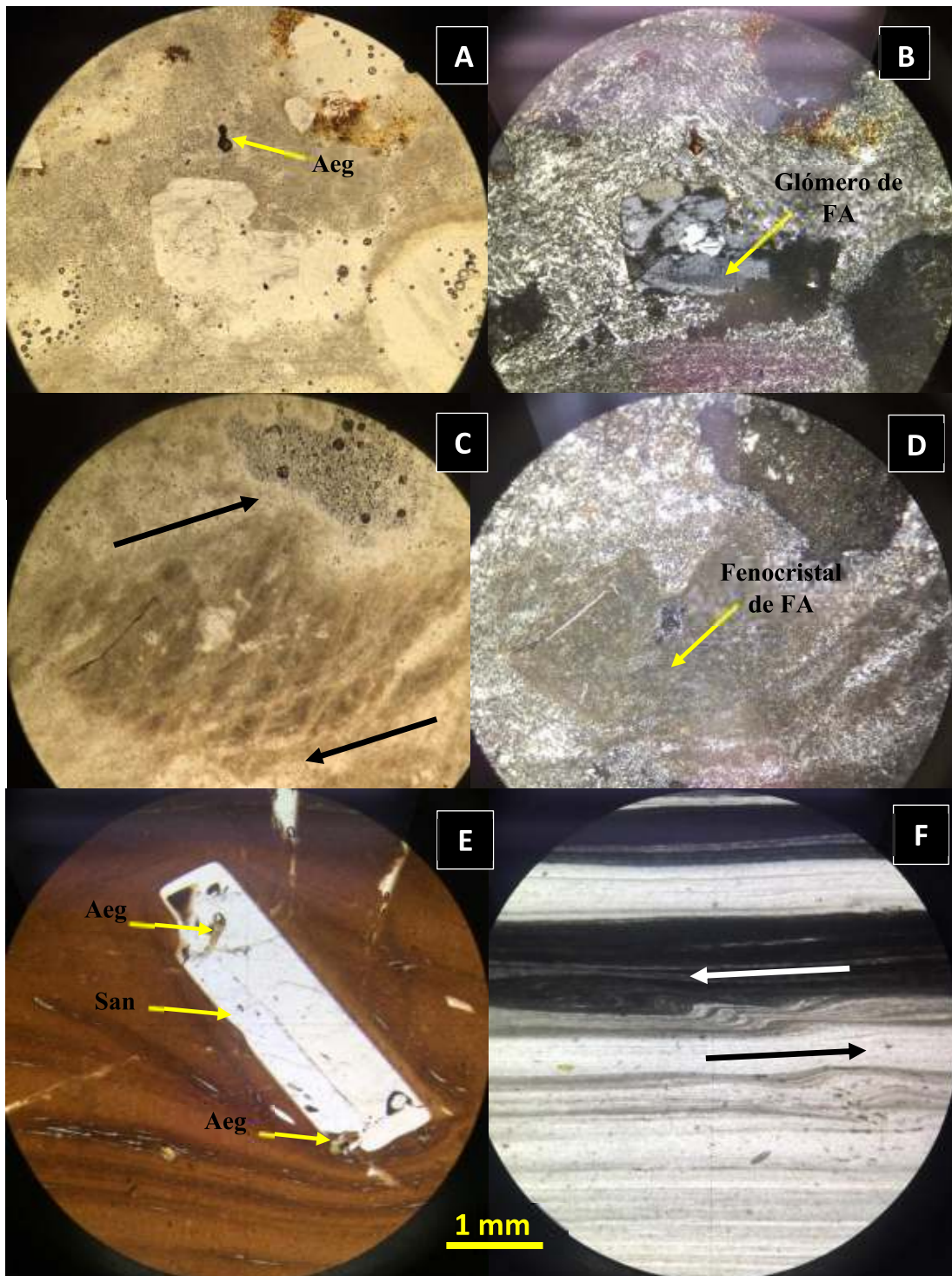


Fig. 36. Fotomicrograffías en donde A, B C y D muestran cortes tipo PePa de la litofacies masiva-fluidal del evento D. En A se observa un microfenocristal de Aeg. En B se presenta un glómero cristal de FA, en el cual se puede observa la estructura fluidal de la matriz que rodea el glómero. En C y D se observa un indicador de movimiento, que exhibe rotación del fenocristal de FA, mostrando el sentido del movimiento con las flechas negras. En E se muestra un fenocristal subredondeado de San con inclusiones de Aeg. En F se observa una microestructura de flujo que obedece a un proceso de cizallamiento dúctil producido entre los planos de flujo, indicado por las flechas blanca y negra.

Presenta bandas de flujo de tonalidades claras y oscuras, las cuales no fue posible reconocer una característica petrográfica en sus diferencias de color. Es posible reconocer zonas con presencia de triquitas dispersos por la muestra. En ella se pueden observar microestructuras de cizallamiento dúctil producido, igualmente, por la dinámica de la viscosidad del flujo (Fig. 35 F).

Tabla 4. Condensado del análisis petrográfico y las principales variaciones de las muestras representativas del Evento D.

Descripción Muestra	Litofacies	Clave Muestra	Localidad	Corte	Asociación Mineralógica (Fenocristas , Microfenocristas y matriz)	Texturas	Alteración
Riolita Fragmento	Masiva ligeramente fluidal	SLN-1809	Mina de Pómez de Alfajayucan	PePa	Feno- Sanidina (San) + Aegirina (Aeg) + Anfíbol (Anf) + Cuarzo (Qz) + Ox Fe-Ti Micro- San + Aeg + Anf + Ox Fe-Ti + Qz Matriz- Feldespato alcalino (FA) + Qz + Vidrio + Triquitas	Flujo	Argílica
Riolita Fragmento	Litofisal	SLN-1908	Mina de Pómez de El Nopalillo	PePa	Feno- San Matriz- Vidrio + Triquitas	Fluidal	Argílica en la matriz
Obsidiana negra	Base Vítreo	SLN-1913	Mina de Pómez de Alfajayucan	PePa	Feno- San Micro- San ± Aeg	Porfírica y Fluidal	No
Perlita negra	Base Vítreo	SLN-1907	Mina de Pómez de El Nopalillo	PePa	No visible	Perlítica	Perlitización muy desarrollada

Unidades Volcánicas Circundantes

Domo Riolítico La Joya

Este evento volcánico se caracteriza por una roca hipocristalina de textura esferulítica y glomeroporfírica, con una asociación mineralógica de fenocristales de albita? + anfíbol + cuarzo + Ox Fe-Ti, contenidos en una matriz equigranular de cuarzo tardío de aspecto subanguloso (Fig. 37 A). A los fenocristales de FA es posible observarlos en glómeros rodeados de Ox de Fe-Ti. La roca es de composición riolítica y presenta un desarrollado de una alteración de oxidación. Su ambiente de emplazamiento es lávico aunque no se observan estructuras de flujo marcadas por orientaciones de partículas.

Domo Riolítico Las Mesas

Este evento volcánico se caracteriza por una roca hipocristalina de textura porfírica y glomeroporfírica, con una asociación mineralógica de fenocristales de Qz + Alb + FA + Ox Fe-Ti + Hbl, microfenocristales de Qz + Alb + FA + Bio + Ox Fe-Ti, contenidos en una matriz equigranular y micrográfica de cuarzo y FA (Fig. 37 B). La biotita es posible observarla asociada a la oxidación en una mineralización tardía. La roca es de composición riolítica y presenta poco desarrollo de una alteración de oxidación. Su ambiente de emplazamiento es también lávico, sin una dirección de flujo visible.

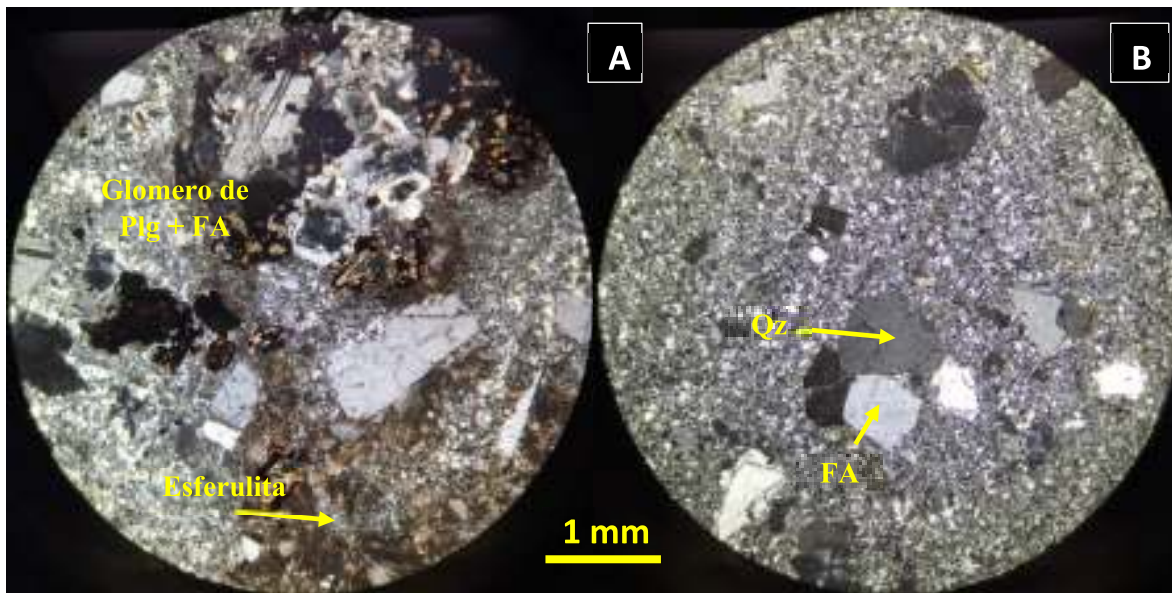


Fig. 37. Fotomicrografías de A se observa en un corte tipo PePa de la roca representativa del Domo Riolítico La Joya. En B se muestra en un corte tipo PePa la roca representativa del domo Riolítico Las Mesas. En A y B resalta la textura glomeroporfírica.

Tabla 5. Condensado del análisis petrográfico y las principales variaciones de las muestras representativas de las unidades volcánicas circundantes a Sierra de las Navajas.

Descripción Muestra	Litofacies	Unidad	Clave Muestra	Localidad	Corte	Asociación Mineralógica (Fenocristales, Microfenocristales y matriz)	Texturas	Alteración
Riolita Fragmento	Masiva fluidal	Domo Riolítico La Joya (Lavas El Sustito, Núñez-Velázquez, 2018)	SLN-1805	La Joya	PePa	Feno- Albita + Hbl + Qz + Ox Fe-Ti Matriz- Qz	Esferralítica	Oxidación
Riolita Fragmento	Masiva fluidal	Domo Riolítico Las Mesas	SLN 1813	Las Mesas	PePa	Feno- Qz + Alb + FA + Ox Fe-Ti + Hbl Micro- Qz + Alb + FA + Bio + Ox Fe-Ti	Porfírica-Glomeroporfírica, Equigranular y microgranofírica en la matriz	Oxidación

3.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)

Se realizó un análisis de difracción de rayos x con el fin identificar la asociación mineralógica de las unidades volcánicas que componen la estratigrafía compuesta de Cerro de las Navajas y de las unidades volcánicas circundantes a la Sierra de las Navajas. La metodología del análisis consistió en seleccionar las muestras representativas (rocas cristalinas y obsidianas), que corresponden a los eventos volcánicos B, C y D, respectivamente (ver Fig. 20, columna estratigráfica).

En las muestras de obsidianas se llevó a cabo un proceso de preparación de la muestra diferente al de las rocas cristalinas. Considerando el principio de que la obsidiana es un geomaterial con una complejidad única, su identidad mineralógica es posible identificarla con métodos y técnicas experimentales específicas. Dado que se trata de una roca holohialina y por lo tanto su cristalinidad es casi nula, es de tamaño de grano fino a muy fino microscópico. En el caso de la DRX, la metodología consistió en astillar el bloque de obsidiana y triturarlo. Después los pedazos fueron observados en el microscopio petrográfico con el fin de ubicar los fragmentos que tuvieran un contenido considerable en cristales. Así, estos se separaron del resto y pasaron a ser pulverizados. Una vez obtenida la muestra representativa de la facies cristalina de la obsidiana se analizaron en el difractómetro de rayos X de manera “lenta”, es decir con una duración aproximada de 12-13 horas continuas para eliminar el efecto de la matriz vítrea en los análisis. Este proceso se llevó a cabo para cada una de las muestras de obsidiana, a comparación de las rocas cristalinas que se analizaron de manera “normal” con una duración aproximada de 30-40 minutos (Ver difractogramas en anexos).

Para las muestras del evento B, se corrieron dos litofacies de la riolita reconocidas en los posibles conductos del paleo-domo (raíz del cuerpo volcánico). La muestra que pertenece a la litofacies con alto contenido en litofisas, y la muestra a la litofacies de aspecto pumicítico. Se llevó a cabo su análisis en una corrida normal mostrando las dos litofacies una asociación mineralógica de Oligocasa (Olg), Sanidino (San) y Cuarzo (Qz). Considerando en la litofacies litofisal un mismo contenido de Olg + San + Qz, en ese orden de abundancia, según su porcentaje relativo de contenido mineral (Tabla 6). En la litofacies de aspecto pumicítico?,

presenta otro orden de abundancia de Qz + Olg + San, según su porcentaje de contenido mineral (Tabla 6).

En el evento C, se analizaron tres muestras que representan a la litofacies de la brecha piroclástica: a) un lítico de la litofacies que corresponde a un bloque de riolita con alto contenido en litofisas, b) un lítico propio de un bloque de obsidiana verde-dorada y c) un lítico correspondiente a un bloque de obsidiana verde-oscuro. A partir de un análisis “normal” de la litofacies a) *riolita litofisal*, muestra una asociación mineralógica de Anortoclasa (Ano) + San + Cristobalita (Cri), en ese orden de abundancia, según su porcentaje relativo de contenido mineral. Los líticos de bloques de obsidiana correspondientes a este evento mostraron diferencias significativas entre sí. La muestra b) es una obsidiana verde-dorada, que presenta una asociación mineralógica de CHO + Tridimita (Tri) + San + Cri, en ese orden de abundancia, según su porcentaje de contenido mineral. La muestra c) es una obsidiana verde-oscuro, que muestra la asociación mineralógica más compleja de todo el estudio, de CHO + Prx + Tri + Cri + Carn + Qz + Fayalita (Fay), en ese orden de abundancia relativa.

Se analizaron las muestras correspondientes a las tres litofacies del evento D: a) fluidal, b) litofisal, y c) la litofacies vítrea representada por la obsidiana negra, con facies mineralógica común entre ellas. En la litofacies a) *fluidal*, se presenta una asociación mineralógica de Ano + San + Cri + Qz, la litofacies b) *litofisal* exhibe una mineralogía de Ano + San + Cr, y litofacies c) base vítrea presenta una mineralogía de Ano + Qz + San + Aeg, con ese orden de abundancia en su contenido mineral.

Las muestras que corresponden a las unidades volcánicas circundantes son de dos cuerpos que afloran al sur de la Sierra de las Navajas. Uno de ellos es un domo riolítico llamado Cerro Las Mesas que presenta una asociación mineralógica de Mic + Alb + Qz + Ort, en ese orden de abundancia relativa. El otro es un cuerpo rocoso ubicado en la localidad de la Joya, similar a un domo donde se puede observar una asociación mineralógica de Alb + Qz + Fer, en ese orden de abundancia.

Descripción Muestra	Evento	Unidad	Litofacies	Clave Muestra	Localidad	Tipo de Corrida	Asociación Mineralógica	Porcentaje de Contenido Mineral (% SQ)
Riolita Fragmento	B	Paleo Domo Riolítico	Riolita Litofisal	SLN-1902	Cruz de Milagro	Normal	Qz + San + Olg	Olg = 47.3, San = 29.5, Qz = 23.2
Riolita Fragmento	B	Paleo Domo Riolítico	Riolita Litofisal Pumicítica?	SLN-1903	Cruz de Milagro	Normal	Qz + San + Olg	Qz = 44.3, Olg = 32.7, San = 23.1
Lítico	C	Flujo de Depósito de Bloques y Cenizas	Brecha Piroclástica	SLN-1901	Mina de Pómez El Nopalillo	Normal	San + Ano + Cri	Ano = 60.7, San = 29.1, Cri = 10.2
Obsidiana dorada	C	Flujo de Depósito de Bloques y Cenizas	Brecha Piroclástica	SLN-1804	Mina de Pómez El Nopalillo	Lento	San + Cris + Tri + CHO?	CHO = 54.7, Tri = 24.8, San = 13.8, Cri = 6.7
Obsidiana verde	C	Flujo de Depósito de Bloques y Cenizas	Brecha Piroclástica	SLN-1816 A2	Mina de Pómez El Nopalillo	Lento	Qz + Tri + Cri + Fay + Carn + CHO? + Prx	CHO = 40.5, Prx = 15.4, Tri = 14.7, Cri = 9.4, Carn = 8.3, Qz = 7.6, Fay = 4.1
Riolita Fragmento	D	Unidad Fluidal Itztetl	Riolita Fluidal	SLN-1909	Mina de Pómez El Nopalillo	Normal	Ano + Cri + San + Qz	Ano = 54.6, San = 24.9, Cri = 13.1, Qz = 7.4
Riolita Fragmento	D	Unidad Fluidal Itztetl	Riolita Litofisal	SLN-1906	Mina de Pómez El Nopalillo	Normal	Ano + Cri + San	Ano = 45.4, San = 30.6, Cri = 24.0
Obsidiana negra	D	Unidad Fluidal Itztetl	Base Vítrea	SLN-1913	Mina de Pómez de Alfajayucan	Lento	Ano + Qz + San + Aeg	Ano = 35.9, Qz = 34.3, San = 22.6, Aeg = 7.3
Lítico	Volcanismo Circundante	Domo Riolítico?	Masiva fluidal	SLN-1805	La Joya	Normal	Qz + Alb + Fer	Alb = 45.2, Qz = 36.1, Fer = 18.7
Lítico	Volcanismo Circundante	Domo Riolítico?	Masiva fluidal	SLN-1813	Las Mesas	Normal	Ort + Qz + Alb + Mic	Mic = 32.8, Alb = 31.6, Qz = 21.1, Ort = 14.5

Qz = Cuarzo, San = Sanidina, Mic = Microclina, Ort = Ortoclasa Olg = Oligoclasa, Ano = Anortoclasa, Alb = Albita, Cri = Cristobalita, Tri = Tridymita, Fay = Fayalita, Carn = Carnegita, Fer = Ferrosita, CHO = Hidróxido de Carbono

Tabla 6. Condensado que muestra los resultados de los análisis de difracción de rayos x, para los eventos volcánicos de Cerro de las Navajas y los eventos volcánicos circundantes a la Sierra de las Navajas. La facies mineralógica CHO = Hidróxido de Carbono, compuesto orgánico identificado en el patrón del difractograma de las obsidiana verde-dorada del evento C.

3.1.3 Geoquímica

El estudio geoquímico se realizó por la técnica de fluorescencia de rayos x portátil (ED-FRX), con el fin de aprovechar una metodología no invasiva para reconocer variaciones geoquímicas en el yacimiento de obsidiana de Cerro de las Navajas. Se analizaron puntualmente 10 muestras de cortes orientados (PePa, **ver anexo 1**) de obsidiana en un equipo de fluorescencia de rayos x portátil (FRXP) Thermoscientific Niton XL3t en el Laboratorio de Análisis Y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) y en un equipo de fluorescencia de rayos x semi-portátil (FRXSP) Thermoscientific Niton XL en el Laboratorio de Geoquímica en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

Los análisis se elaboraron en los dos equipos con una metodología similar: a) Bajo los módulos Test All Geo y Soil, b) 45 segundos/1 lectura en el equipo portátil y, 60 segundos/3 lecturas en el semi-portátil (de acuerdo a las recomendaciones del

equipo), c) se hicieron las evaluaciones de los espectros de manera manual para cada uno de los filtros (*Main, Low, High* y *Light*, respectivamente para cada método) con el software PMCA de los análisis del equipo de FRXP (LADIPA), corroborando la información en el mismo análisis los espectros de los análisis realizados en el equipo semi-portátil (Universidad de Sonora). Se comparó entre las muestras analizadas la evaluación cualitativa entre los equipos portátil y semi-portátil de FRX, con la evaluación cuantitativa del equipo semi-portátil. Esto con el fin de identificar la precisión de los equipos y abarcar el mayor rango de elementos visibles en los espectros de cada análisis.

En el presente apartado se proponen relaciones de cocientes elementales significativos para encontrar una relación entre la genética magmática del yacimiento de obsidiana de Cerro de las Navajas y sus propias variaciones geoquímicas las cuales permitan identificar grupos dentro del yacimiento (**Véase Protocolo Geoquímica, Anexo 3**).



Fig. 38. Equipos de Fluorescencia de Rayos X portátil (A) y semi-portátil (B). En A = Thermoscientific Niton XL3t en el Laboratorio de Análisis Y Diagnóstico del Patrimonio (LADIPA) y B = Thermoscientific Niton XL en el Laboratorio de Geoquímica en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

3.1.4 Resultados

Los magmas hiperalcalinos del volcanismo de Sierra de las Navajas, petrológicamente definen una característica geoquímica para sus productos volcánicos (rocas, pómez, vidrios, etc) (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez 2020). A partir de los datos de concentraciones semi cuantitativas del equipo de FRXSP, en el caso particular del presente trabajo, se construyeron diagramas binarios y ternarios con cocientes elementales que evidencian variaciones significativas en la tendencia de distribución de los líticos de obsidiana del evento C, y de la marekanita del evento A, en el yacimiento de Cerro de las Navajas.

Según Lighthard (2001) y Núñez-Velázquez (2020), geoquímicamente el volcanismo de Sierra de las Navajas se define por su afinidad hiperalcalina. Sin embargo, los diagramas discriminatorios de elementos traza que se presentan en este apartado, permiten observar una variación en las concentraciones que este volcanismo expone. La Fig. 39 presenta un diagrama binario donde se reconoce una distribución con tendencia negativa entre 0.76 a 0.81 en los valores de Nb/Y, de las obsidias del evento C (símbolos de color negro) y el evento A (símbolo de cruz de color morado). El objetivo de este diagrama es mostrar el rango de concentraciones que presentan las muestras de obsidiana de la localidad de Cerro de las Navajas.

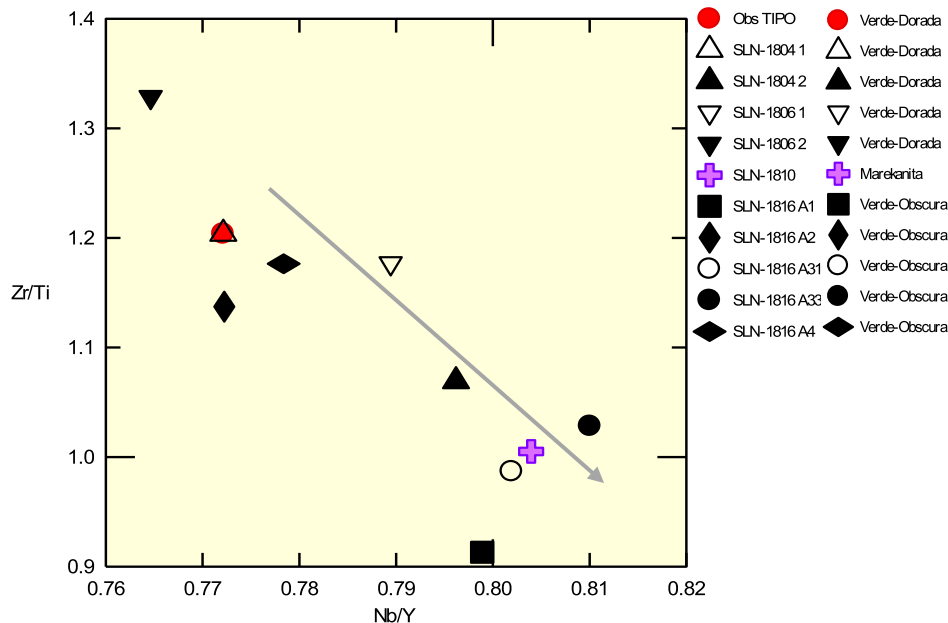


Fig. 39. Diagrama de Zr/Ti vs Nb/Y que muestra las variaciones y el rango de hiperalcalinidad de las obsidias del vulcanismo de Cerro de las Navajas.

En el estudio analítico de la presente investigación, con el fin de observar las diferencias de concentraciones que puede presentar una misma muestra de obsidiana, se llevó a cabo un experimento en donde se analizó puntualmente dos cortes diferentes de las muestras SLN-1804 (1=PePa y 2=PePe) y SLN-1806 (1=PePa y 2=PePe). Los cortes se generaron considerando las variaciones de las muestras de obsidiana según la petro-fábrica. En la Fig. 39 se puede observar que los análisis de las caras de las muestras de este experimento presentan un comportamiento común en su distribución, representada por la diferencia constante que existe entre las muestras (símbolos de triángulos).

Se construyó un diagrama multielemental, donde se normalizaron las concentraciones de las obsidianas analizadas (Fig. 40). Se eligió una obsidiana dorada (Obs. Tipo=SLN-1804 1) del yacimiento de Cerro de las Navajas, como artefacto geoquímico para observar las anomalías positivas y negativas del espectro generado, e identificar las principales variaciones elementales entre las obsidianas del yacimiento. Bajo este diagrama es posible observar anomalías positivas y negativas en los elementos Rb, U, Th, Sr, Zn, Fe, Mn, W, Cu y Cr, que presentan una variación significativa según la normalización. Por otro lado, los elementos como Ti, Ca, K, Y, Mo y V presentan un comportamiento similar a la normalización, sin una variación significativa. Las anomalías negativas de los espectros, de las muestras de obsidianas, se observan con una distribución relativamente similar. Por otro lado, las anomalías positivas corresponden a dos análisis de la misma muestra de obsidiana en dos cortes distintos (Obsidiana Verde-Dorada, SLN-1806 1 y 2; 1=PePa y 2=PePe). Los resultados del comportamiento abrupto de las concentraciones de una muestra de obsidiana verde-dorada, exhibe la alta variabilidad en concentración que presentan las obsidianas del yacimiento. En los resultados de la normalización se identificó los elementos traza que, geoquímicamente en el magma, preservan una identidad móvil (Sr, K, Rb, Mn) contra una identidad inmóvil (Zr, Y, Nb, Ti). Aunque el carácter hiperalcalino del magmatismo de Sierra de las Navajas, representa la identidad geoquímica de las obsidianas del evento C y del evento A de Cerro de las Navajas. Esta variabilidad elemental permite identificar procesos de una diferenciación geoquímica en el

magma, siempre y cuando los ejemplares analizados estén libres de alteración ya que esta tiene un efecto en los elementos móviles. Por lo tanto, se construyeron cocientes elementales considerando su identidad móvil e inmóvil, con la finalidad de hacer diagramas de discriminación binarios y ternarios.

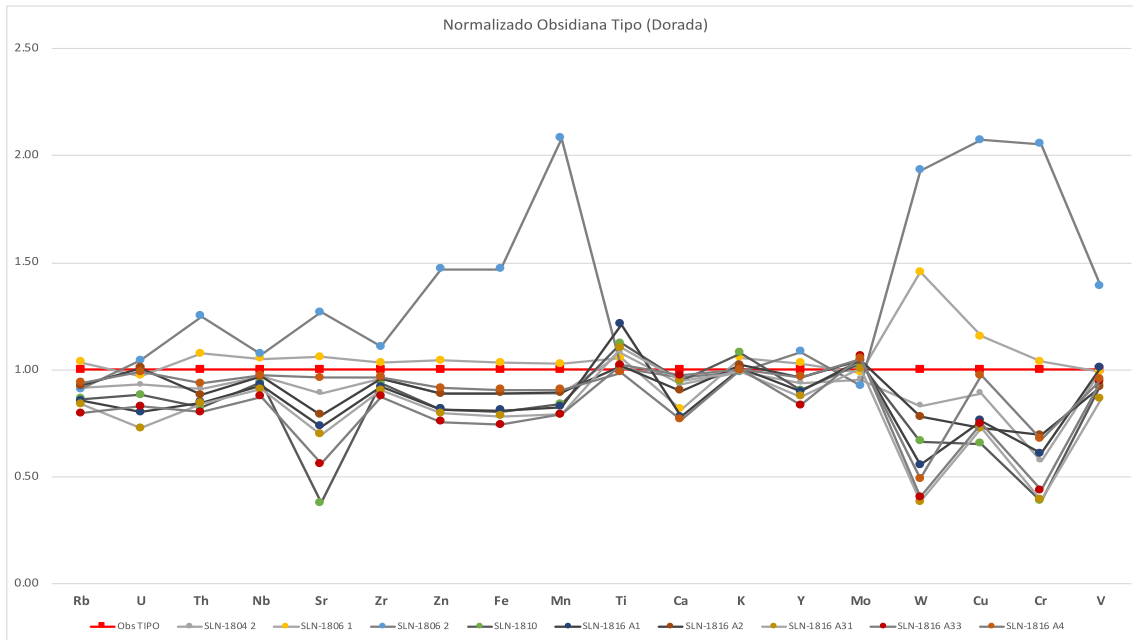
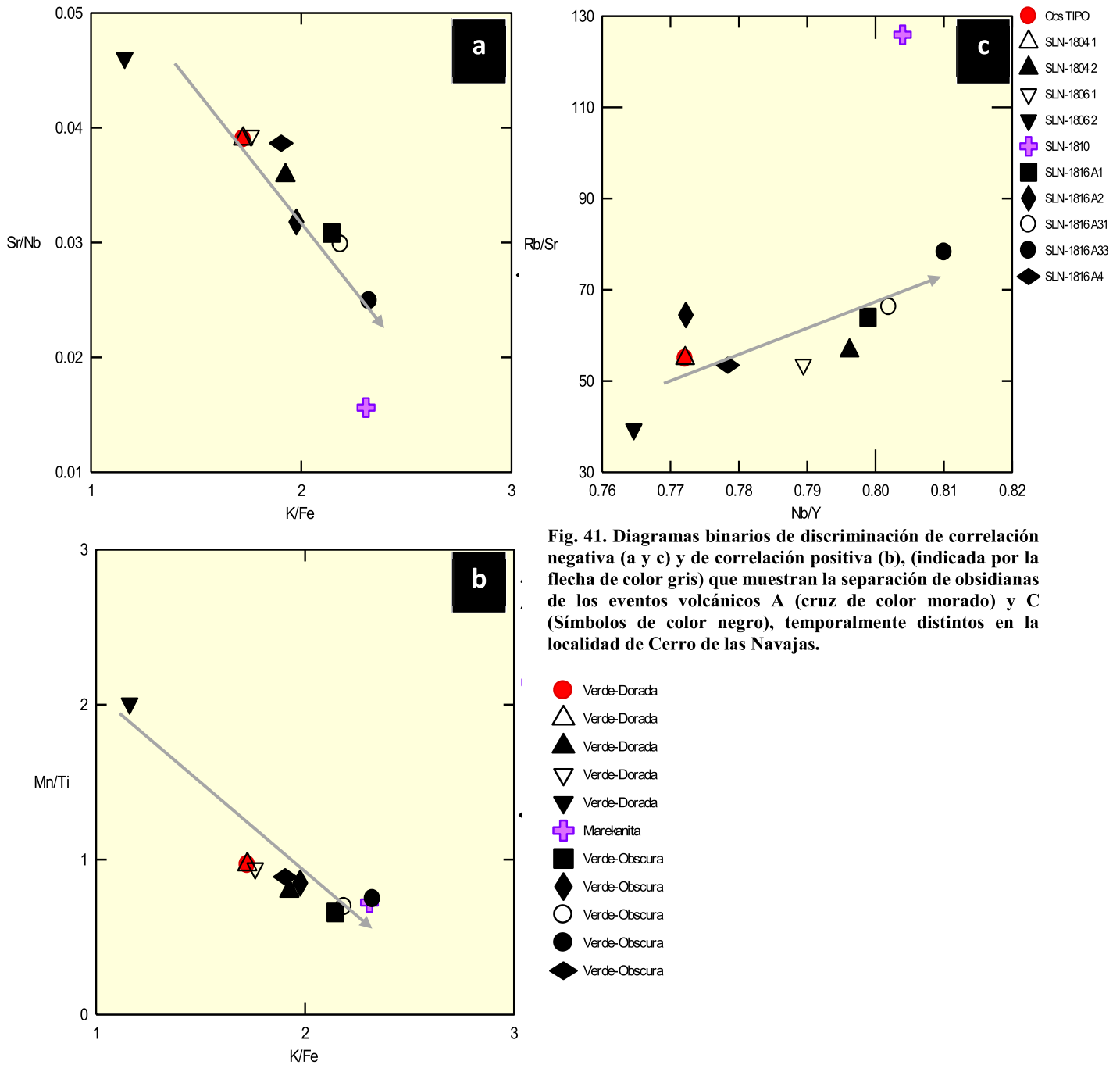


Fig. 40. Diagrama multielemental normalizado según una obsidiana dorada (muestra tipo del yacimiento de Cerro de las Navajas), que muestra las variaciones entre las muestras de obsidiana con las anomalías positivas y negativas.

En la Fig. 40, el análisis del corte tipo PePe de la muestra SLN-1806 2 (Evento C), presenta un comportamiento irregular más acentuado en el espectro. Sus concentraciones elementales ligeramente altas, en comparación con el resto de las muestras de obsidiana del evento C, exhibe un comportamiento aislado en la distribución de las muestras en los diagramas de la Fig. 41 a, b y c, y 43.

La Fig. 41 presenta tres diagramas binarios que muestran una correlación negativa (Fig. 41 A y C) y correlación positiva (Fig. 41 B) de las muestras de obsidiana del evento B. En la Fig. 41 A y B, se observa que la correlación de Sr/Nb (móvil/inmóvil) y Rb/Sr (móviles) contra K/Fe (elementos mayores del magma expresados en ppm) genera que la muestra SLN-1810 (Marekanita, evento A), no siga la tendencia principal de las muestras de obsidiana del evento B. La Fig. 41 C

presenta que la relación Mn/Ti (móvil/inmóvil) contra K/Fe agrupa en una misma



La Fig. 42 se graficó con la correlación de Sr/Mn (móviles) contra Rb/Ti (móvil/inmóvil) donde se observa una dispersión de las muestras. Sin embargo, esta dispersión se separó en dos agrupaciones principales de muestras de obsidiana (En Fig. 42, 1 y 2). En el grupo 1 se encuentran las obsidias verdes-oscuras, en donde

los símbolos circulares son dos cortes PePa de la misma muestra, el símbolo cuadrado es una muestra de obsidiana verde-oscuro, y la cruz morada es la marekanita del Evento A. El grupo 2 son las obsidias verde-dorada representadas con los símbolos triangulares y obsidias verdes-oscuras (rombos).

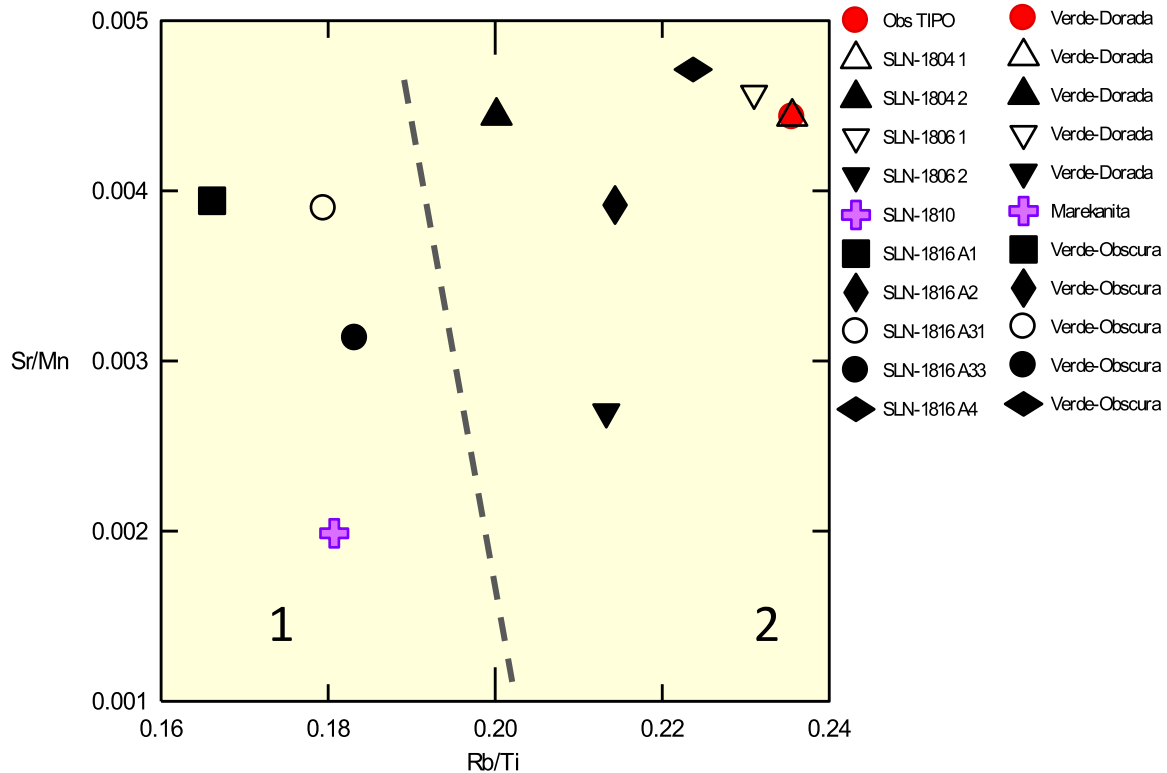


Fig. 42. Diagrama binario de discriminación en donde se observan dos grupos principales en la población de obsidias, divididos por la línea gris discontinua, e indicados como 1 y 2.

La Fig. 43, es un diagrama ternario compuesto por una relación de Mn/Ti–Fe/K–Nb/Y, donde se combina un factor de elementos principalmente inmóviles (Mn/Ti–Nb/Y) y elementos mayores del magma en ppm (Fe/K). En el diagrama se puede observar que los tres cocientes están actuando con el mismo dominio sobre la población de muestras de obsidiana, por lo que las muestras del Evento A y C se agrupan en el centro del diagrama. Debido a que la identidad inmóvil, de los elementos traza seleccionados para este diagrama, no discrimina las posibles variaciones de un magma, y/o pulsos magmáticos (con la excepción de las altas

concentraciones de la muestra SLN-1804 2), no se define grupos para el yacimiento de Cerro de las Navajas.

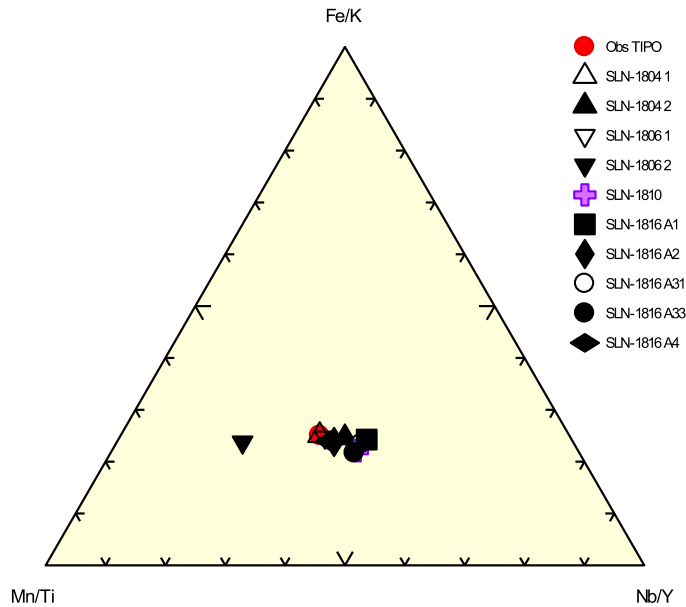


Fig. 43. Diagrama ternario que muestra una agrupación de la población de obsidianas.

3.1.5 Nomenclatura de Obsidianas de la localidad de Cerro de las Navajas

La localidad de Cerro de las Navajas presenta petrológicamente por lo menos cuatro variedades de obsidiana: Verde-Obscura (Evento A y C), Verde-Dorada y Negra (Evento D). Aparte de presentar las variedades petrológicas necesarias para diferenciarlas entre ellas (Tabla 7), estratigráficamente se asocian a eventos volcánicos distintos.

La estratigrafía compuesta de Cerro de las Navajas presenta tres ubicaciones estratiformes en donde se puede encontrar obsidiana (ver Fig. 44). En el evento A en forma de marekanitas, en el evento C en forma de líticos de bloques de obsidiana verde-obscura y verde-dorada, y en el evento D como fragmentos de una litofacies de base vítrea de un posible derrame riolítico (ver Fig. 45).

En la Tabla 6, es posible observar las descripciones geológicas, de muestra de mano y petrográficas que definen a cada una de las obsidianas. Arqueológicamente, las obsidianas del evento C son las que tienen mayor importancia, ya que su ocurrencia geológica cumple con las características

específicas de abastecimiento de materia prima, forma, volumen y calidad para la

Tabla 7. Condensado de las características de muestra de mano y petrográficas observadas en las variedades de obsidiana de la localidad de Cerro de las Navajas, flanco SO de Sierra de las Navajas.

Nomenclatura de Obsidias del subyacimiento de Cerro de las Navajas											
Color	Características Geológicas				Características Muestra de Mano			Características Petrográficas			
	Evento	Unidad/Subunidad	Litofacies	Ocurrencia geológica	Fenocristales	Iridiscencia	Litofizas	Inclusiones Fluidas	Cristalinidad	Cristales (tipo)	Evidencia de Fábrica
Verde oscura	A	Corrientes Piroclásticas Densas (CPD)	Lapillita ligeramente lítica	Marekanita	No visibles	No	Presenta en ocasiones	No	Hipocristalina	Abundantes FA + plg?	Cristales
Verde dorada	C	CPD/Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC)	Brecha Piroclástica	Lítico	No visibles	Sí	Presenta en ocasiones	Abundantes y angulosas	Vítrea	No	Inclusiones
Verde oscura	C	CPD/DFBC	Brecha Piroclástica	Lítico	No visibles	No	Presenta en ocasiones	Perfectamente laminadas y angulosas, en facie solida. Su cantidad varía dependiendo de la litofacies	Vítrea	Escasos de FA	Inclusiones
Negra	D	Unidad Fluidal Itztetl (UFI)	Base Vítrea	Fragmento	Feldespató Alcalino	No	No	Redondeadas en facie líquida. Su cantidad es escasa	Hipocristalina	Abundantes FA (Sanidina)	Cristales e inclusiones

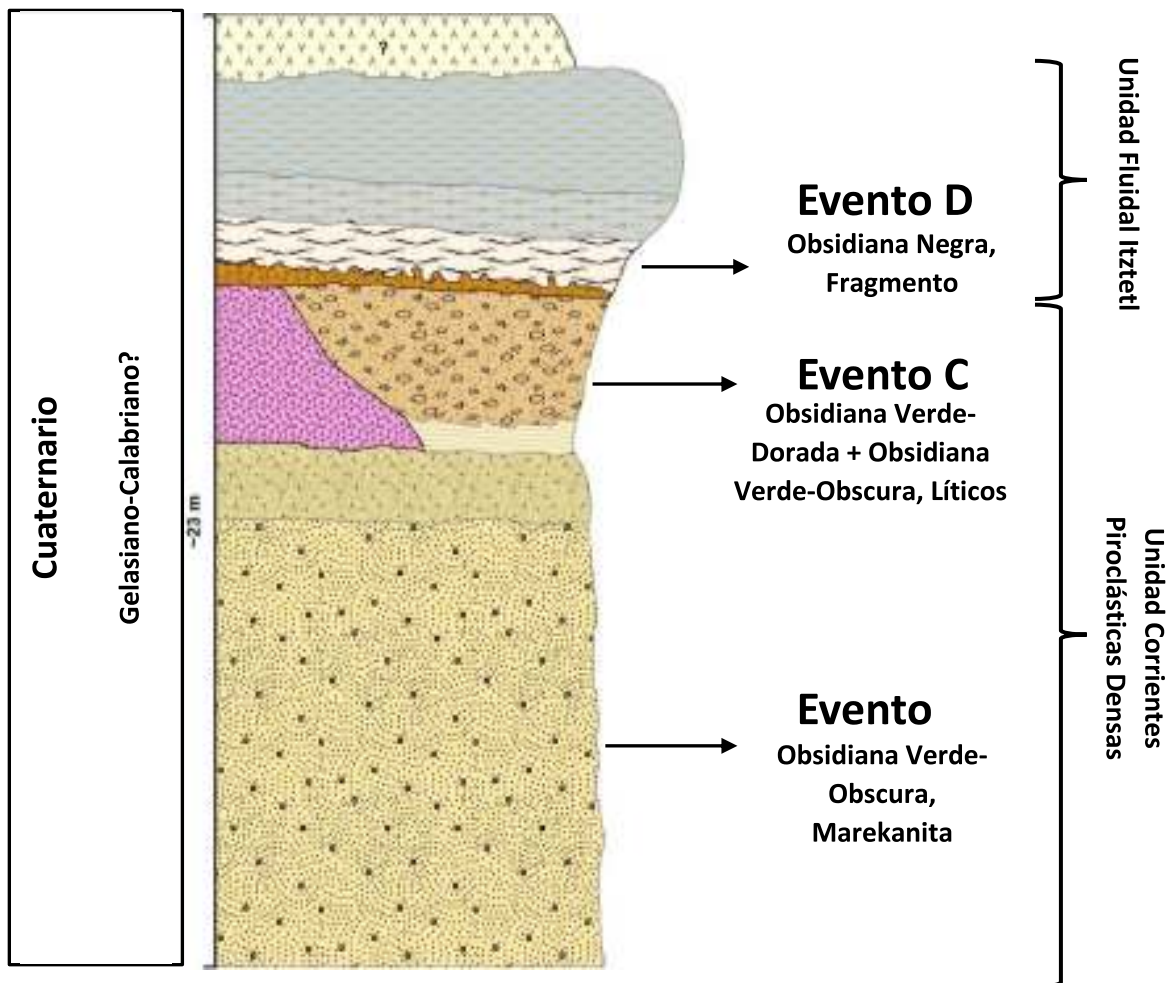


Fig. 44. Columna estratigráfica que muestra la relación de los tres tipos de ocurrencias estratigráficas de obsidias en la localidad de Cerro de las Navajas.





Fig. 45. Principales variedades de obsidiana de la localidad de Cerro de las Navajas. En A = Obsidiana Verde-Dorada, evento C de la unidad CPD, B = Obsidiana Verde-Obscura, evento C de la unidad CPD y C = Obsidiana Negra, evento D de la unidad UFI.

4. Minería prehispánica

El yacimiento de obsidiana verde-dorada de Sierra de las Navajas, Hidalgo, México, ha sido considerando la fuente principal del desarrollo de los estados Teotihuacano, Tolteca y Azteca (Pastrana, 2002) y en la actualidad es explotado por los habitantes del ejido de El Nopalillo. Pastrana y Domínguez (2009) comentan que el uso de la obsidiana se relaciona directamente con el desarrollo económico, militar, religioso y comercial de las organizaciones estatales del centro de Mesoamérica. La minería moderna del yacimiento es con el objetivo de generar comercio local y nacional con la fabricación de artesanías de obsidiana y la venta de la materia prima al comercio extranjero. Por lo tanto, desde el Formativo temprano (Cobean, 2001) hasta la Colonia (Pastrana y Fournier, 1996; Pastrana et al. 2019), Sierra de las Navajas se podría considerar como un punto de convergencia geológico, geográfico y social estratégico para las culturas del centro del México mesoamericano.

La ocurrencia geológica del yacimiento de obsidiana verde-dorada ha dificultado la interpretación acerca de las estrategias en los métodos de explotación regulados principalmente por el estado Teotihuacano y Azteca. Se podría decir que a nivel mundial Sierra de las Navajas es un yacimiento de características geológicamente únicas, que presenta una gran evidencia arqueológica derivada de su larga secuencia de explotación. Por lo tanto, los cambios como patrones de asentamiento de las poblaciones involucradas, las necesidades principales y control político de la obsidiana, se ven reflejados en las estrategias de explotación, elaboración y distribución, que aquí se proponen aquí como un componente de la complejidad social alcanzada en Mesoamérica.

4.1 Explotación de obsidiana prehispánica

A partir de una revisión bibliográfica, se buscó comparar la complejidad de la sociedad Teotihuacana y Azteca con base en los métodos de explotación aplicado por estas culturas en el yacimiento de Sierra de las Navajas. Con el objetivo de identificar la complejidad social representadas, principalmente, en sus cambios culturales a través de las estrategias políticas-económicas de explotación en este

apartado se presentan las estrategias y técnicas de explotación prehispánica de obsidiana en el centro de Mesoamérica empleada por estos grupos sociales.

La minería se llevó a cabo mediante la excavación de pozos verticales de aproximadamente 1 m de diámetro que conectaban túneles horizontales e inclinados de secciones elípticas de 1,70 m de diámetro en los puntos donde el minero encontraba obsidiana de buenas formas, dimensiones y textura vítrea en un espacio <2 Km de longitud. [Pastrana \(1998\)](#) menciona que las minas prehispánicas alcanzaron profundidades cercanas a los 40 m donde se encuentran los grandes bloques de obsidiana ([Fig. 46](#)) y calcula que la explotación prehispánica agotó aproximadamente un 40% del potencial geológico del yacimiento. Cabe mencionar que en las minas prehispánicas no se han encontrado



Fig. 46 Fotografía tomada dentro de una mina moderna que muestra la roca Brecha Piroclástica de obsidiana, que compone el yacimiento de obsidiana verde-dorada de Sierra de las Navajas.

estructuras de soporte como cimbra, para evitar potenciales derrumbes. Por lo que los túneles presentan una forma de elíptica o de arco en el techo principalmente esto se debe al grado de compactación original de los materiales geológicos y al tipo de emplazamiento volcánico (corrientes piroclásticas densas).

Las técnicas mineras desarrolladas en este yacimiento se deben a un conocimiento geológico local alcanzado por técnicas de prueba y error hecha por lo mineros prehispánicos que se transmitió por generaciones; pues se han detectado derrumbes

accidentales en las minas prehispánicas y modernas, por lo que la extracción de la obsidiana verde siempre ha sido un arduo trabajo con riesgo.

La producción de preformas de bloques de obsidiana a través de la talla se llevaba a cabo en el sitio del minado. Según [Lailson, B. \(2019\)](#) menciona que las actividades en la minería eran divididas dependiendo de la edad y madurez de las personas. Por ejemplo, los hombres adultos jóvenes y maduros, eran los encargados de llevar a cabo las excavaciones, la talla de núcleos y preformas, y las construcciones asociadas a la permanencia poblacional en la Sierra. Los talleres de producción con una gran cantidad de residuos de talla de la materia prima abundan en el sitio arqueológico ubicado en la localidad de Cerro de las Navajas ([Fig. 47](#)).



Fig. 47. Fotografía de un taller azteca de obsidiana, ubicado en la localidad de Cerro de las Navajas.

a) Teotihuacan

Según [Pastrana y Domínguez \(2009\)](#) Teotihuacan organizó la explotación de la obsidiana del yacimiento, al menos con dos asentamientos artesanales que podrían ser semejantes en arquitectura y distribución a los conjuntos habitacionales multifamiliares de la ciudad, identificados en la fase Tlamimilolpa, pero en un contexto rural agrícola, de extracción y producción basada en grupos familiares. Los

campamentos teotihuacanos en el yacimiento muestran actividades habitacionales de unidades familiares con cierta permanencia, asociados a la producción de artefactos de obsidiana terminados como: instrumentos, armas y objetos religiosos.

b) Aztecas

Para los Azteca Pastrana y Domínguez (2009) mencionan que la explotación corresponde a una organización “gremial”, (no familiar) que desarrolló minería profunda y a cielo abierto intensiva, sobre lo que ya existía, así como nuevos agujeros. Se sabe que producían, únicamente, preformas de diversos artefactos que eran terminadas en distintas formas—con una técnica de tallado diferente a la teotihuacana, con cambios importantes—en los talleres de los centros de población.

i. *Efectos socioeconómicos por la demanda de obsidiana en los Estados Teotihuacano y Azteca.*

La demanda de obsidiana por parte del estado Teotihuacano y Azteca llevó a las organizaciones políticas estatales a desarrollar estrategias sobre los sistemas de explotación y manufacturación del material. Pastrana y Domínguez (2009) mencionan que existen asentamientos ubicados tanto en la periferia como directamente en el yacimiento que apoyaban la explotación, talla y transporte de los productos a los sitios del área de distribución. Asimismo, los autores mencionan que los trabajos de la minería y la estancia de los mineros y talladores en los campamentos del yacimiento requirieron de un suministro constante de instrumentos y alimentos.

a) Teotihuacan

Es importante mencionar que Hirth (2008), señala que los primeros modelos para evaluar y generar los talleres de obsidiana en Teotihuacan fueron: (1) aprovisionamiento empresarial análogo al modelo de adquisición directa; (2) adquisición institucional que involucra el control estatal de obsidiana de la fuente de Sierra de las Navajas y (3) adquisición indirecta a través de comerciantes especializados en obsidiana.

[Pastrana y Domínguez \(2009\)](#) reportan la localidad de dos sitios en las proximidades del yacimiento ubicados en un radio de cinco kilómetros aproximadamente y 400 m más abajo respecto a los campamentos mineros en el yacimiento. El control del estado teotihuacano en la adquisición de obsidiana y su demanda exponencial se observa en los restos de materiales arqueológicos teotihuacanos en la Sierra. Dichos autores mencionan que en la superficie de estos sitios periféricos al yacimiento de Sierra de las Navajas se encuentra material lítico abundante, en densas concentraciones, que comprenden procesos de talla de bifaciales, cuchillos, puntas de proyectil y cuentas; numerosos fragmentos de navajas prismáticas con huellas de uso y núcleos prismáticos agotados. También hay material cerámico correspondiente a las fases Patlachique, Tlamimilolpa principalmente, Xolalpan y Metepec.

a) Azteca

La demanda de implementos de obsidiana de la fuente Navajas habría sido alta en todos los sectores de la sociedad azteca, pero es en la producción de armas que se puede observar la evidencia de la mayor participación institucional por parte de la Triple Alianza. La presencia de agrupamiento espacial entre tipos variados de preformas en la cantera y cuchillos. Los puntos de las ofrendas dentro de los recintos ceremoniales de Tenochtitlan y Tlatelolco exhiben un alto grado de uniformidad morfológica y técnica de producción, lo que permite la comparación con los artefactos de la cantera de las Navajas.

ii. *Cambios en las estrategias de explotación-producción por la demanda de obsidiana.*

El desarrollo de la urbe teotihuacana según [Pastrana et al. \(2011\)](#) estuvo relacionado directamente con la explotación y utilización de la obsidiana gris-negra del yacimiento de Otumba ubicado a 18 km de la ciudad. A partir de la fase Tlamimilolpa se detecta el suministro y la creciente distribución de la obsidiana verde-dorada, procedente de la Sierra de las Navajas.

En el estado Teotihuacano la influencia estatal sobre la producción artesanal, [Carballo et al. 2011](#) menciona que ciertamente desempeñó un papel relativamente

secundario en relación con estos esfuerzos y la mayoría de las actividades productivas que probablemente fueron organizadas a lo largo de las líneas domésticas o de parentesco. No obstante, de todo el rango de actividades artesanales que se llevaban a cabo dentro de la ciudad, es probable que los líderes estatales tuvieran bastante interés en controlar aquellas actividades relacionadas con los puntales físicos y simbólicos de la autoridad política

La Triple Alianza según [Carballo y Pastrana, 2017](#), tenía intereses creados en el acceso de regular a ciertos implementos de obsidiana, particularmente armamento para armar a los soldados imperiales y artículos rituales y de estado que se depositaban como ofrendas sagradas o se usaban para indicar el estado. Los plebeyos dentro de la sociedad azteca también habrían ejercido una fuerte demanda de artículos utilitarios utilizados en contextos domésticos ([Fig. 48](#)).

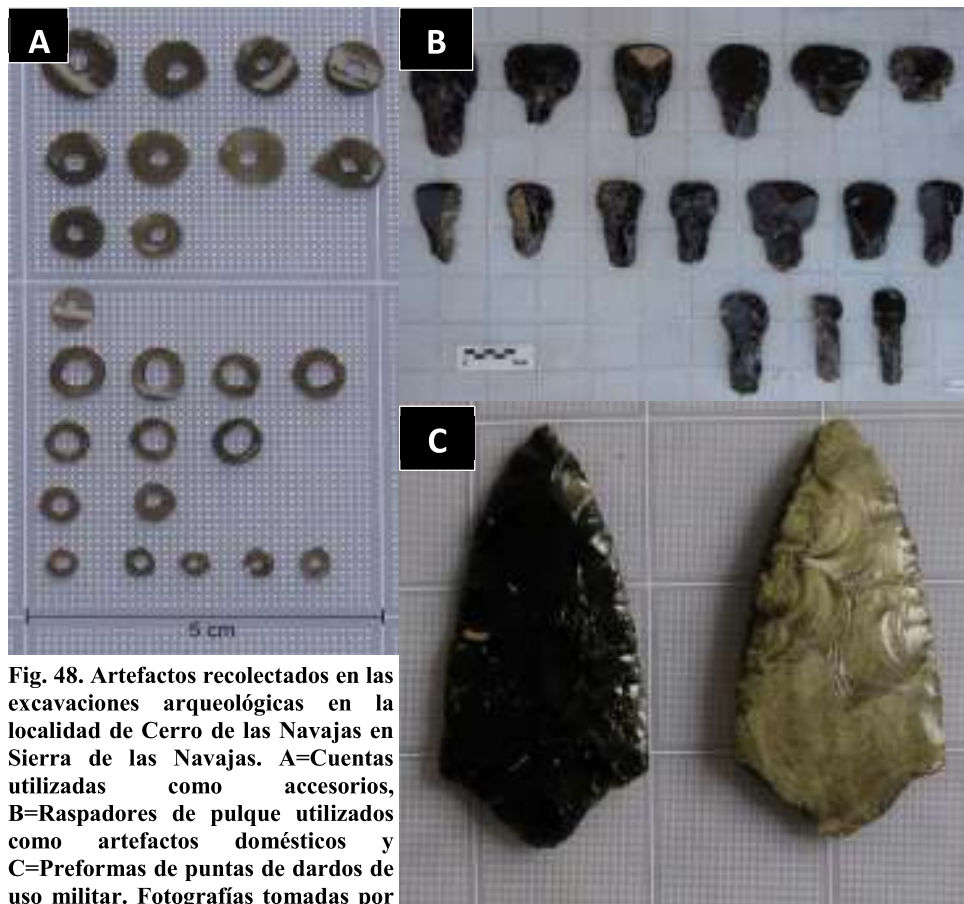


Fig. 48. Artefactos recolectados en las excavaciones arqueológicas en la localidad de Cerro de las Navajas en Sierra de las Navajas. A=Cuentas utilizadas como accesorios, B=Raspadores de pulque utilizados como artefactos domésticos y C=Preformas de puntas de dardos de uso militar. Fotografías tomadas por Silvia Domínguez del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

iii. Comercio y tributos de obsidiana de las ciudades-estado a provincias como forma diplomática de relaciones internacionales.

Aunque los estudios de procedencia se han sido realizados con una metodología poco cierta, la obsidiana de Sierra de las Navajas es macroscópicamente única, por su color verde e iridiscencia de tonalidades doradas. Por lo mismo, es fácil identificarla en el registro arqueológico ya que es la única obsidiana de esas características que se conoce que tuvo influencia en Mesoamérica.

Según menciona [Carballo et al., 2011](#), durante la historia de Teotihuacán la ciudad funcionó como un centro económico que alentó la especialización ocupacional y la intensificación de actividades productivas a niveles no antes vistos en Mesoamérica. Sus líderes estaban interesados en establecer y mantener redes de intercambio y relaciones tributarias que mantenían el flujo de recursos foráneos y mano de obra hacia la ciudad.

Por ejemplo, [Cobean \(2002\)](#) menciona que durante el apogeo de Teotihuacan en el Clásico Temprano (ca. 300-650 d. C.), en Tikal y en otros grandes centros de las tierras bajas mayas, hay un marcado incremento en la cantidad de artefactos de obsidiana de Las Navajas y de otros yacimientos del centro de México. En los trabajos geoquímicos de procedencia de [Haines y Glascock \(2013\)](#), mencionan que la obsidiana de El Chayal y la obsidiana de fuentes del centro de México fueron reconocidas, en los monumentos de Tikal y Copán, como ideas codificadoras de identidad o asociación con Teotihuacan, que luego se utilizó como parte de un proyecto más grande de un sistema de legitimación política. Por lo tanto, [Aoyama \(2017\)](#), menciona que el intercambio a larga distancia de cantidades muy pequeñas de artefactos de obsidiana terminados del altiplano mexicano era principalmente de importancia social y simbólica, más que económica.

Posterior al colapso de Teotihuacano, los Toltecas aprovechan parte de la infraestructura y la parte de la estructura política de la obsidiana que ya había implementado Teotihuacan. Para esto, [Healan \(1993\)](#) genera algunos modelos para interpretar las redes de producción y comercio de Tula, entre ellos considera que el de intercambio basado en tributos es el más útil. Proporciona un medio para que el estado adquiera grandes cantidades de obsidiana sin la existencia de talleres

estatales o controlados dedicados a la producción de alto volumen dentro o fuera de Tula.

[Pastrana \(2002\)](#) menciona que, debido a su importancia, la obsidiana cayó cada vez más bajo el control de la Triple Alianza, específicamente las ciudades importantes de Texcoco y Tenochtitlan. La mejor evidencia etnohistórica de este cambio es la desaparición de referencias a pueblos que suministran obsidiana como un homenaje y su reemplazo por productos agrícolas.

Sin embargo, considerando otros yacimientos dentro del centro de México y de áreas circundantes [Healan \(1993\)](#) menciona que el modelo de tributo proporciona un medio eficaz para llevar muchos tipos de materiales distintos de la obsidiana a las manos del estado. [Parry \(2001\)](#) menciona que, en el área de origen de Las Navajas, donde macro núcleos se fabricaron en grandes cantidades y se exportaron, estos fueron transportados al menos 90 km (hasta Tenochtitlan).

5. Discusión

La presente investigación se ha concentrado en resolver la problemática sobre la comprensión geoarqueológica del yacimiento de obsidiana verde oscura-dorada de Sierra de las Navajas (SLN). A partir del objetivo principal de este trabajo se construyó una discusión que consiste en explicar la relación geológica que existe en las técnicas mineras prehispánicas a profundidad y a cielo abierto.

Los fenómenos volcánicos involucrados en la formación de este yacimiento paulatinamente han llevado a construir una discusión sobre su origen y sus formas de explotación. En este apartado se abarca la ocurrencia geológica de la obsidiana, la formación volcánica del yacimiento, la naturaleza petrológica de la obsidiana y el grado de complejidad social que se registró en Mesoamérica derivado de la explotación de obsidiana de SLN.

5.1 Geología de Cerro de las Navajas y evolución del paleo-volcán Sierra de las Navajas

Geológicamente hablar sobre la formación de la obsidiana de Sierra de las Navajas (SLN) es reflexionar sobre su identidad petrogenética. Es tal el caso, donde la discusión se dirige hacia comprender la distribución espaciotemporal del volcanismo hiperalcalino de SLN como yacimiento. La SLN se ubica en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) y sus características petrogenéticas, geológicas y volcánicas, son únicas en esta provincia geológica ([Lighthard, 2001](#); [Núñez-Velázquez, 2018, 2019](#)).

La SLN es un estratovolcán extinto con vestigios de actividad volcánica principalmente de tipo plineana. Estratigráficamente se estima una edad para el paleo estrato volcán de 2.41 a 1.87 Ma ([Lighthard, 2001](#)). A lo largo de este lapsus de tiempo, pulsos eruptivos en etapas constructivas y destructivas, fijaron la geomorfología actual del paleovolcán ([Lighthard, 2001](#); [Argote-Espino et al., 2010](#); [Núñez-Velázquez, 2018](#)).

La evolución del paleo edificio volcánico evidentemente está relacionada con sus momentos eruptivos. Según [Lighthard \(2001\)](#) la geomorfología de SLN es el

producto de una erupción horizontal tipo volcán Santa Elena. Es posible identificar la ruptura del paleo-edificio volcánico por medio de un colapso, que [Núñez-Velázquez \(2018\)](#) propone como un momento de inflexión en la historia evolutiva del paleo-volcán, el cual dividió en dos etapas: Pre-colapso (constructiva) y Post-colapso (destructiva).

La geología de Cerro de las Navajas—porción SO de SLN—consiste en una estratigrafía compuesta, que [Donato et al. \(2017\)](#) describen como una secuencia de un depósito pumicítico de caída libre tipo Stromboliano, seguido de una oleada piroclástica, a la cual la sobreyace un derrame de lava con una base brechada donde se encuentra la obsidiana verde. En el presente trabajo se pudo dividir esta secuencia estratigráfica en por lo menos dos unidades volcánicas: Unidad de Corrientes Piroclásticas (UCPD) Densas y Unidad Fluidal Itztetl (UFI) ([véase en Columna Estratigráfica](#)). La unidad más antigua es la UCPD, que [Lighthard \(2001\)](#) interpreta como un posible mecanismo de formación de corrientes piroclásticas densas o, al igual que [Donato et al. \(2017\)](#), como producto de un mecanismo piroclástico de caída libre para este gran paquete rocoso. [Núñez-Velázquez \(2018\)](#) asocia esta unidad con erupciones explosivas durante la etapa constructiva precolapso de SLN, provenientes de los alrededores del paleo-volcán. El trabajo de campo de esta investigación permitió detallar la estratigrafía de esta unidad, que se compone por los eventos A, B y C (Ver [Columna Estratigráfica](#)). El evento A que está formado por una lapillita de pómez ignimbrítica ligeramente lítica, presenta marekanitas de obsidiana verde <3 cm. Se analizaron petrográficamente los piroclastos juveniles, de lapillis de pómez, y se observó una mineralogía en microfenocristales de Aegirina (Aeg) + Fayaylita (Fay) –fases cristalinas típicas de magmas hiperalcalinos ([Macdonald & Bailey, 1973](#)). Así como [Núñez-Velázquez \(2018\)](#) menciona que el gran espesor observable (~20 m) e inferido de este paquete ignimbrítico está relacionada con eventos eruptivos anteriores a SLN, la ocurrencia de este evento sostiene la posibilidad de que, en los inicios del volcán, existiera algún edificio volcánico (domo de lava?), que al entrar en erupción produjera este gran paquete piroclástico de tipo ignimbrítico.

Según [Núñez-Velázquez \(2018\)](#), SLN está formado por flujos de lava, domos y por importantes depósitos de flujos piroclásticos. Las evidencias de la existencia de domos han sido reportadas en las partes más altas de SLN, en la localidad de Cruz de Milagro ([Pastrana et al., 2011](#)). Así como los autores anteriores han mencionado, el evento B está asociado a un paleo-domo de composición riolítico, con un alto contenido en litofisas y bandas de obsidiana <5 cm. En este trabajo, se reconoció petrográficamente en las litofacias de esta roca, una mineralogía en fenocristales de Aeg y microfenocristales de Aeg + Fay (asociación mineral con una afinidad magmática hiperalcalina, [Macdonald & Bailey, 1973](#)). El análisis petrográfico de las rocas de este evento, en cortes tipo PePa, permitió observar que la orientación de sus partículas denota un mecanismo efusivo. Aunque la ocurrencia de la roca en campo es subvertical, la petrografía muestra que su ambiente de emplazamiento puede ser tanto hipovolcánico como lávico. [Breitkreuz \(2013\)](#) menciona que el alto contenido en litofisas y esferulitas en la roca es una herramienta para comprender las litofacias de un proceso magmático. Las cavidades litofisales se forman en fundidos con alto contenido en sílice, presumiblemente, enriquecidos en volátiles, que se encuentran por encima de la temperatura de transición del vidrio. [Giordano et al., 2004](#) menciona que por encima de la transición vítrea las partículas sólidas vítreas se deforman de manera viscosa, permitiendo la soldadura–600 a 775°C, temperatura mínima de soldadura de los materiales riolíticos. Las observaciones de este evento permiten asociar que las rocas de Cruz de Milagro son presuntamente una zona subaérea del conducto alimentador de un paleo-domo de lava con obsidiana. Ubicado en la cima del paleo-volcán de SLN, debido a su relación de campo, este conducto alimentador del evento B estaría cortando discordantemente al evento A.

El trabajo de campo permitió observar que estratigráficamente el evento C está en contacto ligeramente discordante con el evento A. Este evento está representado por una roca de brecha piroclástica con líticos de bloques de obsidiana de color verde-oscura y verde-dorada, perlita, riolita litofisal y bloques de pómez. Los líticos de este evento, son bloques de tamaño decimétricos y centimétricos. El análisis petrográfico permitió observar microfenocristales de Aegerina (Aeg) en la

matriz de la brecha–característica mineralógica hiperalcalina (Macdonald & Bailey, 1973). En la roca resalta una textura esferulítica de tipo esférica y axiolítica, sobre la cual McPhie et al. (1993) menciona que estas texturas indican bajas temperaturas de formación (<400°C). La mineralogía obtenida por DRX en la matriz de la roca consiste en San + Anortoclasa (Ano) + Cristobalita (Cri), donde la presencia de la fase de San es consistente con la hiperalcalinidad del magma, sin embargo, la fase de cristobalita y sanidina se asocia a la presencia de litofisas y esferulitas (Breitkreuz, 2013). La petrografía en los líticos de obsidiana no mostró una gran variedad mineralógica, debido al pequeño tamaño de los cristales presentes; el análisis de DRX permitió observar que la complejidad mineralógica de la obsidiana verde-obscura es mayor a la de la verde-dorada. La obsidiana verde-obscura se identifica por la ausencia de inclusiones fluidas y la presencia de Qz + Tridimita (Tri) + Cri + Fay + Carnegieita (Carn) + Prx (microfenocristales?). Destacan las fases de Tri + Cri, como minerales polimorfos de cuarzo de alta temperatura que, en conjunto con el Qz, muestran una secuencia de enfriamiento Cri-Tri-Qz (en ese orden de cristalización); considerando las temperaturas de cierre para cada una de las fases cristalinas (Ehlers, E., 1972). La presencia de fayalita es una característica de un magma anhidro y rico en hierro, típico de una afinidad hiperalcalina en la obsidiana. Por otro lado, la obsidiana verde-dorada se identifica por el alto contenido de inclusiones fluidas y una asociación mineralógica de San + Cri + Tri, en donde se comprende la misma lógica que la obsidiana verde-obscura para la presencia de las fases Cri + Tri. Se piensa que las obsidianas pertenecían a diferentes litofacies, es decir, zonas textural y mineralógicamente distintas que, en este caso, se encuentran dentro de un derrame de lava riolítica con bandas o niveles de obsidiana. Estas litofacies manifiestan su diferencia entre la obsidiana verde-obscura y la verde dorada, producido por un cambio en el alto contenido de gases en el flujo de lava (ej. obsidiana dorada rica en volátiles).

Las características geológicas y la ocurrencia del evento C están relacionadas al yacimiento de obsidiana verde-dorada con explotación prehispánica mencionada por diferentes autores (Pastrana, 1998; Lighthard, 2004; Pastrana et al., 2011; Donato et al., 2017; Núñez-Velázquez, 2018). Por su importancia en la

presente investigación se ha considerado hacer un subcapítulo para la discusión de la formación del yacimiento.

Según la estratigrafía propuesta por [Donato et al., 2017](#), las lavas que sobreyacen a los bloques de obsidiana son una unidad volcánica, que [Núñez-Velásquez \(2018\)](#), la ubica como el último evento eruptivo que tuvo SLN. Lo describe como un evento eruptivo de composición riolítica que contiene lavas de obsidiana y vitrificados, distribuidos por diferentes zonas en la Sierra. La geología a detalle de Cerro de las Navajas realizada en el presente trabajo permite relacionar estas lavas con el evento D de la UFI. Se presentaron evidencias, de que estratigráficamente la superficie de la UCPD termina con el evento C, y la sobreyace la UFI.

El marcador estratigráfico, entre las dos unidades anteriores, es un paleosuelo de tonalidad rojiza, que es cubierto al emplazarse el evento D de la UFI. Según la estratigrafía compuesta de CN, la UFI es la unidad más joven, y, así como menciona [Núñez-Velásquez \(2018\)](#), esta se compone por una roca de composición riolítica. Se reconocieron estructuras y texturas que caracterizan a esta unidad con un comportamiento fluidal con tres litofacies: a) masivo fluidal, b) litofisal y c) base vítrea. Petrográficamente en la litofacies masiva fluidal se identificó el contenido de fenocristales de San + Aeg + Anf + Qz + Ox Fe-Ti, microfenocristales de la misma asociación mineralógica y una matriz de FA + Qz + vidrio + triquitas. En comparación de la litofacies litofisal, únicamente se reconocieron fenocristales de San, debido a la reducción de volumen rocoso por el alto contenido de litofisas.

La DRX en esta unidad muestra una asociación de Ano + Cri + San + Qz, en donde la presencia de fenocristales está asociada a las fases de Ano + San + Qz. Las vesículas asociadas a la fase de Cri en las litofacies fluidal y litofisales reducen el volumen de la matriz rocosa, y una gran parte de la matriz se compone de vidrio.

La geología de SLN reportada por diferentes autores, ha generado un conocimiento *a posteriori* sobre una variedad de obsidiana negra con fenocristales de San que presenta bandas de tonalidad marrón-grisácea ([Lighthard, 2001](#); [Donato et al., 2017](#); [Núñez Velásquez, 2018](#)). Sin embargo, la ocurrencia volcánica de esta

obsidiana negra se ha podido correlacionar estratigráfica y petrográficamente con la base vítrea del Evento D (véase Unidad Fluidal Itztetl en Geología del Área de Estudio). Los grandes fenocristales de San, que contiene la obsidiana negra, arrojaron una edad de 2.2 Ma, que se interpretó como la edad de la obsidiana (Núñez-Velázquez, 2018). Petrogenéticamente, la interpretación de la fecha que Núñez-Velázquez (2018) reporta para esta obsidiana, sugiere una edad de cristalización de los fenocristales, y no del evento eruptivo que forma a la obsidiana. Sin embargo, la edad ayuda a comprender el tiempo de formación y residencia de los fenocristales de San en la cámara magmática del paleovolcán de SLN. Esto se interpreta como una etapa de diferenciación magmática dentro de la cámara que podría variar en un rango de cientos de miles de años.

5.2 Ocurrencia geológica de la obsidiana verde-dorada del yacimiento de Cerro de las Navajas

La naturaleza geológica del yacimiento ha sido mencionada y discutida por diferentes autores (Pastrana, 1998; Lighthard, 2001; Lighthard, 2004; Pastrana, et al. 2011; Donato et al., 2017). En el estado actual del conocimiento, Sierra de las Navajas (SLN) se comprende en su totalidad como un yacimiento de obsidiana. Sin embargo, a través del trabajo de campo del presente estudio, fue posible reconocer que la obsidiana aparece en toda la Sierra principalmente como depósitos piroclásticos. En los cuales varían la cantidad de obsidiana, el volumen de sus bloques y su calidad vítrea. El principal interés de la arqueología y la discusión científica sobre el yacimiento de SLN recae en la localidad de Cerro de las Navajas. En esta localidad se presenta la actividad prehispánica asociada a la explotación de obsidiana más importante en toda la Sierra. Por lo tanto, se considera importante comprender la evidencia volcánica que compone a esta zona y su correlación con la formación de la obsidiana.

Según algunos autores su formación básicamente se explica como un lahar de un domo de lava, con una costra de obsidiana de composición riolítica (Pastrana, 1998; Pastrana et al., 2011). En la cima de la SLN, en la localidad de Cruz de Milagro, todavía yacen vestigios de las partes laterales del domo (Pastrana et al.,

2011), y que se correlacionan con el Evento B propuesto en este trabajo. [Donato et al. \(2017\)](#) mencionan que existen evidencias de campo para relacionar el lahar propuesto por dichos autores con una actividad de corrientes piroclásticas densas; tipo depósito de flujo bloques y cenizas, tal como se propone en el presente estudio como el Evento C.

Existen otras interpretaciones del mecanismo de formación de este yacimiento, que no se relacionan con un origen piroclástico. Según [Lighthard \(2001; 2004\)](#), la presencia de este yacimiento se debe a un derrame de lava de composición riolítica que generó litofacies donde ocurría la obsidiana intercalada con capas de pómez y riolita con zonas de desvitrificación (esferulitas). Propone además que las condiciones climáticas de SLN, alteraron los niveles de pómez en arcillas y que la presión litostática del derrame fue fracturando las capas de obsidiana (altamente impermeables) comprimiéndolas y acomodándolas de manera errática.

La interpretación acerca de la naturaleza del domo de lava riolítico de obsidiana ([Pastrana, 1998; Pastrana et al., 2011](#)) ha permitido inferir varias posibilidades acerca de la formación del yacimiento. Una de ellas es la relación de campo que existe entre el Evento B y C. El trabajo de campo permitió confirmar la evidente naturaleza piroclástica del Evento C, el contacto estratigráfico entre el Evento B y C, y las relaciones de sus componentes líticos en el Evento C (presencia de bloques de obsidiana verde). Las características principales del evento C se asocian a los rasgos de un mecanismo de formación de depósito de flujo de bloques y cenizas (DFBC), un subtipo de las corrientes piroclásticas densas (CPD) en: 1) la presencia de piroclastos con dimensiones de bloques >64 mm, 2) la textura esferulítica en la matriz de la brecha piroclástica, que suponen una temperatura de alrededor de los 400°C, 3) el espesor del depósito (~12 m), 4) su distribución muy local y 5) la litofacies de oleada de base ([ver Columna Estratigráfica](#)).

El mecanismo de DFBC es común en episodios eruptivos inestables o colapsos gravitacionales de edificios volcánicos, tipo domos de lava y/o espigas de lava, de composición andesítico a riódacítico ([Brown & Andrews, 2015](#)). En el presente estudio se ha enfatizado continuamente que la composición de los

magmas de SLN es riolítica (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez, 2018). Al no concordar con las características composicionales de una erupción de tipo DFBC (Brown & Andrews, 2015), la interpretación sobre el mecanismo de su formación (Evento C) se quedaría limitada. Sin embargo, en el volcán de tipo caldera de Chaitén, Chile, en 2009 se registró un episodio eruptivo de DFBC de un domo volcánico de composición riolítica. Ocasionado por el colapso de una espina de lava con litofacies de obsidiana y de riolita microcristalina, con una composición de 75.3% de SiO₂ (Pallister et al., 2013). El episodio volcánico que experimento el domo de lava riolítico de tipo Peléeano de Chaitén, permite acuñar una hipótesis acerca de la relación que existe entre el paleo-domo riolítico de Cruz de Milagro, y el DFBC correspondiente al yacimiento de obsidiana verde obscura-dorada de SLN.

La hipótesis sobre la cronología de los eventos propuestos para el Cerro de las Navajas (CN) ubicado en el sector SO de la Sierra, permite suponer que entre el Evento A y la consumación del Evento B, entre los 2.2 y los 2 Ma, el edificio volcánico de SLN estuvo en su máximo estado de desarrollo. Para este tiempo se trataría de un estratovolcán, con un domo riolítico de obsidiana tipo Peléeano, con espinas de lava (véase como Evento B en Columna Estratigráfica y ver Fig. 49 y 50), que entraría en erupción antes del evento destructivo Post-colapso (2 Ma, según las relaciones estratigráficas de Lighthard, 2001), originando el DFBC (Evento C) de la Unidad de Corrientes Piroclásticas Densas (UCPD).

La ocurrencia en subsuelo del yacimiento de Cerro de las Navajas (Pastrana, 1998; Pastrana y Domínguez, 2009; Pastrana et al., 2011) se debe a la evolución estructural del flanco SO de la Sierra en la etapa Post-colapso. El análisis geomorfológico de las estructuras observadas y los datos estructurales de campo han permitido interpretar un proceso de reajuste estructural de esta zona producido por el evento destructivo Post-colapso. Las evidencias de estos rasgos topográficos se observaron en la actitud de la UCPD. Esta varía dependiendo de la dirección de flujo, sin embargo, constantemente se observa basculado ~30° al SE. Dicho proceso estructural ha promovido la generación de suelo y el entierro progresivo del DFBC. Por otro lado, contacto estratigráfico superior del DFBC, la UFI, se observa con una actitud subhorizontal. Esta diferencia en el basculamiento de las unidades nos

permite interpretar, que la UCPD, ya se encontraba basculada cuando se originó el Evento D de la UFI.

El trabajo de campo del presente estudio permite discutir que la naturaleza efusiva de la formación de la obsidiana, y su participación como piroclasto, no se involucra en su proceso de entierro. La propuesta de la evolución volcánica de SLN en dos escenarios posibles (Fig. 49-53) sintetiza los eventos que estuvieron involucrados hasta la formación del yacimiento (Eventos A, B y C). En estas figuras geodinámicas se puede observar que la formación del yacimiento de CN corresponde a un evento piroclástico definido que ocurre en la superficie. Sin embargo, la obsidiana se forma de manera efusiva, como litofacies en derrames de lava riolítica que, posteriormente, se ve involucrada en un evento piroclástico de un DFBC, del cual forma parte como líticos en tamaños de bloques.

El yacimiento, estratigráficamente, se encuentra debajo de un paquete de material volcánico y suelo que varía su espesor de 20-0 m. Dicha variación se debe a los procesos de reajuste estructural de la SLN, en un sistema de fallas conjugadas NE-SO y NO-SE (Fig. 25). Este sistema de fallas escalonadas promueve el desarrollo de bajos topográficos que generan saltos topográficos en forma de semigraben. Eso permite que el yacimiento en ocasiones se encuentre aflorando y, en otras ocasiones debajo de un paquete de 20 m de sedimentos.

Para ejemplificar la discusión acerca del origen y la ocurrencia geológica de la obsidiana verde oscura y dorada, se construyeron dos modelos (escenario 1 y 2) en diagramas geodinámicos interpretando el proceso de evolución volcánica de SLN de los 2.4 Ma hasta los 2.2 Ma (Fig. 49-53). En este tiempo cronológico es posible observar los inicios de la actividad del paleovolcán de SLN (Fig. 49 y 51) y su correlación estratigráfica con otros eventos volcánicos ocurridos en la localidad de Cerro de las Navajas, y el tipo de sedimentación piroclástica del yacimiento de Cerro de las Navajas (Fig. 50 y 52).

Escenario 1

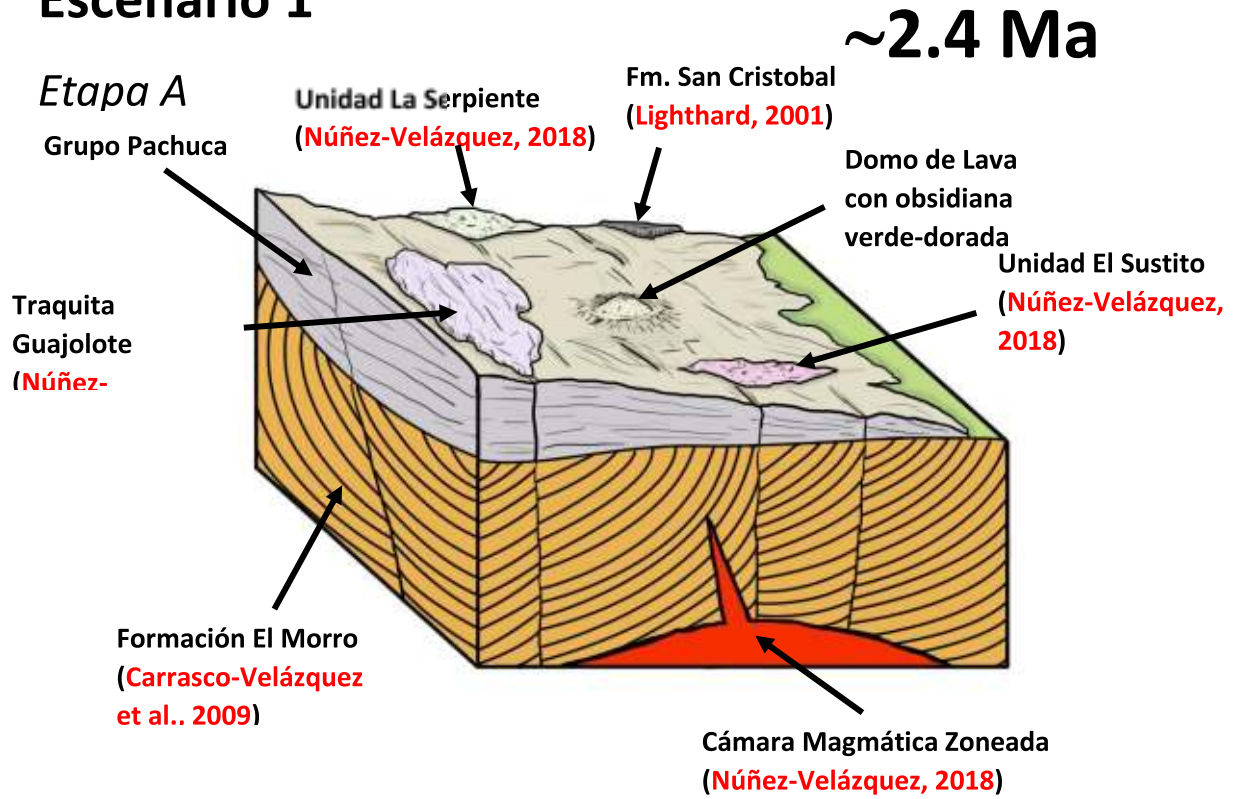


Fig. 49. Escenario 1 en la etapa A que muestra un diagrama geodinámico de la evolución de Sierra de las Navajas a los 2.4 Ma. Se presenta un discreto edificio volcánico de domo de lava de tipo peléano con obsidiana verde obscura-dorada (evento B).

Escenario 1

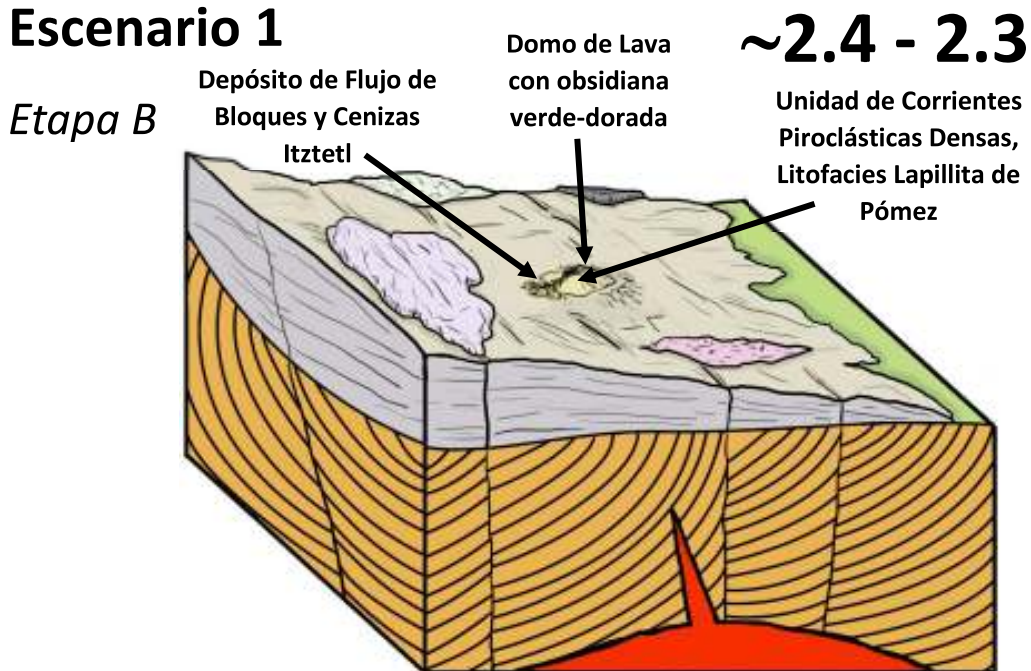


Fig. 50 Escenario 1 en la etapa B que muestra un diagrama geodinámico de la evolución de Sierra de las Navajas entre los 2.4 y 2.3 Ma. El domo de lava con obsidiana verde obscura-dorada presenta por lo menos dos etapas eruptivas que equivalen a los eventos A y C.

Escenario 2

Etapa A

Domo de Lava con
obsidiana verde
obscura-dorada

~2.4 Ma

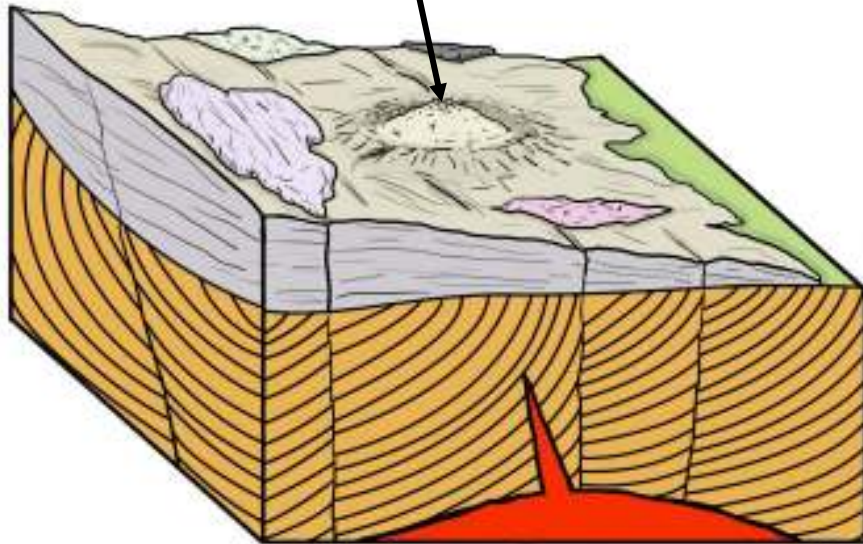


Fig. 51 Escenario 2 en la etapa A que muestra un diagrama geodinámico de la evolución de Sierra de las Navajas a los 2.4 Ma. Se presenta un edificio volcánico de domo de lava de tipo peléano con obsidiana verde obscura-dorada. (evento B) donde destaca su volumen mayor.

Escenario 2

~2.4 - 2.3 Ma

Etapa B

Depósito de Flujo de
Bloques y Cenizas Itztetl

Domo de Lava con
obsidiana verde-
dorada

Unidad de Corrientes
Piroclásticas Densas,
Litofacies Lapillita de
Pómez

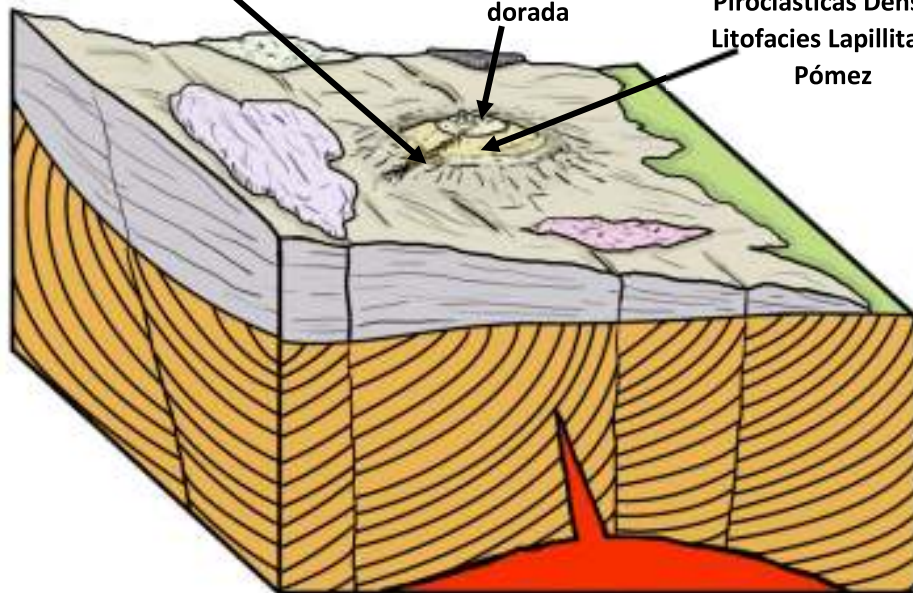


Fig. 52 Escenario 2 en la etapa B que muestra un diagrama geodinámico de la evolución de Sierra de las Navajas entre los 2.4 y 2.3 Ma. El domo de lava con obsidiana verde obscura-dorada presenta algunas etapas eruptivas, donde se manifiestan los eventos A y C, evidenciando una mayor complejidad volcánica de este edificio.

Escenario 1

~2.2 Ma

Etapa C

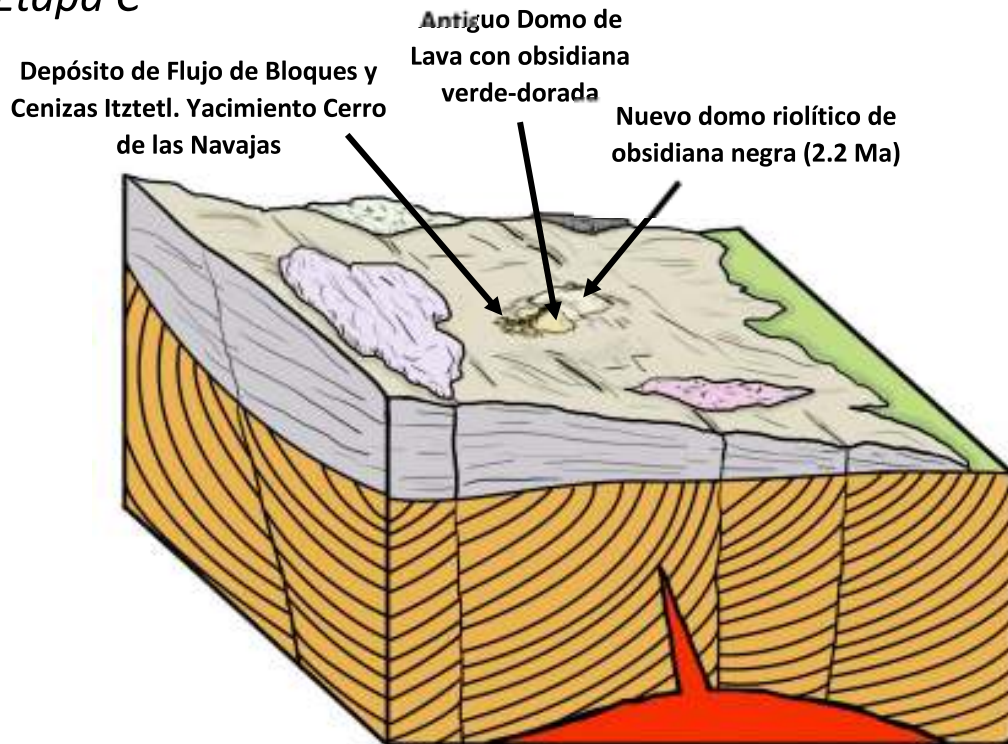


Fig. 53. El Escenario 1 presenta la etapa C que muestra un diagrama geodinámico de la evolución de Sierra de las Navajas entre los 2.2 Ma, antes del colapso estructural la Sierra a los 2 Ma (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez, 2018). Esta etapa presenta la formación de un nuevo domo con litofacies de obsidiana negra.

5.3 Implicaciones petrológicas para la caracterización de la obsidiana

La reflexión arqueométrica sobre la obsidiana verde obscura-dorada de Sierra de las Navajas (SLN), obliga a construir variables definidas que distingan la naturaleza de la obsidiana. Las obsidianas de SLN presentan características texturales que las distinguen, hasta ahora, de cualquier otra obsidiana en el mundo. El color verde, la iridiscencia dorada y, al igual que todo el complejo volcánico de SLN, su firma geoquímica de afinidad hiperalcalina (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez, 2018), son los principales rasgos petrológicos que la identifican. En el caso del yacimiento de Cerro de las Navajas (CN) se discute la importancia de los procesos volcánicos que le otorgan una identidad petrológica única a las obsidianas de esta localidad.

La pureza de la obsidiana, es decir, la ausencia de elementos sólidos en la textura de la obsidiana es importante para la talla. Las imperfecciones que pudiera

presentar el material vítreo dependen de sus características texturales. Por ejemplo, las obsidiana verde de “mala calidad” del yacimiento de CN presentan un contenido de litofisas. Según [Breitkreuz \(2013\)](#), la formación de litofisas y esferulitas corresponde a dominios fibrosos o microcristalinos, con o sin cavidades, que se forman en fundidos silicatados o en vidrio a altas temperaturas. En la masa fundida se puede comenzar la nucleación en un microlito, un fenocristal, un clasto lítico o una grieta, en la superficie de una vesícula, o en fragmentos de una brecha. Se infiere que el alto contenido de inclusiones fluidas (burbujas) de la obsidiana verde-dorada, y la ausencia de inclusiones en la verde-obscura, podrían fungir como base para el desarrollo de litofisas. Se puede interpretar como una transición de litofacies (alto contenido en inclusiones-bajo contenido-ausencia) dentro de los lóbulos de lava riolítica con obsidiana en el paleo domo del Evento B.

Petrologicamente se observaron las principales variaciones geoquímicas en las muestras de obsidiana. Según [McDonald & Bailey \(1973\)](#), mencionan que los magmas hiperalcalinos en elementos traza presentan un alto enriquecimiento en elementos traza: Hf, La, Mo, Nb, Ta, Y, Yb, Zn, y Zr, un moderado enriquecimiento en B, Be, Cd, Ga, Li, Sn y posible Th y U, así como bajas concentraciones de Sr (aunque diferentes dependiendo de si son comanditas <42 ppm o pantelleritas <12 ppm). Esto nos permitió organizar en cinco grupos característicos a toda la población elemental: a) Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra, b) Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir pero concentraciones <100 ppm, c) Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra, d) Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración) y e) Elementos que no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras ([ver Anexo Protocolo Geoquímica](#)).

Los resultados de la normalización de las obsidiana estudiadas con base en la obsidiana verde-dorada ([Fig. 40](#)) permitieron identificar la variabilidad elemental de los elementos traza que, geoquímicamente en el magma, ocurren por una identidad móvil (Sr, K, Rb, Mn), contra una identidad inmóvil (Zr, Y, Nb, Ti). Según [Vidal-Solano et al., 2013](#), las variaciones en elementos traza permiten identificar, en

rocas volcánicas, una identidad geoquímica para muestras provenientes de un mismo evento eruptivo. Así, aunque el carácter hiperalcalino del magmatismo de Sierra de las Navajas, representa la identidad geoquímica de las obsidias del evento C de CN, también permite identificar procesos de diferenciación geoquímica en el magma.

Se construyeron cocientes elementales considerando su identidad móvil e inmóvil, que muestran a la hiperalcalinidad como una tendencia (Fig. 39), y no como una discriminación entre los eventos volcánicos. Un ejemplo de esto es la muestra SLN-1810 (Marekanita del evento A), en ella es posible observar una agrupación con la tendencia general de las obsidias del evento C. Temporalmente no corresponden a un mismo evento, y se esperaría que su geoquímica evidenciara este hecho.

En la Fig. 41, se presentan tres diagramas que muestran una tendencia negativa (Fig. 41 A y C) y positiva (Fig. 41 B) de las obsidias del evento B. En la Fig. 41 (A y B) muestra que la Marekanita del evento A (SLN-1810), no sigue la tendencia principal de las muestras de obsidiana del evento B. Según Vidal-Solano et al., 2013, estos cambios pueden ocurrir debido a las variaciones geoquímicas, que identifican a los eventos A y C, y las características texturales (contenido de feno- y microfeno- cristales).

En la Fig. 42 se muestra una correlación de elementos traza principalmente móviles, que exhibe una dispersión de las muestras. Esto nos permite identificar la distribución de las muestras en por lo menos dos grupos, que se asocia a la variabilidad geoquímica en elementos móviles que presenta el magma debido a sus procesos de diferenciación magmática.

Las implicaciones de los resultados analíticos de la presente investigación han permitido comprender el fenómeno volcánico llamado obsidiana, y sus distintas particularidades, bajo el concepto de *condiciones observables significativas* (ver Anexo Protocolo Geoquímico). Se define como los elementos naturales que intervinieron o que caracterizan la formación de un geomaterial de tipo volcánico (edificio volcánico, tipo de erupción, características químicas del magma, dirección de la erupción, producto piroclástico, etc.). La hipótesis consiste en que cada zona

analizada puede presentar una identidad geoquímica común (e.j. hiperalcalina), pero con una variación en elementos traza que posiblemente, comparta con otro grupo tal y como se pudo observar en la [Fig. 39](#). Un ejemplo de esto ocurrió en el proceso analítico del estudio, donde se experimentó analizando dos cortes diferentes de las muestras SLN-1816 A3, SLN-1804 y SLN-1806. Este experimento demostró que existen concentraciones diferentes en elementos traza en una misma muestra, las cuales dependerán del plano analizado en la muestra, controladas por la petrofábrica (ver Anexo 1).

5.4 Evento C del Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas Itztetl y sus formas de explotación

Una discusión desde el enfoque arqueológico sobre la explotación y el uso de la obsidiana de Sierra de las Navajas (SLN), nos evidencia que, desde el Formativo temprano ([Cobean, 2001](#)), hasta la Colonia ([Pastrana y Fournier, 1996](#); [Pastrana et al. 2019](#)), se le considera como un punto de convergencia geológica, geográfica y social, estratégico para el desarrollo de las culturas del centro del México mesoamericano; Teotihuacan, Toltecas y Aztecas ([Pastrana, 2002](#); [Pastrana y Domínguez, 2009](#)).

[Argote-Espino y colaboradores \(2010\)](#), mencionan que el yacimiento de SLN está dividido en cuatro áreas de explotación prehispánica: Nopalillo-Durazno, Cruz de Milagro, Oyamental y Sembo. En el caso particular de este estudio, la localidad de Cerro de las Navajas (CN) se encuentra ubicado en el área de Cruz de. La ocurrencia de áreas de explotación en SLN, es el reflejo de una dinámica volcánica, que sesga la interrogativa geoarqueológica sobre los sistemas de explotación con base en las variaciones geológicas y geoquímicas que exhibe cada uno de los yacimientos de SLN.

Las condiciones geoarqueológicas del área de explotación de CN (Cruz de Milagro, [Argote-Espino et al., 2010](#)) permitieron delimitar al área como una localidad con características que la distinguen geológicamente al resto de la SLN. Por ejemplo, que el principal interés en la explotación prehispánica se concentrará en

Cerro de las Navajas, permite inferir, un conocimiento prehispánico acerca de la calidad de obsidiana que se buscaba, hacía que se minara al evento C.

La obsidiana verde-dorada y verde oscura del evento C, *in situ*, se encuentra en forma de bloques subangulosos, y lajas con tendencia curva, así como en nódulos asociados a procesos exógenos de transporte. Estos son, regularmente masivos, de tamaños decimétricos a centimétricos, y distribuidos intermitentemente en bolsas, o concentraciones de arreglos casi tabulares. Se encuentran dentro de una secuencia rocosa caracterizada como un mecanismo de formación de Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC) de la unidad de CPD. En el área de CN también se pueden presentar en forma de lápiz (fracturas verticales a la posición deposicional de flujo de los bloques o lajas). Sin embargo, nunca en forma de vetas o cuerpos continuos, como se esperaría en una unidad volcánica de tipo efusiva.

El área de explotación de CN y los vestigios arqueológicos de la intensa explotación registrada en SLN, se ubican en la localidad de Cerro de las Navajas (CN). Como se ha discutido en la presente investigación, la geología del sitio señala rasgos sobre la disposición geológica-estructural de la zona que permite comprender la ocurrencia en subsuelo del yacimiento de Cruz de Milagro, y de las estrategias de ingeniería minera utilizadas por las sociedades prehispánicas.

En materia reflexiva arqueológica se permite interpretar que, gran parte de la complejidad tecnológica para la explotación de CN se debe a la complejidad geológica de esta localidad. La comparación entre las estrategias de explotación utilizadas por las sociedades del Centro de Mesoamérica—principalmente Teotihuacan y Aztecas—es un método para comprender la cronología de explotación propuesta por [Pastrana y Domínguez \(2009\)](#) y el desarrollo de tecnología en la minería.

[Blanton et al. \(1993\)](#) menciona que el Estado, como un tipo de institución gubernamental se define especificando, que tiene una jerarquía política de al menos tres niveles—funcionarios locales, gerentes de distrito y el gobernante. En el caso de Teotihuacan como un estado multiétnico, aunque la invisibilidad de la presencia de gobernantes ([Manzanilla, L., 2017](#)), se piensa que el control de la obsidiana era en sus inicios político con intereses militares. Se permitía el comercio del material en

la ciudad para el uso doméstico, pero existía un control estatal. Aunque los aztecas también permitían el comercio en las Ciudades-Estados, el control absoluto era por el estado, principalmente para el uso militar y religioso.

Se conoce que parte de la producción de obsidiana en Teotihuacan era de utilidad exclusiva para acción de actividades del estado, tales como el militarismo y la religión. En la organización política de Teotihuacan no ha sido posible generar una relación directa entre cómo era el control de los talleres y la ciudad. Los talleres de obsidiana están distribuidos en algunas zonas de la ciudad ([Manzanilla, L., 2017](#)), por lo tanto, este oficio no se ha podido asociar a un nivel social específico.

Es conocido que, en etapas avanzadas, antes de la caída de Teotihuacan, organizaciones de élite generaron un gran peso en las decisiones de la ciudad, lo cual generó conflicto en el control del yacimiento de Sierra de las Navajas. Esto podría relacionarse con lo que [Hirth \(2008\)](#) menciona sobre la obtención de obsidiana de Xochicalco. El autor menciona que para Teotihuacan ocurren interrupciones en la adquisición de obsidiana de Sierra de las Navajas, alrededor del 650 D.C, que genera un cambio en el sitio de explotación hacia Ucareo, Michoacán, como la fuente principal de obsidiana. Según [Hirth \(2008\)](#) los datos de Xochicalco indican que la obsidiana de Ucareo y Zacualtipan reemplazó a la de SLN, como las principales fuentes utilizadas para la producción de navajas prismáticas en ese momento. Sin embargo, vestigios arqueológicos de Xochicalco mostraron que, el probablemente resurgimiento de SLN como un área fuente principal para la producción de navajas alrededor del año 850-900 DC, para la región.

[Pastrana y Domínguez \(2009\)](#) proponen, que cambios como los patrones de asentamiento, las necesidades principales prehispánicas y el control político de la obsidiana, se ven reflejados en la estrategia de explotación de este yacimiento. Un ejemplo de esto es que, actualmente, a diferencia del estado Teotihuacano (ejemplo de un estado incluyente) la sociedad Azteca se considera un estado hegemónico, vista como un imperio. La negociación en sus conquistas en el centro, occidente y sur de Mesoamérica, sin necesidad de invasión, fue principalmente política por medio del tributo.

Finalmente hemos visto que la complejidad geológica del yacimiento de obsidiana de SLN desarrolló una sofisticada ingeniería minera. El riesgo que se corría al explotar este yacimiento y la inversión de trabajo en la minería eran altos. En la ingeniería teotihuacana y azteca de extracción no es posible identificar cambios en el sistema de minado. Se recurría a tapar los túneles de minado cuando lo creían necesario, ya que un extenso uso del túnel podría ocasionar derrumbes, que provocaría pérdidas humanas, y económicas a través de las horas de trabajo.

5.5 Geoarqueología de la Sierra de las Navajas

El presente apartado reúne los principales tópicos de investigación arqueológica en Sierra de las Navajas que son discutidos, a partir del conocimiento adquirido sobre la geología y los eventos volcánicos que conforman a este aparato volcánico. Los temas como la minería de obsidiana, la presencia poblacional en la Sierra, la talla de obsidiana, el transporte del bien material y el comercio de obsidiana, se discuten considerando las características naturales geológicas y geográficas de Sierra de las Navajas.

5.5.1 Geodinámica y dinámica social en Mesoamérica

La obsidiana es un material vítreo que se origina por un proceso volcánico y subvolcánico, formado en las partes superficiales de la corteza terrestre. Su ocurrencia natural más común está relacionada con el ascenso de magma de composición riolítico (>72% SiO₂) en la corteza y la expulsión de este en forma de lava. Dicho fenómeno es muy particular, ya que depende de un cambio repentino en las condiciones termodinámicas del magma sobre la superficie terrestre, o cerca de ella, que le provocan un enfriamiento rápido.

La geodinámica interna del planeta condiciona a las zonas de la corteza donde se produce obsidiana. Entre estos procesos dinámicos del planeta, el ambiente tectónico de subducción es el principal promotor de obsidiana en el mundo (Heide & Heide, 2011), por lo tanto, su ocurrencia se concentra en puntos geográficos específicos. Dadas las condiciones geodinámicas predilectas para la formación de obsidiana, las probabilidades de que se produzca naturalmente

dependen también de las características del fluido magmático en ascenso; en especial su geoquímica, su textura, su temperatura y presión, y su reología. Estas características magmáticas, le obsequian una identidad petrológica única al vidrio de obsidiana en la historia geológica y volcánica de la región; permiten diferenciarlo entre aquellos que se producen en otras regiones del mundo.

La ubicación geográfica de estas manifestaciones volcánicas depende del contexto geológico estructural de la región, y de una actividad magmática prolongada. Tal es el caso del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), que desde el Mioceno medio (~20-11 Ma) a la actualidad—tentativamente entre los 7.5-3 Ma— (Ferrari et al., 2012), sus vestigios volcánicos de composición riolítica, que cuentan con obsidiana, se han distribuido a lo largo de la provincia.

Los yacimientos arqueológicos de vidrio volcánico se encuentran distribuidos por zonas donde ocurrió volcanismo riolítico y no se restringe únicamente a la geología del CVT. A través de la historia geológica de México en algunas de sus provincias geológicas, como la Sierra Madre Occidental (SMO), presenta grandes depósitos de vidrio volcánico relacionados a volcanismo de edad oligocénica y miocénica (Vidal-Solano et al., 2020). En especial, al NO de la SMO, en el estado de Sonora, Vidal-Solano et al. (2020) han reportado restos arqueológicos de explotación en zonas donde la obsidiana, debido al tipo de volcanismo de su formación y su dinámica tectónica, ocurre geológicamente en distintas formas (perlita y obsidiana). Sin embargo, una de sus ocurrencias más comunes es en nódulos <10 cm llamados marekanitas o lágrimas de apache (<2 cm), rodeados de perlita. Por lo tanto, es posible pensar que el desarrollo de tecnología lítica en vidrios volcánicos, para las culturas del Noroeste, no fue como se conoce en las culturas de Mesoamérica.

El conocimiento Mesoamericano sobre la manipulación de artefactos de obsidiana proviene del manejo de materiales de trabajo elaborados de rocas volcánicas como basalto, andesita o dacita (materiales típicos del CVT). El apoyo de estos elementos líticos facilita la producción de artefactos de obsidiana a través de la talla del material. Por lo tanto, los beneficios encontrados en la manipulación de estos artefactos líticos de obsidiana y rocas volcánicas, promovió el interés social

en el uso de los productos volcánicos de la región del Noroeste, Altiplano Central, Occidente y Golfo.

La obsidiana ha sido utilizada a lo largo del desarrollo cultural de las sociedades que han habitado regiones específicas de México, en especial Mesoamérica. Por sus características físicas, de dureza, fragilidad, textura vítrea y tipo de fractura que produce agudos filos, la obsidiana en Mesoamérica se utilizó para elaborar instrumentos cortantes como navajas y cuchillos, armas penetrantes como puntas de flechas y de dardos; también se tallaron y pulieron objetos religiosos como espejos, cetros e insignias.

5.5.2 Principales Yacimientos de Obsidiana en Mesoamérica

El beneficio social en Mesoamérica adquirido por el uso de la obsidiana, como bien material, generó un amplio interés para la obtención de este recurso. La dinámica social generó explotación, por lo cual convertiría en un yacimiento arqueológico a cualquier vestigio volcánico de obsidiana con restos materiales muebles e inmuebles de explotación como minas, trincheras, martillos de piedra e instrumentos de madera.

Los principales yacimientos arqueológicos de obsidiana con explotación prehispánica en Mesoamérica se encuentran a lo largo de todo el CVT (Fig. 1). La importancia de cada uno de ellos varía dependiendo de la calidad vítrea de la obsidiana, la abundancia o el volumen del recurso natural, la forma y dimensiones de los bloques o fragmentos de obsidiana, y la complejidad de la extracción del recurso. El interés entre las sociedades mesoamericanas sobre los diversos yacimientos arqueológicos y la jerarquía otorgada a cada uno de estos fue diferente. Principalmente dependía del momento cronológico de cada cultura, el interés político, y la ubicación geográfica del yacimiento y su cercanía con este.

El impacto social de un yacimiento de obsidiana recae principalmente en el desarrollo cultural que este promueve en una o varias regiones, o bien, por la larga secuencia de explotación de un determinado yacimiento para una o varias culturas. Los yacimientos arqueológicos más destacados de obsidiana en Mesoamérica son Sierra de las Navajas, Otumba, Zinapécuaro y El Chayal, en donde Sierra de las

Navajas y Otumba abastecieron a las sociedades del Centro; Zinapécuaro a las sociedades de Occidente y El Chayal al Sureste.

5.5.3 Origen geológico del yacimiento Sierra de las Navajas: Cerro de las Navajas
Según los datos obtenidos en la presente investigación, se interpreta que Sierra de las Navajas (SLN) es un paleo estratovolcán de composición riolítica con una afinidad química hiperalcalina que, en los inicios de su actividad volcánica hace ~2.4 Ma, crece un domo de lava de tipo Peléeano dentro del edificio volcánico. La inestabilidad estructural del edificio generó un colapso gravitacional del flanco NE, provocando una gran erupción horizontal de tipo Santa Elena (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez, 2018) que culmina la actividad de este aparato volcánico hace ~2.0 Ma.

El domo de lava desarrolló litofacies de obsidiana verde oscura-dorada, en forma de bandas dentro del flujo de lava (Ver Geología del Área de Estudio y Columna Estratigráfica). Aparentemente solo en este domo de lava, que tuvo diferentes etapas eruptivas, se generaron las áreas que presentan una mayor intensidad de explotación del yacimiento arqueológico de Sierra de las Navajas. La ocurrencia del domo de lava permite interpretar que, la evolución del volcanismo en SLN pueda establecerse bajo una cronología basada en por lo menos tres etapas: a) 2.4 Ma Origen del volcanismo hiperalcalino relacionado con la formación del domo de lava de tipo Peléeano que originó a la obsidiana verde-dorada, b) 2.2 Ma Erupciones explosivas consecutivas de Corrientes Piroclásticas Densas (CPD) que dispersan al SO y SSO bloques o fragmentos de la obsidiana verde-dorada y c) 2.0 Ma la destrucción del paleo volcán por medio de una gran erupción tipo Santa Elena que provoca el depósito de material volcánico hacia el NO y NNO.

Las etapas eruptivas en SLN distribuyeron la obsidiana del domo por toda la Sierra, en cantidades diferentes y con volúmenes variados. De manera general, cada una de estas etapas volcánicas se relaciona con un área de explotación de obsidiana específica en la Sierra. Por ejemplo, los vestigios geológicos de la etapa a) es posible observarlos en la localidad de Cruz de Milagro (Fig. 13), los de la etapa b) al SO de la Sierra en la localidad de Cerro de las Navajas y los de la etapa c) en

la localidad de Sembo, al NO de la Sierra. Sin embargo, La *etapa eruptiva b)* está dividida en varios pulsos eruptivos (véase Fig. 49-53), tanto efusivos (lávicos), como explosivos (piroclásticos), que corresponden al crecimiento de espigas de lava en el domo y a su constante inestabilidad gravitacional.

En uno de los pulsos eruptivos de la *etapa b)* se produce un Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC, un depósito derivado de un tipo mecanismo eruptivo de una CPD), llamado *Itztetl* por su categoría arqueológica. El cual procede de una explosión volcánica que parte al domo y genera un flujo piroclástico rico en fragmentos. Este DFBC se caracteriza por contener grandes bloques de obsidiana verde oscura-dorada, perlita, riolita y pómez, que quedaron suspendidos en una abundante matriz de ceniza. Regularmente, esta matriz por su alto contenido en partículas de ceniza vítrea tiende a alterarse. Su alteración corresponde a la transformación del vidrio, del cual, se descomponen las cenizas a arcillas. Este proceso resulta de la absorción de la humedad en esta roca, que puede derivar de las condiciones meteóricas en el área.

Las condiciones climatológicas húmedas del área, que provocan la alteración de la ceniza en los depósitos piroclásticos de caída libre, generan la producción de un paquete importante de suelo volviendo escasa la distribución de afloramientos geológicos en la Sierra (ver Geología del Área de Estudio). Sin embargo, gracias a la minería moderna de obsidiana y de pómez en la localidad de Cerro de las Navajas, es posible observar, la relación geológica del DFBC (Véase Geología del área, Columna Estratigráfica y Fig. 44).

Las características geológicas del yacimiento arqueológico de SLN, en la localidad de Cerro de las Navajas, muestran que la obsidiana se presenta como líticos piroclásticos en tamaño de bloques (fragmentos de roca mayores a 6 cm acarreados por la erupción explosiva). Normalmente se observan subangulosos, y como lascas de tendencia curva, producto de la fragmentación de los bloques durante su transporte de tipo explosivo; así como nódulos asociados a procesos exógenos de transporte.

5.5.4 Color, calidad y textura de Sierra de las Navajas

El reconocimiento sobre la existencia de un depósito de obsidiana de características especiales desencadenó un interés para las sociedades prehispánicas. La obsidiana en otros yacimientos de Mesoamérica es de color negro o gris y su extracción es mayoritariamente por medio del minado a cielo abierto. La obsidiana de Sierra de las Navajas (SLN), en cualquiera de sus depósitos, es de color verde oscura (verde botella) con variaciones de verde dorada. La textura de la obsidiana verde oscura regularmente se encuentra ausente de elementos sólidos que perjudiquen su calidad. Por otro lado, texturalmente la obsidiana dorada despliega destellos dorados iridiscentes, producto del reflejo de la luz en el alto contenido de micro litofisas (burbujas) con componentes en su interior en forma de inclusiones fluidas. Las micro litofisas se encuentran ordenadas y orientadas según la dirección original del flujo de lava (Ver Fig. 34 A, B y C). Su alto contenido le otorga una densidad menor comparada con la obsidiana verde oscura.

Los objetos naturales de color verde fueron de gran relevancia para las culturas prehispánicas. Por ejemplo, según [Saunders \(2001\)](#), para los Aztecas, el jade pertenecía a los gobernantes, se creía que atraía la humedad, tenía una calidad magnética y otorgaba verdor y fertilidad al área que lo rodeaba. Las piedras de color verde (coloquialmente llamado jade) y las plumas de quetzal son un ejemplo de los objetos de color verde que tenían uso único para la élite gubernamental. En el caso de la obsidiana verde de SLN su uso no era único como accesorios ornamentales del gobierno o de los grupos de élite. Su calidad y su prestigio promovía su uso en la confección de armamento militar, en actividades domésticas, y en la producción de artefactos mágico-religioso ([Pastrana y Domínguez, 2009](#); [Pastrana y Carballo, 2017](#)).

La arqueología experimental en artefactos líticos ha permitido reconocer que la calidad vítrea de la obsidiana de SLN promueve una buena talla con técnica de percusión. La calidad de la obsidiana depende de sus elementos sólidos que la componen. Por lo tanto, el estudio petrográfico con respecto a la petrofábrica de las obsidianas, desarrollado en la presente investigación, ha ayudado a identificar que la calidad vítrea entre los tipos de obsidiana varía. Los trabajos petrográficos de

Ordoñez (1901) en obsidias y el descubrimiento de elementos cristalinos en su estructura textural interna, demostraron que las obsidias son más que solo vidrio. La deuda histórica con Ordoñez, el padre de la geología mexicana, permitió discutir en la presente investigación la retórica clásica y el pensamiento ortodoxo de la geología sobre las obsidias. Petrográficamente se ha observado que las diferencias texturales entre la obsidiana verde oscura y verde dorada tienen una repercusión en la talla. Por ejemplo, en la obsidiana verde oscura la presencia de elementos sólidos, en escala de micras, desvía ligeramente las fracturas producidas por los golpes de talla. Por otro lado, en la obsidiana verde dorada el alto contenido de litofisas con inclusiones fluidas altera la fractura. Una limitante en el uso de este material vítreo es que pierde muy rápido su filo. Por ello, la sociedad en general debía tener un abastecimiento suficiente y un conocimiento aprendido de talla, porque parte de su prestigio social, su uso y maleabilidad permitía una talla rápida de navajas o cuchillos bifaciales. Se considera que la obsidiana es un recurso estratégico y un bien inalienable. El oficio especializado del tallador probablemente solo regía en la manufacturación de objetos religiosos y de prestigio para el Estado.

5.5.5 Explotación prehispánica de obsidiana en Sierra de las Navajas

La obsidiana, como recurso natural de explotación, varía en su volumen dependiendo de la *etapa eruptiva* a la que se encuentre asociada. Pastrana (1998) menciona que la formación del yacimiento de Sierra de las Navajas está asociado a la formación de un domo de lava de composición riolítica y la posterior destrucción de este. Todo el proceso volcánico efusivo y piroclástico involucrado en la formación del yacimiento, propuesto por dicho autor, aproxima una primera reflexión acerca de distintas etapas eruptivas que involucran al yacimiento arqueológico. La complejidad geológica del yacimiento permite comprender su heterogeneidad, es decir que, en los procesos que involucraron a la evolución volcánica de Sierra de las Navajas, se generaron diversas áreas de explotación diferenciadas por su calidad.

El origen de la obsidiana en cada una de las áreas de explotación en Sierra de las Navajas se relaciona directamente con las etapas eruptivas del volcán. Por

ejemplo, en Cruz de Milagro la obsidiana está asociada principalmente a la *etapa eruptiva a)* como litofacies en forma de bandas <5 cm (ver como “Evento B” en *Geología del Área de Estudio y Columna Estratigráfica*). Según Pastrana (1998, 2002) Cruz de Milagro presenta vestigios arqueológicos de minado a cielo abierto. Sin embargo, aunque las evidencias geológicas de obsidiana en Cruz de Milagro están asociada principalmente a la *etapa a)*, la explotación prehispánica en esta localidad ocurrió gracias a la presencia de pequeños vestigios de la *etapa b)* (bloques de obsidiana), expuestos en superficie como afloramientos.

El sistema de minería prehispánico en Sierra de las Navajas se basaba en un proceso de exploración empírico y de extracción, único en Mesoamérica, por medio del minado a cielo abierto y a profundidad. Por ejemplo, los sistemas de explotación de obsidiana en la Sierra de Ahuiculco son principalmente a cielo abierto. Esto se debe a que la ocurrencia geológica de la obsidiana negra de dicha localidad se encuentra en superficie aflorando como litofacies de flujos de lava. El yacimiento de la Sierra de Ahuiculco ha presentado etapas eruptivas principalmente efusivas que han mantenido los flujos de lava con obsidiana intactos (sin actividad piroclástica). Por lo tanto, los sistemas de explotación prehispánicos en la localidad presentaron una complejidad distinta en su exploración, y en su extracción.

A diferencia de otros yacimientos arqueológicos de obsidiana en Mesoamérica, Sierra de las Navajas presenta en un sector reducido el recurso natural expuesto en superficie (localidad de Cruz de Milagro); principalmente se encuentra sepultado (localidad de Cerro de las Navajas) y también, parcialmente erosionado (localidad de Sembo y Cruz de Milagro), como una consecuencia de la evolución volcánica-estructural de la Sierra. La obsidiana, en Sierra de las Navajas, se encuentra distribuida por toda ella. Sin embargo, el interés de su extracción se concentró solo en la localidad de Cruz de Milagro y Cerro de las Navajas.

El Formativo Temprano (Cobean, 2001) en Sierra de las Navajas es identificado en Cruz de Milagro, según Pastrana (2002), como el inicio cronológico de la explotación. Es posible que en el Formativo temprano la exploración “no sistematizada” de obsidiana comenzara con hallazgos ocasionales de bloques en

los depósitos piroclásticos de las periferias bajas de la Sierra como, por ejemplo, el área de explotación de la localidad de Sembo. El seguimiento y la insistencia en la extracción de obsidiana en Sembo, por medio del minado a cielo abierto, y un poco a profundidad, sugiere que, para este tipo de yacimiento arqueológico, se extrajo a los bloques de la unidad volcánica de tipo piroclástico.

Los procesos naturales de erosión en la Sierra sugieren que la obsidiana puede ser transportada por los mismos hacia las zonas topográficas bajas. Sin embargo, la ubicación de los yacimientos volcánicos en la Sierra debería de estar en zonas topográficas más altas. Por ejemplo, topográficamente, Cruz de Milagro es la zona más alta de la Sierra, alcanzando los ~3200 msnm, y es el único lugar donde geológicamente la obsidiana aflora. En el presente trabajo de investigación se interpreta que la ocurrencia natural de estos depósitos periféricos de obsidiana, hacia el N y el S en las zonas bajas de la Sierra, no es errática. Los pulsos eruptivos de las *etapas eruptivas b) y c)* que ocurrieron entre los 2.2-2.0 Ma generaron flujos piroclásticos con líticos de obsidiana, que pudieron alcanzar distancias relativamente lejanas (1 Km) del punto de emisión. Debido a la gran energía de las erupciones explosivas, que generaron a esos flujos piroclásticos, y a la distancia recorrida hasta su depósito, los fragmentos líticos, como la obsidiana, no alcanzaban a tener grandes dimensiones volumétricas. El aprovechamiento de estos bloques solo producía algunas navajas y cuchillos bifaciales pequeños, sin embargo, el uso indispensable de artefactos de obsidiana demandaba exponencialmente más producto en las sociedades prehispánicas. Tentativamente la ausencia de concentraciones importantes de obsidiana en las zonas bajas de la Sierra llevó a que la exploración, alrededor de la época del Formativo Temprano, ascendiera hacia las zonas altas. En este caso la localidad de Cruz de Milagro debió de ser el primer reconocimiento de obsidiana dentro de la Sierra. Sin embargo, el aborto en Cruz de Milagro, como área de explotación, probablemente se generó debido a las bajas concentraciones de obsidiana asociado al *evento eruptivo b)* que se presentan en la localidad. Esto llevó a que los métodos de exploración prehispánicos perfeccionaran sus estrategias, migrando la explotación hacia las zonas medias al SO de la Sierra, en la localidad de Cerro de las Navajas.

Arqueológicamente se desconoce cómo fue el hallazgo del DFBC, que serviría como el yacimiento de obsidiana con la mejor calidad vítrea en toda la región del Altiplano Central. Desde una perspectiva geoarqueológica, es posible sugerir que, el sistema de fallas NO-SE y NE-SO, de la región SO de la Sierra, desenterró zonas de la etapas eruptivas b) (**Evento A y C, ver Columna Estratigráfica**) que se manifestaron en superficie como afloramientos. Por ejemplo, en la porción SO de Sierra de las Navajas, la explotación de pómez como material de construcción por medio de minería moderna (Mina de Pómez del Nopalillo y Alfajayucan, **Ver Geología del Área de Estudio**) comenzó por el descubrimiento de estos afloramientos. En ese caso, gracias a la relación estratigráfica de Cerro de las Navajas es posible mencionar que la presencia del DFBC con bloques de obsidiana, pudieron ser identificados en superficie como zonas desenterradas en la localidad de Cerro de las Navajas en las primeras caminatas de reconocimiento exploratorio en la Sierra.

La extracción intensificada en Sierra de las Navajas se concentró en Cerro de las Navajas gracias al reconocimiento de dichos afloramientos. El trabajo geológico de campo de la presente investigación permitió observar que la concentración principal de los líticos de obsidiana del DFBC y su distribución como yacimiento arqueológico se encuentra ubicada en la localidad de Cerro de las Navajas (**Ver Fig. 23** Mapa de Geología de Cerro de las Navajas, y ver como “Evento C” en Columna Estratigráfica). Gran parte del *evento eruptivo b)*, se encuentra sepultado bajo un espesor variado de sedimentos de suelo y, en ocasiones, por debajo de una unidad volcánica fluidal (Unidad Fluidal Itztetl, **véase como Evento D en Columna Estratigráfica**). Esto ocurre debido al comportamiento escalonado del sistema de fallas en el SO de la Sierra que produce el basculamiento de Cerro de las Navajas desde hace 2.0 Ma a la actualidad (**Ver Fig. 25**).

El proceso estructural de la Sierra generó el entierro natural del DFBC en Cerro de las Navajas. La incertidumbre de la exploración geológica del DFBC llevó a crear estrategias con base en prácticas empíricas que ayudaran a delimitar el área de explotación de Cerro de las Navajas. La exploración del subsuelo se llevaba a cabo cavando hoyos, perforando el suelo con instrumentos de madera y martillos

de basalto. Se acortaban los límites espaciales del área en explotación buscando las zonas del área con mejor calidad de obsidiana. Las perforaciones eran abortadas cuando no se encontraban bloques de obsidiana con la calidad buscada, cuando la unidad volcánica (Unidad Fluidal Reomórfica Itztetl) se interponía en la excavación, o cuando era nula la presencia del recurso (Ver en Fig. 54 contacto entre Unidad Fluidal Reomórfica y la explotación prehispánica).

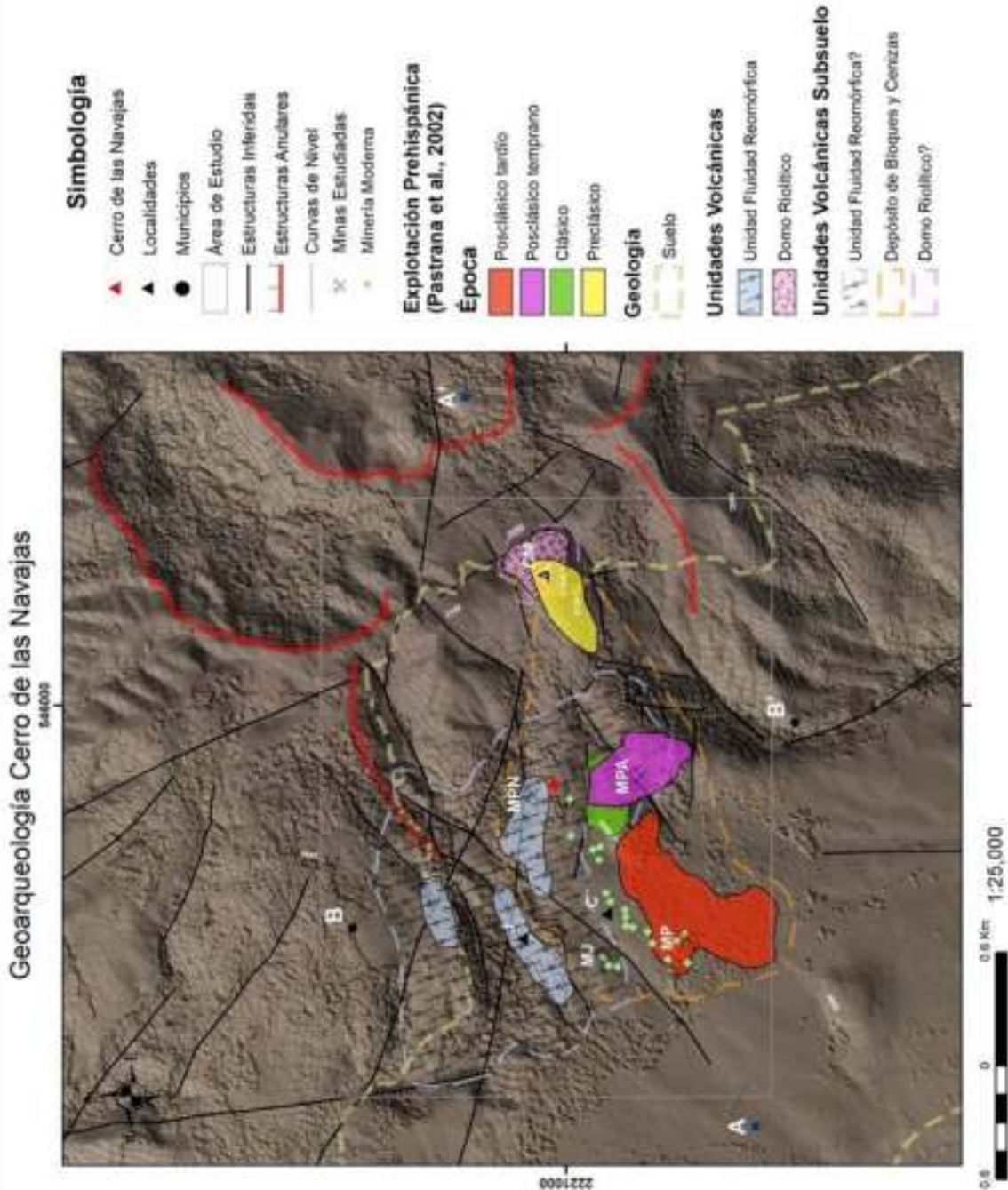


Fig. 54. Mapa geoarqueológico de la localidad de Cerro de las Navajas. Se muestran la distribución espacial de las principales unidades volcánicas que ocurren en forma de afloramientos (UFI, Unidad Fluidal Itztetl), y de manera subterránea (DFBCI Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas Itztetl, yacimiento de obsidiana verde oscura-dorada). Asimismo, se observan las principales estructuras inferidas (fracturas y/o fallas), las cuales controlan la disposición geológica del área. La distribución cronológica de explotaciones prehispánicas (Pastrana, 2002), y los lotes de la minería moderna de obsidiana coinciden en un mismo espacio asociado a la cartografía subterránea e interpretada del DFBCI.

5.5.6 Dominio político y económico de Sierra de las Navajas

El yacimiento de obsidiana de Sierra de las Navajas abasteció durante ~1800 años principalmente a las sociedades del Altiplano Central. Su evidencia arqueológica muestra que el yacimiento fue explotado desde el Formativo Temprano (Cobean, 2001), pasando a una etapa de intensa explotación desde el Preclásico tardío hasta la época de la Colonia (Pastrana, 2002; Pastrana y Domínguez, 2009; Pastrana y Fournier, 1996; Pastrana et al. 2019), considerándolo la fuente principal del desarrollo de los estados Teotihuacano, Tolteca y Azteca (Pastrana, 2002; Pastrana y Domínguez, 2009).

El control político y/o territorial de este yacimiento permitió que la obtención de obsidiana se sistematizara por medio de diferentes estrategias de explotación, permanencia población, talla y transporte. Para los gobernantes aztecas, según Saunders (2001), Tezcatlipoca no solo era un dios patrón, sino que su posesión diagnóstica y epónima, el "espejo de obsidiana", era una metáfora del gobierno y el poder. La metáfora política de Tezcatlipoca sobre el bien material, por lo menos para la sociedad azteca, sostenía una necesidad sobre el control de las principales ocurrencias de obsidiana de la región. Entre ellas, destacaba Sierra de las Navajas, por su calidad vítrea y su esencia exótica.

La dificultad en la obtención del recurso natural a través del minado a profundidad, la constante demanda de obsidiana, y la distancia entre el yacimiento y las ciudades-estado (Teotihuacan ~55 Km, Tula ~85 Km y Tenochtitlán ~100 Km, en línea recta) generaron la necesidad de una organización en el transporte del bien material desde Sierra de las Navajas. El transporte de obsidiana en productos preformados requería del conocimiento de las principales vías de acceso, de las demandas del Estado y posiblemente de las rutas de comercio. La demanda de obsidiana probablemente estaba dividida en dos: el Estado y el Comercio. La necesidad de armar un ejército y la manufacturación de objetos ornamentales y religiosos era el principal interés del Estado. El comercio de la obsidiana entre la población de la ciudad y de las poblaciones periféricas se llevaba a cabo por medio de mercados regionales y locales.

Es probable que un flujo importante del bien material en Teotihuacan, Tula y Tenochtitlán fuese a través de la política hegemónica por medio del tributo y el comercio. Sin embargo, los intereses de las estrategias políticas gubernamentales también residían en la obtención de obsidiana directamente del yacimiento por medio de la especialización del trabajo, ya que era una forma segura de abastecer la demanda para el uso militar, religioso y doméstico ([Pastrana y Domínguez, 2009](#)) en las ciudades-estado y las poblaciones periféricas.

Se considera que el comercio abastecía la demanda doméstica de obsidiana, aunque durante las etapas de expansión política-militar del Estado o Imperio (Teotihuacano, Tolteca, Azteca), en lapsos de tiempo indefinido, la demanda de obsidiana no era diaria pero sí era constante. El control político del yacimiento daba libertad de uso y transporte del recurso. Los materiales arqueológicos en Sierra de las Navajas reflejan una larga secuencia de explotación prehispánica y colonial. Presenta cambios e interrupciones que denotan etapas de estabilidad y de crisis de las sociedades que lo explotaron. La organización de las sociedades prehispánicas del centro de Mesoamérica consistía en la división del trabajo por medio de la especialización de oficios, dentro de los cuales se encuentran los de exploración, minería y talla de obsidiana. La explotación del yacimiento era temporal con campañas de extracción (días o semanas) por medio del minado a profundidad. La estancia en las zonas altas de la Sierra era parcial, dependía de la carga de obsidiana solicitada y de la estación del año.

Según [Lailson, B. \(2019\)](#) este tiempo que residían los grupos de personas (familias) en el yacimiento, se combinaba con tareas de construcción de habitaciones y almacenes para las temporadas de minería. El autor menciona que actividades como el cultivo y la producción de alimentos se llevaba a cabo en las zonas bajas de la Sierra, en donde se asentaban los pueblos (Epazoyucan, en el caso de los aztecas). El proceso de explotación del yacimiento de Sierra de las Navajas, en función de una organización, la especialización del trabajo sugiere que la permanencia poblacional en las etapas de extracción y minado requería principalmente abastecimiento de recursos vitales para la estancia y el trabajo de los mineros en la Sierra.

El impulso de una ingeniería minera por parte de las organizaciones políticas de Estado y económicas de Mercado, en Mesoamérica, construyeron gran parte de la expansión cultural de Teotihuacan, Tolteca y la Triple alianza, con base en la organización especializada del trabajo y la militarización. Las áreas de explotación en Sierra de las Navajas, principalmente Cerro de las Navajas, forman parte de un sistema económico prehispánico de “producción y demanda” que consta en la explotación de obsidiana. El control político del yacimiento promovía la expansión cultural y económica a través de la militarización y el comercio. La minería prehispánica, como parte de un proceso de la especialización del trabajo, se debe a la peculiaridad de los yacimientos geológicos generados por el proceso volcánico, como los del paleo volcán de Sierra de las Navajas.

El yacimiento arqueológico de obsidiana más importante de Mesoamérica, Sierra de las Navajas, es producto de varios factores geológicos como la tectónica de placas, la petrogénesis de los magmas y la actividad volcánica en la provincia del CVT, en particular en la región S-SE del estado de Hidalgo. Actualmente la economía local en Sierra de las Navajas se lleva a cabo a través de la minería de obsidiana por los habitantes del ejido del Nopalillo. Se siguen produciendo los métodos de exploración a prueba y error, apoyándose en los vestigios arqueológicos de la minería prehispánica. La especialización del trabajo de la minería moderna de obsidiana recurre a las necesidades económicas de un sistema de mercado. La explotación actual del DFBC se sustenta principalmente en la exportación de la materia prima y el comercio de piezas de obsidiana pulidas. Las piezas son pulidas con máquinas motorizadas, se comercializan con el turismo local en Sierra de las Navajas y la venta a comerciantes externos que transportan la obsidiana como materia prima, y piezas terminadas a la zona arqueológica de Teotihuacan. La técnica de talla de obsidiana por percusión se ha ido recuperando gracias a las investigaciones arqueológicas y a la arqueología experimental en la zona de Sierra de las Navajas.

6. Conclusión

Sierra de las Navajas es un paleo estratovolcán de composición riolítica de afinidad hiperalcalina, que surgió hace ~2.4 Ma (Lighthard, 2001), y culmina su actividad con una erupción explosiva de tipo piroclástica horizontal, que generó el colapso estructural del paleo-edificio a los ~2 Ma (Lighthard, 2001; Núñez-Velázquez, 2018). En la localidad de Cerro de las Navajas se encontró que, antes de los 2.2 Ma, ocurrió un evento eruptivo de tipo explosivo, que generó un Depósito de Flujo de Bloques y Cenizas (DFBC). Los líticos contenidos en este depósito son los bloques de obsidiana verde-dorada, que han sido minados desde tiempos precoloniales, y que se remiten a la erupción local de un domo de lava de composición riolítica, entre los ~2.4 y 2.2 Ma.

El proceso evolutivo y el reajuste estructural del paleo-volcán de Sierra de las Navajas (SLN) después de la gran explosión a los 2 Ma, dispuso a las unidades volcánicas de Cerro de las Navajas (CN) a su basculamiento, de tal manera que, el DFBC fue sepultado por eventos volcánicos posteriores y el desarrollo de un paquete de suelos. El Intemperismo y la erosión de las unidades volcánicas que componen la montaña, aunados a las condiciones fisonómicas de un bosque templado, propiciaron una gran producción de suelo en la región, desde el Pleistoceno a la actualidad. El suelo en conjunto con las unidades volcánicas tobacíticas son el principal obstáculo en el proceso del minado.

El evento piroclástico DFBC (evento C) fue explotado, desde el Formativo temprano, hasta la época colonial, por las culturas mesoamericanas del centro y las sociedades colonizadas. Debido a los procesos de reajuste estructural de SLN, la existencia de este yacimiento, y su disposición en subsuelo, fue un promotor de estrategias de explotación para las culturas del centro de Mesoamérica. El desarrollo de una ingeniería minera y la especialización del trabajo fue necesario para la explotación del material.

El sistema político y económico en las culturas del centro de México, generó una gran demanda de obsidiana verde de Sierra de las Navajas para el uso de las

actividades productivas de la población común, de la estructura estatal, militar y comercial, el cual terminaría por generar un flujo de bienes por toda Mesoamérica.

La especificación de la búsqueda de la forma, volumen y calidad en las obsidias verdes de SLN llevó a intensificar la explotación del área de CN, abandonando los otros yacimientos a través del tiempo. La calidad del material vítreo se pudo observar en análisis petrográficos en cortes orientados de las obsidias del evento C. Estos permitieron distinguir la estructura interna en elementos sólidos (cristales, litofisas y esferulitas) que denotaran la diferencia sustancial entre la obsidiana verde-dorada y la verde oscura. El contenido mineralógico no pudo ser definido petrográficamente, sin embargo, el análisis de Difracción de Rayos X permitió distinguir una mayor complejidad mineralógica en la obsidiana verde oscura.

En la caracterización geoquímica de la obsidiana de Sierra de las Navajas, se desarrolló un protocolo para la identificación geoquímica de materiales vítreos, propuesto en el presente estudio. Se ha demostrado que la identidad de una obsidiana depende de las *condiciones observables significativas* (elementos naturales que intervinieron o que caracterizan la formación de un geomaterial), que en conjunto generan una *identidad petrológica*, compuesta principalmente por sus elementos sólidos observables (cristales, litofisas, esferulitas e inclusiones fluidas), sus elementos medibles absolutos (densidad y porosidad), y sus elementos medibles estimados (contenido mineralógico y composición química), que fueron obtenidos al considerar un arreglo en su petrofábrica.

El análisis de la *identidad petrológica* de las obsidias del yacimiento de Cerro de las Navajas permitió comprender que geológicamente el yacimiento de Sierra de las Navajas está compuesto por áreas de explotación que se formaron por procesos volcánicos distintos. Una de estas áreas corresponde al Cerro de las Navajas, presenta vestigios arqueológicos de una intensa explotación hecha por las culturas prehispánicas del Centro de Mesoamérica ([Pastrana, 1998](#); [Pastrana, 2002](#); [Pastrana y Domínguez, 2009](#)). Dicho yacimiento se compone petrológicamente de por lo menos dos tipos de obsidiana: verde dorada y verde oscura. La riqueza en materia prima fue descubierta en una secuencia cronológica de exploración

prehispánica. Las principales diferencias texturales entre las obsidiana verde dorada y obscura depende del alto contenido de inclusiones fluidas y su variación mineralógica. Un ejemplo de esto es el fenómeno óptico de iridiscencia que generan dichas inclusiones en la obsidiana verde-dorada. No obstante, estas diferencias texturales generan variaciones en la fractura producida por la talla de percusión. Eso significa que, a pesar de ser geoquímicamente la misma obsidiana, su calidad varía por la estructura interna de su textura.

El caso de los yacimientos de obsidiana ancestralmente explotados en México representa en la actualidad un reto de estudio para la arqueología, porque la geología es necesaria. En parte, el problema consiste en la falta de estudios sistemáticos sobre la procedencia y la cartografía geológica de los yacimientos, que permitan entender sus sistemas de explotación. Además de la caracterización petrológica de los materiales de obsidiana, con los que se produjeron innumerables artefactos arqueológicos fundamentales para las culturas prehispanicas.

7. Bibliografía

- Aoyama, K. (2017). Preclassic and Classic Maya interregional and long-distance exchange: a diachronic analysis of obsidian artifacts from Ceibal, Guatemala. *Latin American*, 213-231.
- Argote-Espino, D., Sole, J., Lopez-Garcia, P., & Sterpone, O. (2012). Obsidian Subsource Identification in the Sierra de Pachuca and Otumba Volcanic Regions, Central Mexico, by ICP-MS and DBSCAN Statical Analysis. *Geoarchaeology: An Internation Journal*(27), 48-62.
- Ashwell, P. A., Kennedy, B. M., Gravley, D. M., & Gischoff, A. (2017). Structures controlling permeability in lava domes. In *Influence of Volcanism and Associated Magmatic Processes on Petroleum Systems* (págs. 1-5). Oamaru, New Zealand: AAPG GTW.
- Breitkreuz, C. (2013). Spherulites and lithophysae-200 years of investigation on hight-temperature crystallization domains in silica-rich volcanic rocks. *Bull Volcanol*, 1-16.
- Brown, R. J., & Andrews, G. (2015). Deposits of Pyroclastic Density Currents. En H. Sigurdsson, *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd ed (págs. 631-648). Elsevier.
- Calder, E. S., Lavallee, Y., Kendrick, J. E., & Bernstein, M. (2012). Lava Dome Eruptions. En H. Sigurdsson, *Encyclopedia of Volcanoes*, Second edition (págs. 343-362). Elsevier.
- Carballo, D. (2011). Obsidian and the Teotihuacan State: weaponry and ritual production at the Moon Pyramide. University of Pittsburg and Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carrasco-Velazquez, B., Martinez-Hernandez, E., & Ramirez-Arriaga, E. (2009). Estratigrafía de la Formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapán Hidalgo. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 403-417.
- Cobean, R. H. (2002). Un Mundo de Obsidiana: Minería y Comercio de un vidrio volcánico en el México Aniguo. *A World of Obsidian: The Mining and*

- Trade of a volcanic glass in ancient Mexico. México, D.F.: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Donato, P., Barba, L., De Rosa, R., Niceforo, G., Pastrana, A., Donato, S., . . . Crisci, G. (2017). Green, grey and black: A comparative study of Sierra de las Navajas (Mexico) and Lipari (Italy) obsidians. *Quaternary International*, 467(B), 369-390.
- Ehlers, E. (1972). *The Interpretation of Geological Phase Diagrams*. New York: Dover Publications, inc.
- 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*, 122-149.
- Geyne, A. R., Fries, C., Segerstrom, K., Blanck, R. F., & Wilson, I. F. (1963). *Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca Real del Monte, Hidalgo, México*. Consejo de Recursos Naturales no Renovables.
- Giordano, D., Nichols, A., & Dingwell, D. (2005). Glass transition temperatures of natural hydrous melts: a relationship with shear viscosity and implications for the welding process. *Journal of volcanology and geothermal research*(142), 105-118.
- Haines, H. R., & Glascock, M. D. (2012). A Glass Menagerie of Meaning: Obsidian Exchange in Mesoamerica. C. Helmke, & J. Nielsen, *The Maya in a Mesoamerican Context: Comparative Approaches to Maya Studies: proceeding of the 16th European Maya Conference*, (págs. 197-208). Copenhagen, Dinamarca.
- Healen, D. M. (1993). Local versus non-local obsidian exchange at Tula, Its Implications for Post-Formative Mesoamerica. *World Archaeology*, 3(24), 449-466.
- Heide, K., & Heide, G. (s.f.). Vitreous state in nature—Origin and properties. *Chemie der Erde*(71), 305-335.

- Hirth, K. G. (2008). The Economy of Supply: Modeling Obsidian Procurement and Craft Provisioning at a Central Mexican Urban Center. *Latin American Antiquity*, 4(19), 435-457.
- Lailson, B. (2019). Exploraciones Arqueológicas en el Conjunto 6B del Yacimiento de las Sierra de las Navajas. En Shulze, N., Caretta, M. N., y Lailson
- Lighthard, A. (2001). The geology petrology, and geo-archaeology of Sierra las Navajas, Hidalgo, Mexico. USA: Tulane University.
- Lighthard, A. (2004). The Pachuca Obsidian Source, Hidalgo, Mexico: A Geoarchaeological Perspective. *Geoarchaeology: An International Journal*, 19(1), 71-91.
- Macdonald, R., & Bailey, K. (1973). Part 1. The Chemistry of the Peraljaline Oversaturated Obsidians. Chapter N. Chemistry of Igneous Rocks. Data of Geochemistry, Sixth Edition. Geological Survey Professional Paper, 1-37.
- López-Velarde, G.A., Vidal-Solano, J.R., Pastrana-Cruz, A., Meza-Figueroa, D.M., (2018). Geología de los yacimientos de obsidiana de Sierra de las Navajas, Hidalgo, México. Primera Reunión Nacional sobre Ciencias Aplicadas al Patrimonio, C.U. UNAM, CDMX, México.
- López, J., De los Santos, J. J., Cacho, S., & Sánchez, G. (1997). Carta Geológico-Minera Pachuca F14-11, escala 1:250 000, estados de Hidalgo, Querétaro, Estado de México, Veracruz y Puebla. Pachuca, Hidalgo: Consejo de Recursos Minerales.
- Manzanilla, L. (2017). Teotihuacan, ciudad excepcional de Mesoamérica. Ciudad de México: El Colegio Nacional.
- McPhie, J., Doyle, M., & Allen, R. (1993). Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. CODES Key Centre.
- Núñez-Velazquez, M. (2018). Volcán las Navajas, Estado de Hidalgo: Características Geoquímicas e Isotópicas del Magmatismo Peralcalino en la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Ciudad Universitaria, CD. MX.: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Nuñez-Velazquez, M., Martínez-Serrano, R. G., Contreras-Cruz, D., Solis-Pichardo, G., & Arrieta-García, G. (2020). Vulcanismo Hiperalkalino del Volcán Las Navajas-Hidalgo: Variaciones Isotópicas de Sr, Nd y Pb. 25 Aniversario del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (pág. 73). Ciudad Universitaria, CD. MX.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pallister, J., Diefenbach, A., Burton, W., Muñoz, J., Griswold, J., Lara, L., . . . Valenzuela, C. (2013). The Cahaten rhyolite lava dome: Eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geology*, 40(2), 277-294.
- Pastrana, A. (1998). Geología del yacimiento de la Sierra de las Navajas. En A. Pastrana (Ed.) *La explotación azteca de la obsidiana en la Sierra de las Navajas* (págs. 39-59). México, D.F.: INAH.
- Pastrana, A. (2002). Variation at the source. *Obsidian Exploitation at Sierra de las Navajas, Mexico*. En K. Hirth and B. Andrews, *Pathways to Prismatic Blades: A Study in Mesoamerican Obsidian Core-Blade Technology* (págs 15-26). Los Angeles, California: University of California.
- Pastrana, A. (2015). La importancia del estudio de los yacimientos de obsidiana. 1er Simposio sobre la investigación y caracterización de la obsidiana en México, Zapopan, Jalisco, México.
- Pastrana, A. (2017). Obsidiana – Análisis macroscópico y microscópico – versus - Análisis químico. 2do. Simposio sobre la investigación y caracterización de la obsidiana en México, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Pastrana, A., Fournier, P., Parry, W. J., & Otis Charlton, C. L. (2019). Obsidian Production and Use in Central Mexico after de Spanish Invasion. En T. A. Rani, *Technology and Tradition in Mesiamerica after the Spanish Invasion* (págs. 15-33). Albuquerque, New Mexico: University of New Mexico.
- Pastrana, A., & Carballo, D. M. (2016). Aztec Obsidian Industries. En D. L. Nichols, & E. Rodríguez-Alegria, *The Oxford Handbook of the Aztecs* (págs. 329-341). Austin, Texas: The University of Texas at Austin.

- Pastrana, A., Domínguez, S., & Sterpone, O. (2011). Producción y Uso de Navajas Prismáticos de Obsidiana en el Sierra de las Navajas: Fase Tlamimilolpa. En L. Manzanilla, & H. Kenneth (Edits.), Producción artesanal y especializada en Mesoamérica: áreas de actividad y procesos productivos (págs. 153-176). México, D.F.: Instituto de Investigaciones Antropológicas.
- Pastrana, A., & Domínguez, S. (2009). Cambios en la estrategia de la explotación de la obsidiana de Pachuca: Teotihuacan, Tula y la Triple Alianza. *Ancient Mesoamerica*, 129-148.
- Pastrana, A., & Fournier, P. (1998). Explotación Colonial de Obsidiana en el Yacimiento de Sierra las Navajas. Mexico, D.F.: CONACULTA.
- Pint, J. (2016). First Geologic Study of Jalisco Obsidian. Saudicaves.
<http://www.saudicaves.com/mx/lloyd/index.html>
- Sánchez, L. E., & De La Calleja, M. A. (s.f.). Carta geológico minera Pahuatlán F14-D73, esc 1:50 000. Consejo de Recursos Minerales. 1 carta y texto.
- Saunders, N. J. (2001). A Dark Light: Reflections on Obsidian in Mesoamerica. *World Archaeology*, 2(33), 220-236.
- Servicio Geológico Mexicano (2016). Carta Geológica-Minera 1:50 000 F14D82 Tulancingo, Hgo.
- Smith, M. E., & Schreiber, K. J. (2005). New World States and Empires: Economic and Social Organization. *Journal of Archaeological Research*, 3(13), 189-229.
- Solana, J. (2010). Geología regional y petrogénesis del vulcanismo silícico de la región circundante a la ciudad de Tulancingo, estado de Hidalgo. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, tesis de maestría.
- Tenorio, D., Cabral, A., Bosch, P., Jimenez-Reyes, M., & Bulbian, S. (1998). Differences in Coloured Obsidians From Sierra de Pachuca, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 229-234.
- Vidal-Solano, J. R., (2015). Origen geológico y caracterización petrológica de los depósitos de obsidiana en el NW de México. 1er Simposio sobre la

- investigación y caracterización de la obsidiana en México, Zapopan, Jalisco, México.
- Vidal-Solano, J. R., (2017). Nuevas consideraciones para la identificación petrográfica de la obsidiana: implicaciones para su caracterización física y química en México. 2do. Simposio sobre la investigación y caracterización de la obsidiana en México, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Vidal-Solano, J. R., Lozano-Santa Cruz, R., Zamora, O., Mendoza-Cordova, A., & Stock, J. (2013). Geochemistry of the extensive peralkaline pyroclastic flow deposit of NW Mexico, based on conventional and handheld X-ray fluorescence. Implications in a regional context. *Journal of Iberian Geology*, 121-130.
- Vidal-Solano, J.R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A., Lozano-Santa Cruz, R. (2020). Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 1-15.
- Villaseñor, J. A., & Malbrán, A. (2017). The Teotihuacán Obsidian Industry and the Birds of Sierra de las Navajas. En M. Paxton, & L. Staines (Edits.), *Constructing Power & Place in Mesoamerica* (págs. 31-53). Albuquerque: University of New Mexico Press.
- William, P. (s.f.). Production and Exchange of obsidian tools in Late Aztec City-States. *Ancient Mesoamerica*(12), 101-111.
- Yokoyama, I. (2005). Growth rates of lava domes with respect to viscosity of magmas. *Annals of Geophysics*, 48(6), 957-971.

8. Anexos

Se agregaron cinco apartados en formato de anexos al presente texto de tesis. Se describen algunas de las etapas de la investigación que se consideran como puntos clave en avances y aportes al proyecto de investigación de la obsidiana de Sierra de las Navajas. La relevancia de los anexos es tal, que son el fundamento metodológico de todo el trabajo de investigación.

Anexo 1: Cortes PaPa, PePa y PePe según la petrofábrica.

En geología la fábrica es el arreglo tridimensional prevalente de los componentes sólidos que constituyen a las rocas y a los geomateriales—cristales y fragmentos de roca principalmente. Es una estructura primaria y presenta un comportamiento fractal lo cual hace que su estructura no se modifique, respetando su acomodo inicial en escala tanto macroscópica como microscópica. La importancia de la fábrica en el estudio de la obsidiana es tal, que se debe considerar como el punto de partida lógico, para cualquier análisis no destructivo del material vítreo.

En una roca volcánica es importante reconocer el corte según la dirección de flujo que el afloramiento nos permite observar. Por ejemplo, la **Fig. 1**, es una imagen esquemática de Sierra de las Navajas que muestra una dirección preferencial de una erupción ficticia (flecha roja de mayor tamaño). Sin embargo es posible identificar diferentes direcciones dentro de la misma erupción (flechas rojas de menor tamaño). Esto nos dice que los cortes que estemos observando

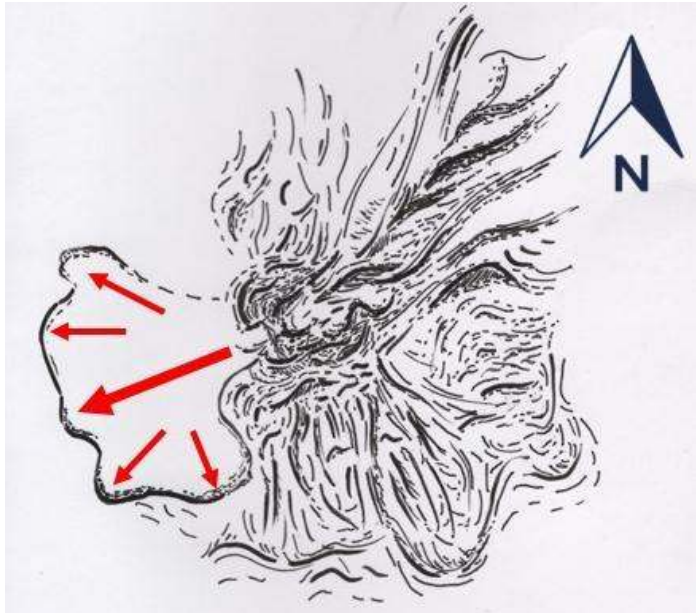


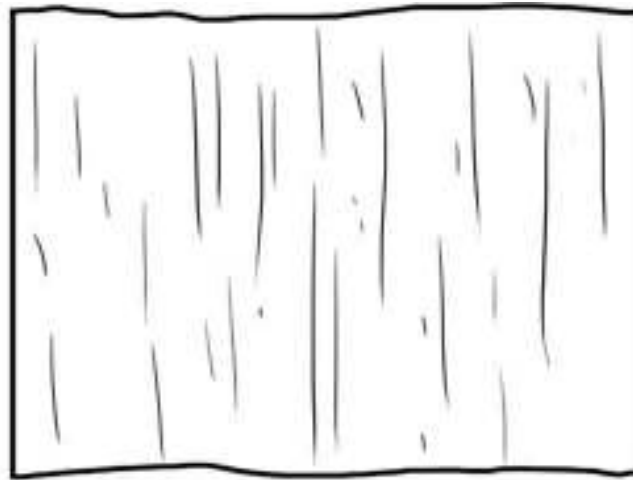
Fig. 55. Representación esquemática de una erupción ejemplificada de Sierra de las Navajas que muestra las diferentes direcciones de flujo que se pueden observar en una misma erupción.

en diferentes puntos de la erupción, van a corresponder a diferentes mediciones de dirección y de sentido de flujo.

Es importante saber que las estructuras primarias de flujo en la roca volcánica van a tener diferente comportamiento según el corte de la roca. Para esto se proponen tres cortes diferentes que permiten entender las estructuras de flujo en las rocas volcánicas –Paralelo-Paralelo al flujo (PaPa), Perpendicular-Paralelo (PePa) al flujo y Perpendicular-Perpendicular (PePe) al flujo.

Paralelo-Paralelo (PaPa)

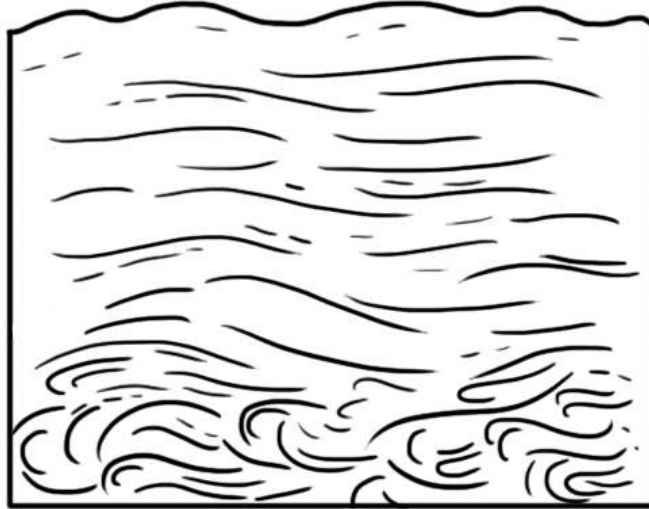
Este corte se asocia a las estructuras producto del cizallamiento entre los planos de flujo eruptivo. Por ejemplo, en esta cara la evidencia más clara son las rizaduras o las ondulaciones de flujo sobre el plano.



PaPa

Perpendicular-Paralelo (PePa)

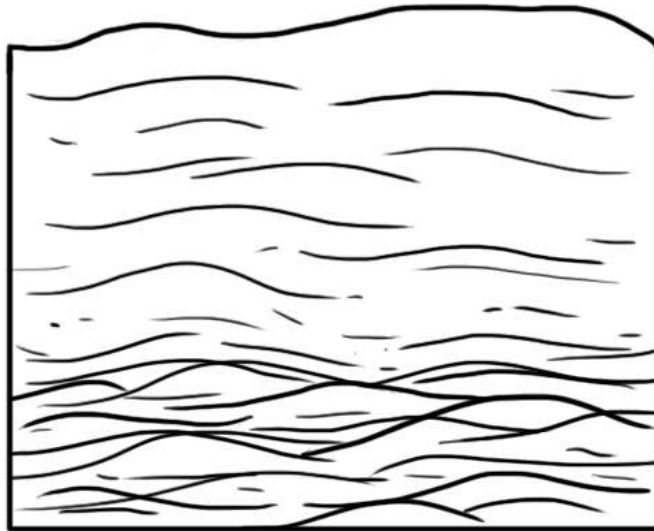
Es el corte más importante para los estudios de caracterización de la roca en campo, geoquímica y petrográfica en materiales sólidos volcánicos de flujo (rocas y vidrios). Este corte permite ver, teóricamente, un corte longitudinal perfecto en el material. Por ejemplo, en este corte sería posible identificar el eje más largo de un fiamme, de un fragmento lítico o de un cristal.



PePa

Perpendicular-Perpendicular (PePe)

Este corte muestra la cara transversal del material rocoso. En una muestra de mano sería fácil confundirlo con un corte PePa. Sin embargo la diferencia reside en las estructuras primarias que se observan en este corte. Por ejemplo, en una roca piroclástica de tipo ignimbrítica se identificaría el eje más corto de un fiamme o de un fragmento lítico.



PePe

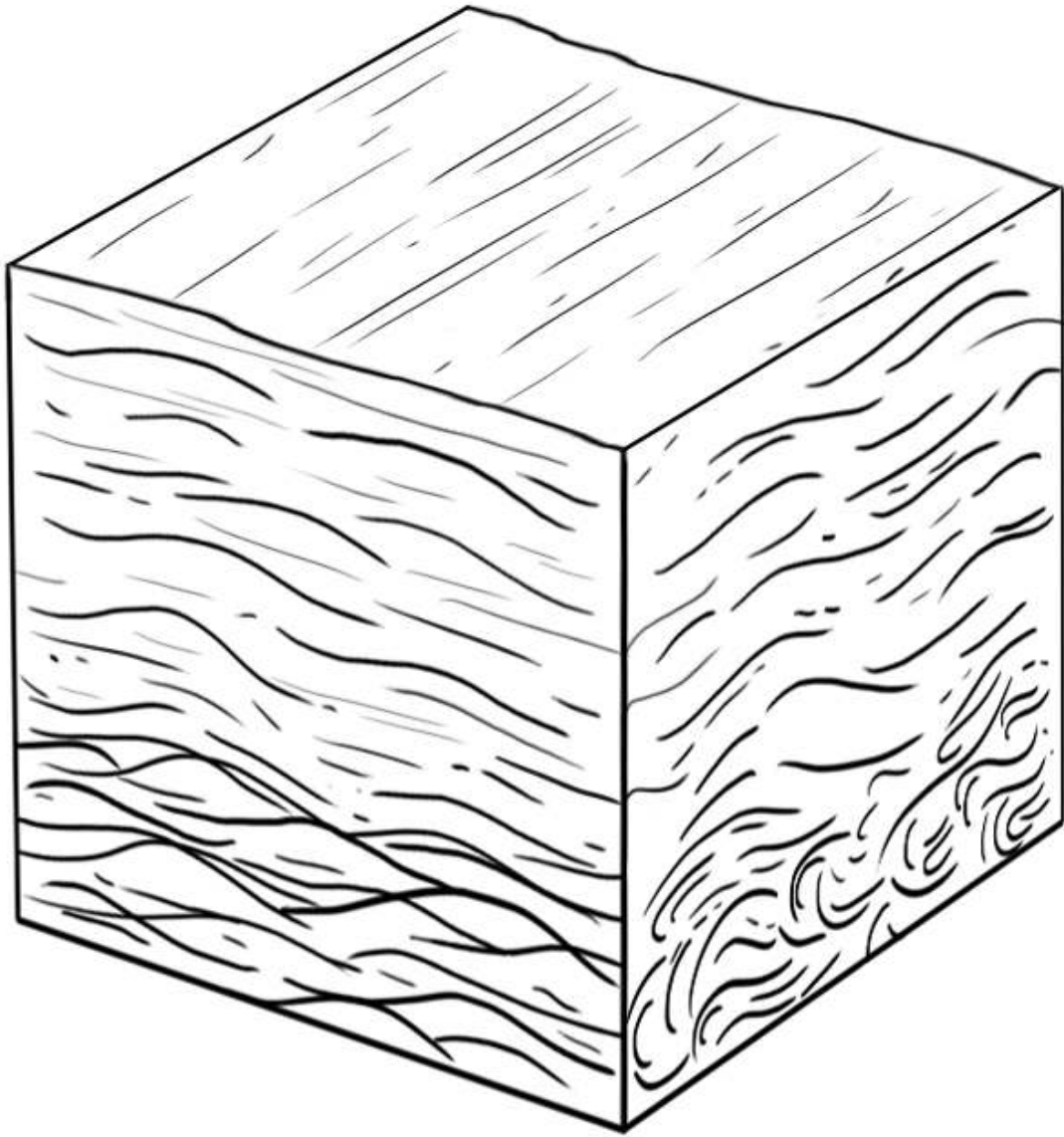


Fig. 56. Cubo esquemático que muestra los tres tipos de corte (PaPa, PePa, PePe) en conjunto.

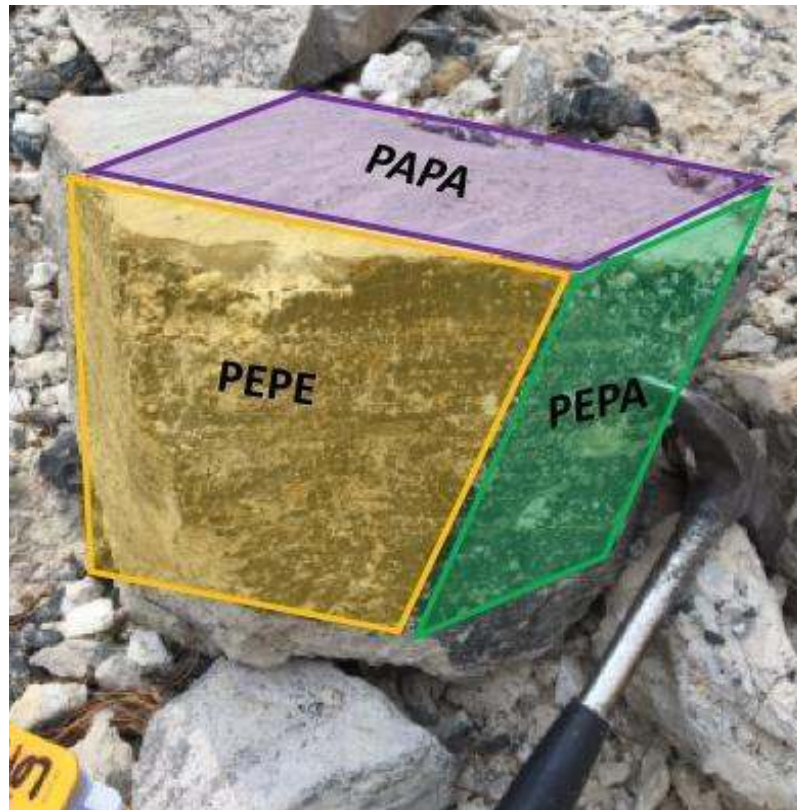


Fig. 57. Fotografías de un bloque de obsidiana con litofizas donde se puede observar los cortes PaPa, PePe y PePa.

Anexo 2: Evaluación Geoquímica cuantitativa en cubos de obsidiana en un equipo portátil de FRX.

Reporte de las mediciones de los materiales de referencia de obsidiana en el equipo Niton FXL

El objetivo del resumen es hacer un análisis de los resultados obtenidos en ese trabajo, para obtener consideraciones que permitan complementar una estrategia para el estudio geoquímico de las muestras que se estudiarán en el presente trabajo, así como una evaluación de los datos y una argumentación sobre las identidades químicas de las muestras.

A partir de los análisis realizados en el equipo PFRX (Portátil de Fluorescencia de Rayos X), para dos de los cubos de los materiales de referencia de obsidiana, los datos obtenidos fueron evaluados de acuerdo con un protocolo propuesto en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, para obtener la mayor información acerca de las variaciones composicionales de los vidrios volcánicos.

El protocolo de análisis se llevó a cabo en el equipo PFRX Thermoscientific Niton FXL, comenzando por enumerar cada cara de los cubos de obsidiana, esto para obtener un control de la distribución en el espacio de cada cara con respecto a la fábrica de la muestra, o sea si su orientación de corte es perpendicular o paralela al flujo del fluido magmático. En cada cara se llevaron a cabo 3 lecturas de 120 seg, por el método Test all geo.

En lo que respecta al módulo Electronics Metals, se observó que todos los elementos son reportados en % en peso y, que las muestras de los cubos de obsidiana mostraron concentraciones inconsistentes de más de 90% de Aluminio. Por otra parte se observó que la gran mayoría de los elementos están por debajo del límite de detección, por lo que se concluye que no es adecuado para el análisis de estos materiales vítreos.

El presente reporte corresponde a la evaluación de la muestras DH5 y PJ5 correspondientes a los materiales de referencia en cubos de obsidiana de la Red CAICPC (Red de Ciencias Aplicadas a la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural). Con el objetivo de observar cambios composicionales en las

caras de las muestras en función de su orientación con el flujo de los vidrios. Además de evaluar la definición del análisis para cada elemento en este tipo de muestras.

Los elementos que fueron detectados por encima del límite de detección (LOD) según el método Test all geo, son alrededor de 15, muestran buena definición en función de su error y son mostrados en la Tabla 1. Sin embargo, se observó que no todos los elementos presentan un comportamiento distinto en la concentración de acuerdo a la posición de las caras y la fábrica de la obsidiana (Tabla 1 columna B), detectando que los elementos mayores Fe, Ti y K, así como el traza Zr permiten diferenciar composicionalmente entre muestras de obsidiana y entre las caras de cada cubo en relación a la orientación de la dirección del flujo en la obsidiana (Figura 1).

Tabla 8. Clasificación de los elementos que se encuentran por encima del límite de detección del equipo Niton FXL, según el método Test all geo.

Elemento (ppm)	A	B	C	D	E	
					DH5	PJ5
Zr	✓	✓	✓		–	Cpa
Mo	–	–	✓		–	–
Sr	✓	✓	✓		–	–
Rb	✓	✓	✓		–	–
Th	✓	✓	✓		–	–
Zn	✓	✓	✓		–	–
Fe	✓	✓	✓		CPeP	–
Mn	✓	✓	✓		–	–
V	–	–	–		–	–
Ti	✓	✓	✓		CPeP	–
*Ca	✓	✓	✓		–	–
K	–	–	✓		✓	✓
Bal						
*Nb	✓	✓	✓		–	–
*Y	✓	✓	✓		–	–

Leyenda	
A	Elementos que funcionan para caracterizar concentraciones entre muestras
B	Elementos que cambian su concentración en función de las caras para diferenciar muestras
C	Definición de la medición
D	<LOD (LOD = límite de detección)
E	No hay taslape de error en las caras de cada muestra
✓	Cumple con la característica
–	No cumple con la característica
*	Elemento muy bueno para caracterizar concentraciones entre muestras
Cpa	Cara Paralela
CPeP	Cara Perpendicular Par

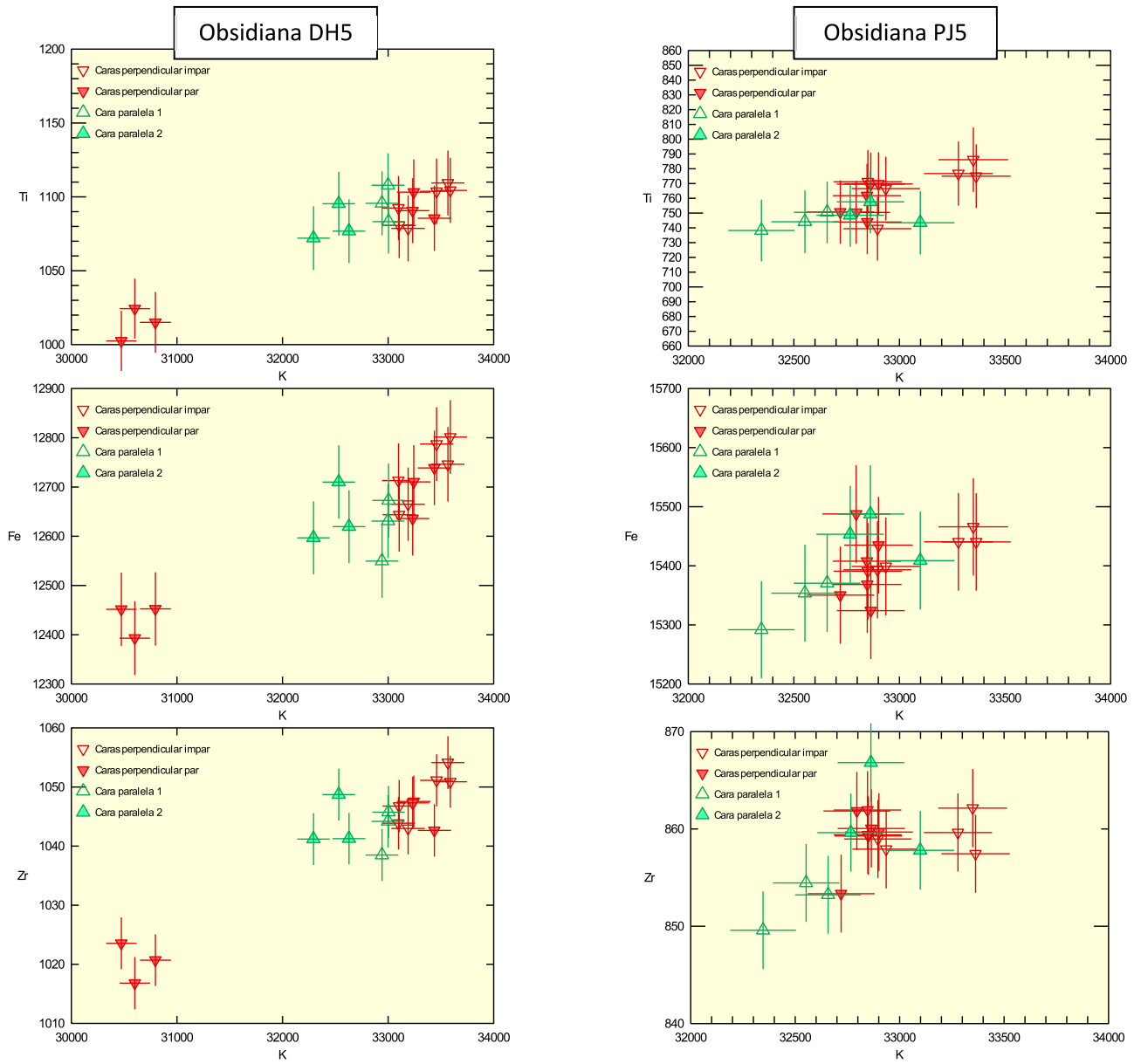


Fig. 58. Diagramas de variación K vs Ti, Fe y Zr mostrando el comportamiento de las concentraciones y su error, en función de la posición de las caras en el cubo de obsidiana.

Discusión

En el apartado de “Evaluación en Equipo PFRX” se muestran algunos resultados de la evaluación geoquímica en obsidiana. Sin embargo, los resultados conseguidos en los experimentos estadísticos con los datos, sugieren determinar el porcentaje de la Desviación Estándar Relativa (DER) de la media de la muestra que se utiliza para evaluar la precisión del método. Por ejemplo, para el Método 6200 “Espectrometría De Fluorescencia De Rayos X Portatil (FRXP) Para La Determinación De Concentraciones Elementales En El Suelo Y El Sedimento” el valor medido para cada objetivo analizado debe estar dentro de $\pm 20\%$ (% D) del valor verdadero para que el chequeo de verificación de calibración sea aceptable. Si un valor medido cae fuera de este rango, entonces la muestra de verificación debe volver a analizarse ([United States Environmental Protection Agency, 2007](#)). Por ejemplo, (introducir tabla DER que ejemplifique).

La DER se ha propuesto como un primer resultado estadístico que exhibe la sensibilidad del equipo portátil y su confiabilidad para reconocer variaciones en algunos elementos trazas según su límite de detección (introducir tabla DER de elementos específicos con una variación mínima). Sin embargo, con base en lo anterior se ha manifestado la gran necesidad de generar una estandarización de los resultados analíticos entre los equipos de FRXP y la FRX estacionaria que permitan elevar la confiabilidad de una evaluación analítica del método de FRXP para obsidianas.

Anexo 3: “Protocolo de Geoquímica para la identificación geoquímica de obsidianas: método cualitativo para un equipo portátil y uno semi-portátil de FRX, caso Sierra de las Navajas”

Las manifestaciones del estado natural de materiales vítreos, es posible encontrarlas en escenarios o en “accidentes” naturales que muestren condiciones termodinámicas distintas. Sería necesario que alguna de las variables (Presión, Temperatura y Volumen) se someta a condiciones fuera de su zona de estabilidad como material, es decir, que se altere su estado inicial (magma, suelo o procesos biológicos) de su proceso final esperado (rocas).

En el caso de los procesos magmáticos formadores de materiales vítreos existen diferencias *significativas* entre la composición química de los vidrios naturales (riolíticos) y la de los vidrios artificiales. En vidrios naturales dominan los iones formadores de red ($\text{SiO}_2 > 70\% \text{ wt}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 10\% \text{ wt}$) y los iones de alúmina (es decir, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq [\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}]$) (Heide & Heide, 2011). En la presente investigación se ha creado el concepto de *condiciones observables significativas* de un material vítreo, en este caso volcánico (obsidiana), que principalmente depende de los elementos naturales que intervinieron o que caracterizan su formación (edificio volcánico, tipo de erupción, características del magma, dirección de la erupción, producto piroclástico, etc.).

Las condiciones observables significativas en una obsidiana generan una identidad compuesta principalmente por sus elementos sólidos observables como cristales, litofizas e inclusiones fluidas; sus elementos medibles absolutos como la densidad y porosidad; sus elementos medibles estimados como el contenido mineralógico y composición química. Las condiciones observables significativas en conjunto generan una identidad petrológica del material, lo cual permite estudiar dichos materiales vítreos por medio de su fábrica.

En geología la fábrica es el arreglo tridimensional prevalente de los componentes sólidos que constituyen a las rocas y a los geomateriales—cristales y fragmentos de roca principalmente. Es una estructura primaria y presenta un comportamiento con figuras autosimilares lo cual hace que su estructura no se modifique, respetando su acomodo inicial, repetible en escala tanto macroscópica como microscópica. La

importancia de la fábrica en el estudio de la obsidiana es tal, que se debe considerar como el punto de partida lógico, para cualquier análisis destructivo o no destructivo del material vítreo. En la presente investigación ha sido posible reconocer que estos elementos generan una firma textural, mineralógica y geoquímica única en las obsidianas, que permite identificar petrológicamente la naturaleza de las obsidianas como material natural.

Según [Argote-Espino et al. \(2010\)](#) es posible comprobar la factibilidad de la clasificación y la diferenciación por medio de técnicas estadísticas novedosas (DBSCAN) en donde las concentraciones de elementos químicos que caracterizan e identifican a los yacimientos de obsidiana del centro de México, tanto a nivel regional como intrarregional. [Argote-Espino et al. \(2010\)](#) menciona que esta técnica funcione de forma que en estudios futuros se obtengan, de una forma automatizada, sea posible correlacionar la genética entre artefactos de obsidiana con sus yacimientos originales.

Es importante mencionar que [Argote-Espino et al. \(2010\)](#) mostraron que la identificación de los yacimientos a macroescala a través de análisis geoquímicos es sumamente efectiva, incluso con instrumentos no tan resolutivos y más económicos como es XRF. Por desgracia, la identificación de subfuentes no proveyó resultados tan firmes como los anteriores, incluso con el uso de técnicas de tan bajo límite de detección (partes por billón) como es el ICP-MS.

La importancia de la metodología que se propone en este protocolo geoquímico es considerar la naturaleza como geomaterial de las obsidianas. Siendo así posible identificar las variaciones en sus concentraciones de los análisis de Fluorescencia de Rayos X portátil y semi-portátil, a partir de un estudio petrológico detallado.

1. Evaluación de elementos confiables y no confiables según el espectro Evaluación en conjunto (portátil vs semi-portátil)

El análisis de la evaluación cualitativa y cuantitativa de las obsidianas permitió reconocer por lo menos cinco grupos característicos de la población elemental. La clasificación tiene como objetivo identificar los elementos o grupos elementales que sean confiables para comprender la identidad geoquímica única de asociada a las

variaciones en concentraciones que presenta el yacimiento de obsidiana verde-dorada de Sierra de las Navajas. Los elementos observables significativos

Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra

>1000 ppm

Zr, Fe, Mn, Ti, K

750 >100 ppm

Rb, Zn, Ca, Nb, e Y

<10 ppm

Sr

Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir.

Mo, W, Cu, Ni, Co, Cr, V, Ag, Cl, Na y Ga

Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra

Si, Al

Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración)

U, Th, Pb, Bi, Tm, Tc, F, Mg, P, S, Yb, Ac

Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras

Au, Se, As, Hg, Sc, S, Sb, Sn, Cd

Se comparó la evaluación cualitativa entre los equipos portátil y semi-portátil de FRX, con la evaluación cuantitativo del equipo semi-portátil, para discriminar el comportamiento elemental de las muestras analizadas. Asimismo, se observaron las principales variaciones elementales en las muestras de obsidiana, lo que nos permitió agrupar en cinco grupos característicos a toda la población elemental: a)

Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra, b) Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir pero concentraciones <100 ppm, c) Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra, d) Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración) y e) Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras.

Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra

Existen los elementos que presentan una concentración >1000 ppm como el Zr, Fe, Mn, Ti, K, que son considerados los elementos representativos de la muestra, junto con los que se encuentran en una concentración de $750 >100$ ppm tales como Rb, Zn, Ca, Nb, e Y. Por otro lado, existe la presencia del Sr que ocurre con una concentración <10 ppm.

Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir pero concentraciones <100 ppm.

Se identificó la presencia de Mo considerado como un elemento de alto enriquecimiento, y el Ga como elemento de moderado enriquecimiento. También la presencia de Cu, permitió corroborar los que Lighthard reporta sobre la variación comendítica de las rocas hiperalcalinas de Sierra de las Navaja, que McDonald y Bailey (1973) mencionan acerca del contenido de Cu como característica de las comanditas.

El Ni no fue identificado en el patrón del espectro como un elemento constante, pero en sus concentraciones se encuentran por debajo del límite de detección. Según McDonald y Bailey (1973), las rocas de afinidad hiperalcalina presentan una concentración de Ni $<5-10$ ppm, lo que explicaría la dificultad del reconocimiento cuantitativo de este elemento.

Por otro lado, existen los elementos W, Co, Cr, V, Ag, Cl, Na, de los cuales no se ha encontrado una explicación petrológica significativa, a excepción del Na que es un elemento de mucha importancia en las rocas hiperalcalinas, pero su presencia en el espectro no se observa muy definida.

Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra

El Si y el Al fueron identificados en los espectros, pero no en las concentraciones de las muestras. Este es un grupo importante ya que son elementos que son importantes en el reconocimiento petrológico de la muestra, pero una gran desventaja es que no fue posible cuantificarlos.

Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración)

A excepción del Mg considerado como un elemento mayor de bajo contenido y del U, Yb y del Th que son reconocidos como elementos de moderado enriquecimiento en las rocas hiperalcalinas (McDonald y Bailey, 1973), fue posible identificar la presencia de los elementos Pb, Bi, Tm, Tc, F, P, S y Ac. Petrológicamente es posible decir que estos elementos son trazas, accesorios de las obsidias del yacimiento.

2. Elementos no confiables: justificación petrológica

e) Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras

Au, Se, As, Hg, Sc, S, Sb, Sn, Cd

Según la *Evaluación en conjunto (portátil vs semi-portátil)* Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras

A excepción del Cd que es considerado como un elemento traza de moderada concentración en las rocas hiperalcalinas (McDonald y Bailey, 1973), los siguientes Au, Se, As, Hg, Sc, S, Sb, Sn, son elementos que el equipo semi-portátil puede identificar, pero en las muestras se encuentran por debajo del límite de detección. Esto es porque petrológicamente no representan una característica geoquímica de las rocas hiperalcalinas.

Estas diferencias fue posible observar dependiendo del corte que se presente al análisis–PePe, PePa, PaPa (Ver Anexo 1). En este caso, los cortes fueron PePa y según los diagramas de discriminación se reconocen las variaciones geoquímicas entre las muestras. Entonces la fábrica de la muestra entra como el principal regulador analítico que controla las variaciones geoquímicas de elementos traza

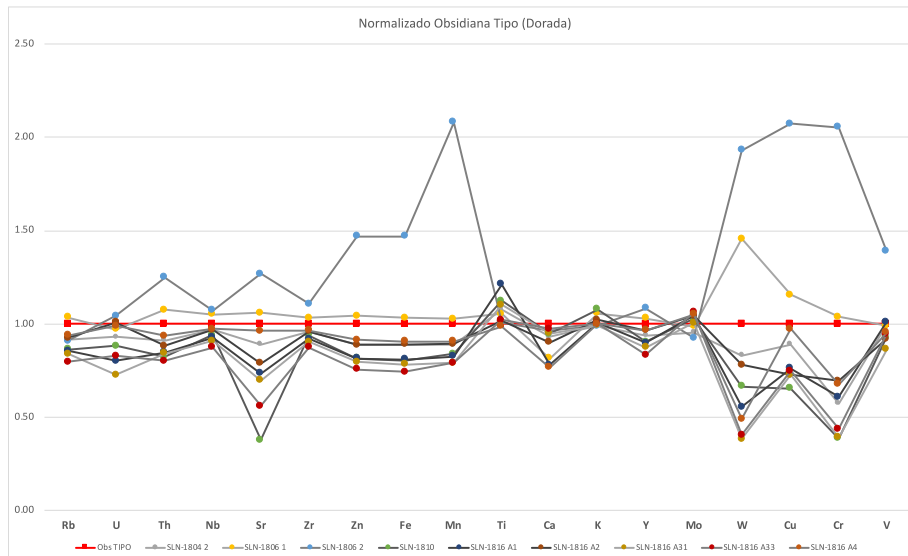
para ubicar litofacies o cambios asociados a un mismo depósito (ayudando a reconstruir físicamente el domo).

3. Normalización según Obsidiana Tipo

La variación de concentración elemental en las muestras de obsidiana del yacimiento de Cerro de las Navajas, en Sierra de las Navajas, se ha podido corroborar con la normalización propuesta en este trabajo. Para ubicar de manera lógica los cambios geoquímicos, se consideró como obsidiana tipo una dorada. Contemplando la idea de su importancia geopolítica en las interpretaciones arqueológicas.

En el diagrama multielemental que se construyó es posible observar las anomalías positivas y negativas del espectro generado. Resalta una dispersión significativa en los elementos Rb, U, Th, Sr, Zn, Fe, Mn, W, Cu y Cr. Por otro lado, los elementos como Ti, Ca, K, Y, Mo y V presentan el caso contrario, donde los elementos muestran poca dispersión. Es importante resalta que los elementos Zr y Nb, manifiestan un comportamiento similar, los cuales podrían funcionar como elementos referencia o de alta confianza para los diagramas de variación.

Por lo tanto, es posible decir que los elementos Zr, Nb Rb, U, Th, Sr, Zn, Fe, Mn, W, Cu y Cr, son confiables para identificar una variación significativa entre las obsidianas del yacimiento de Cerro de las Navajas, en el complejo de Sierra de las Navajas.



Anexo 4: Difracción de Rayos X (DRX)

Evento B

Paleo Domo Riolítico

(Coupled TwoTheta/Theta)

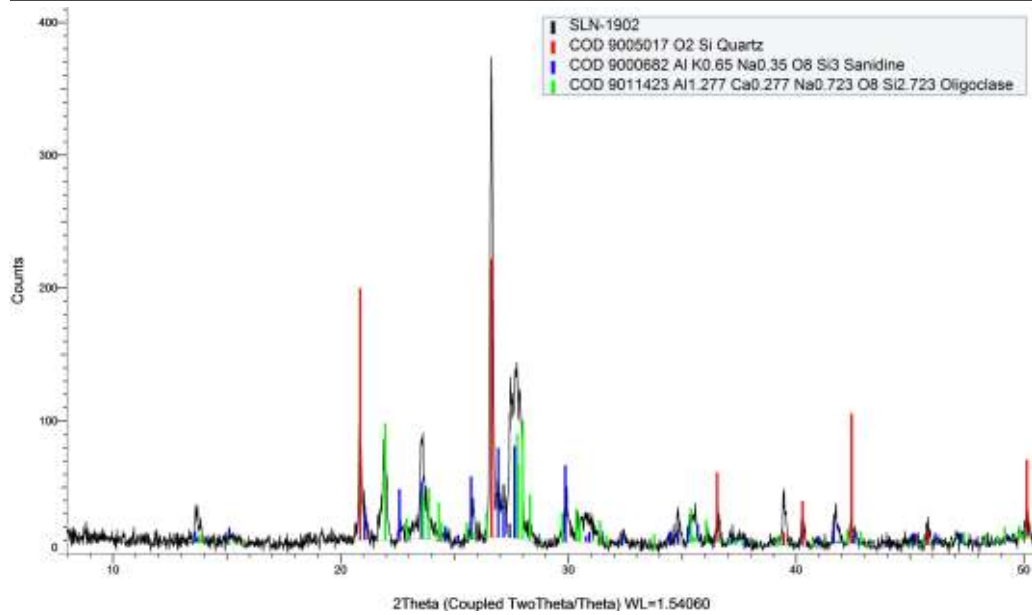


Fig. 59. Difractograma de la litofacies riolita con alto contenido en litofizas, evento B.

(Coupled TwoTheta/Theta)

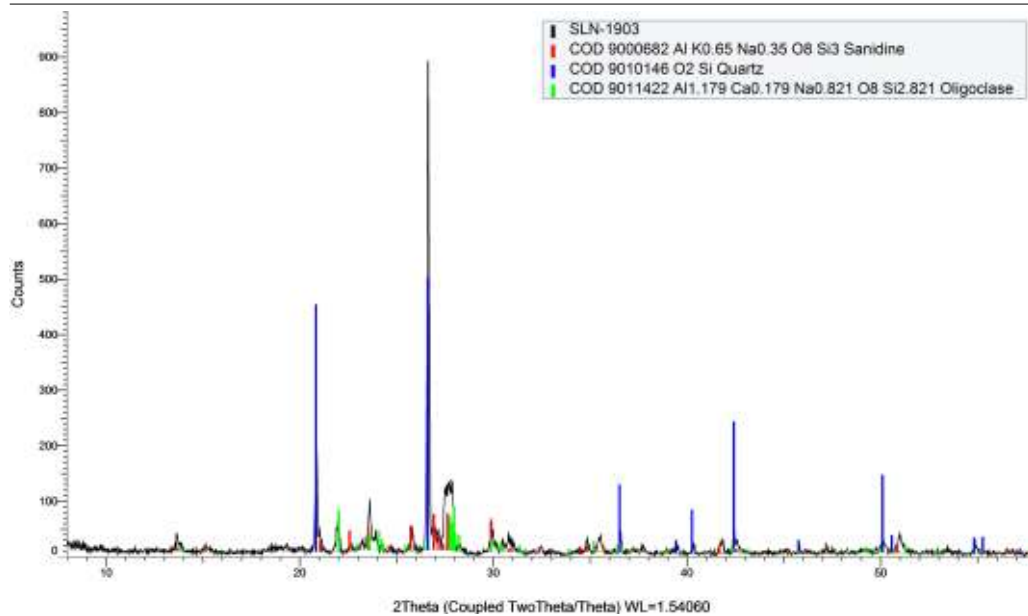


Fig. 60. Difractograma de la litofacies riolita de aspecto pumicítico, evento B.

Evento C

Brecha Piroclástica

(Coupled TwoTheta/Theta)

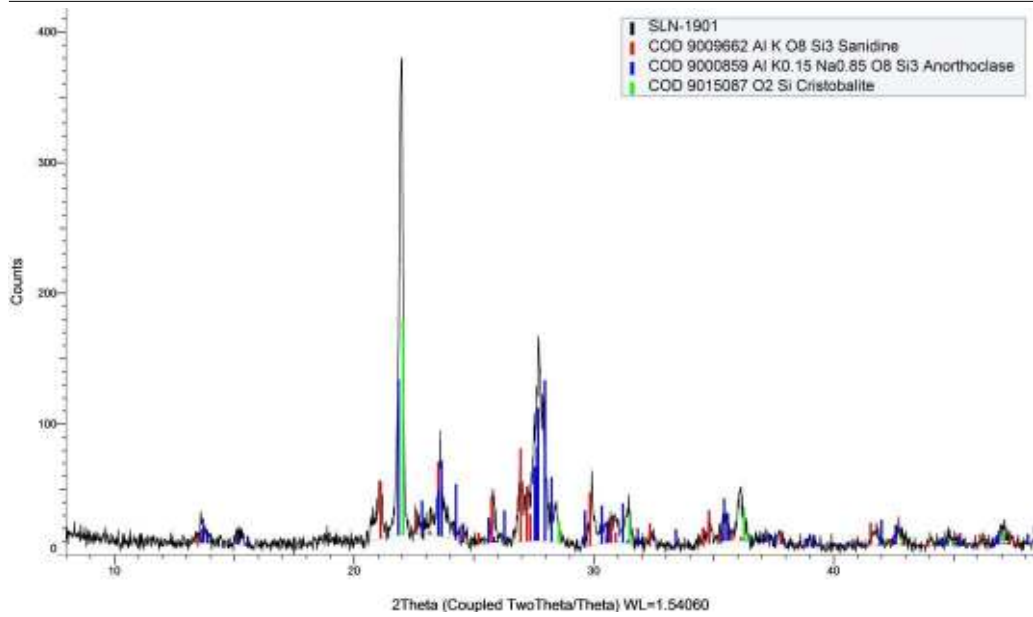
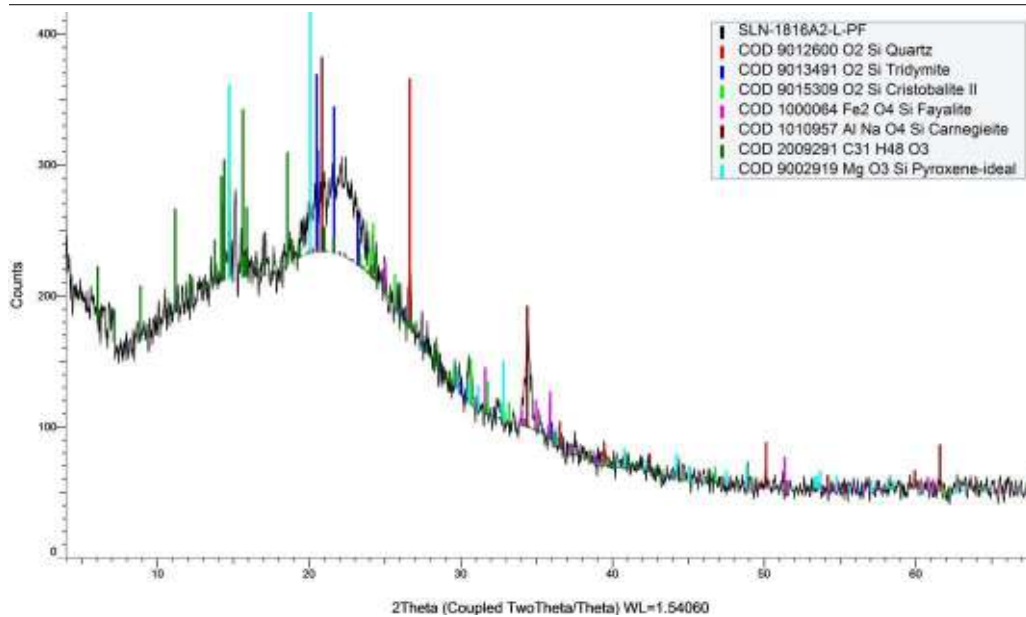


Fig. 61. Difractograma de una muestra de la matriz de la litofacies Brecha Piroclástica, evento C.

Obsidianas

(Coupled TwoTheta/Theta)



(Coupled TwoTheta/Theta)

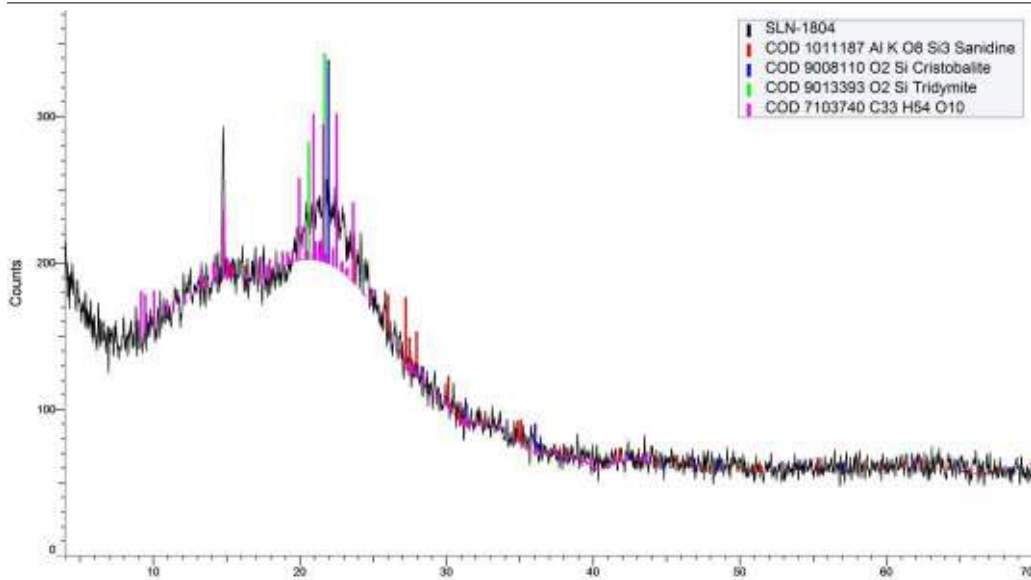


Fig. 62. Difractograma de una obsidiana verde-dorada de la litofacies brecha piroclástica, evento C.

Fig. 63. Difractograma de una obsidiana verde de la litofacies brecha piroclástica, evento C.

Evento D

Unidad Fluidal Itztetl

(Coupled TwoTheta/Theta)

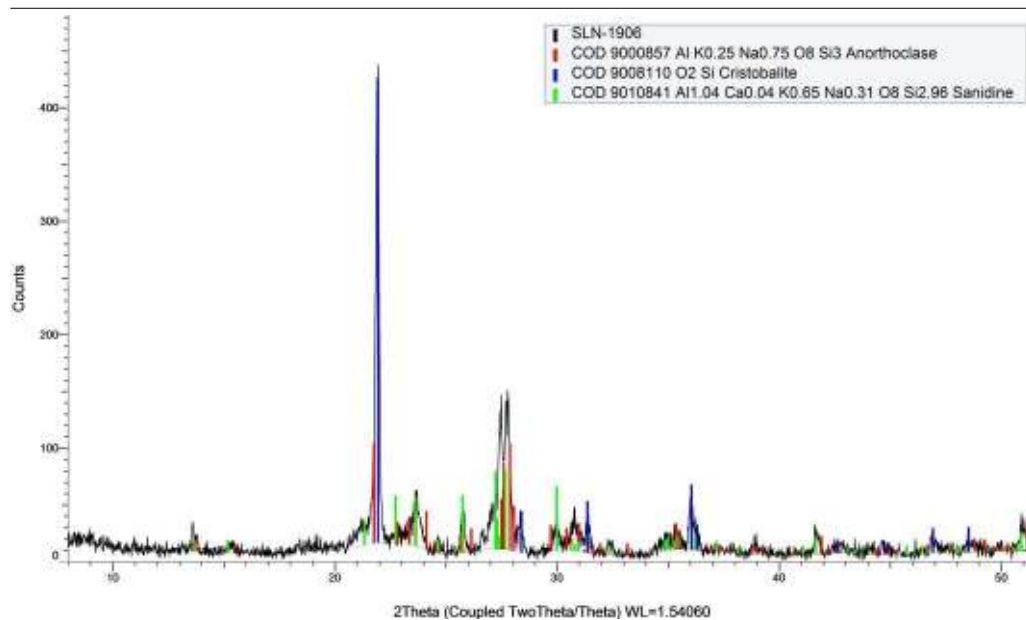


Fig. 64. Difractograma de la litofacies vesicular o con alto contenido en litofacies de la Unidad Fluidal Itztetl, evento D.

(Coupled TwoTheta/Theta)

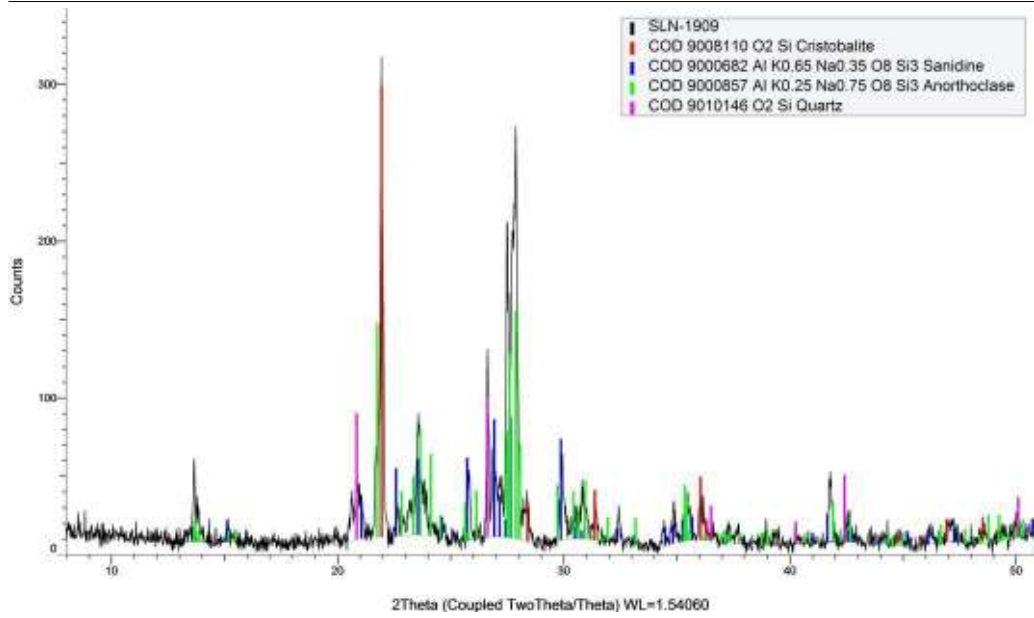


Fig. 66. Difractograma de la litofacies fluidal de la Unidad Fluidal Itztetl, evento D.

(Coupled TwoTheta/Theta)

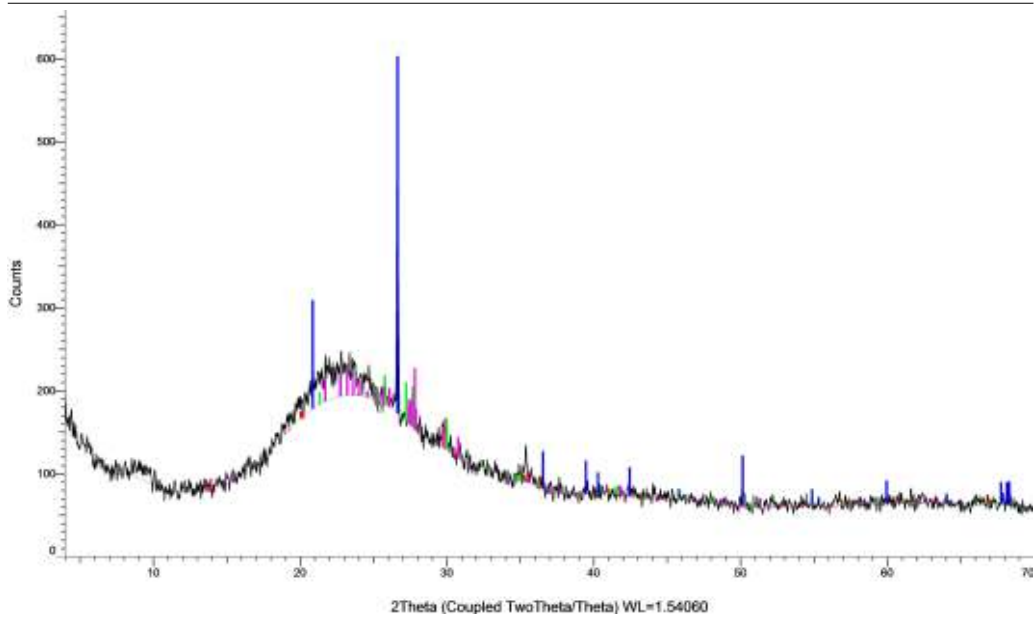


Fig. 65. Difractograma de una obsidiana negra de la litofacies vítrea de la Unidad Fluidal Itztetl, evento D.

Unidades Volcánicas Circundantes

La Joya

(Coupled TwoTheta/Theta)

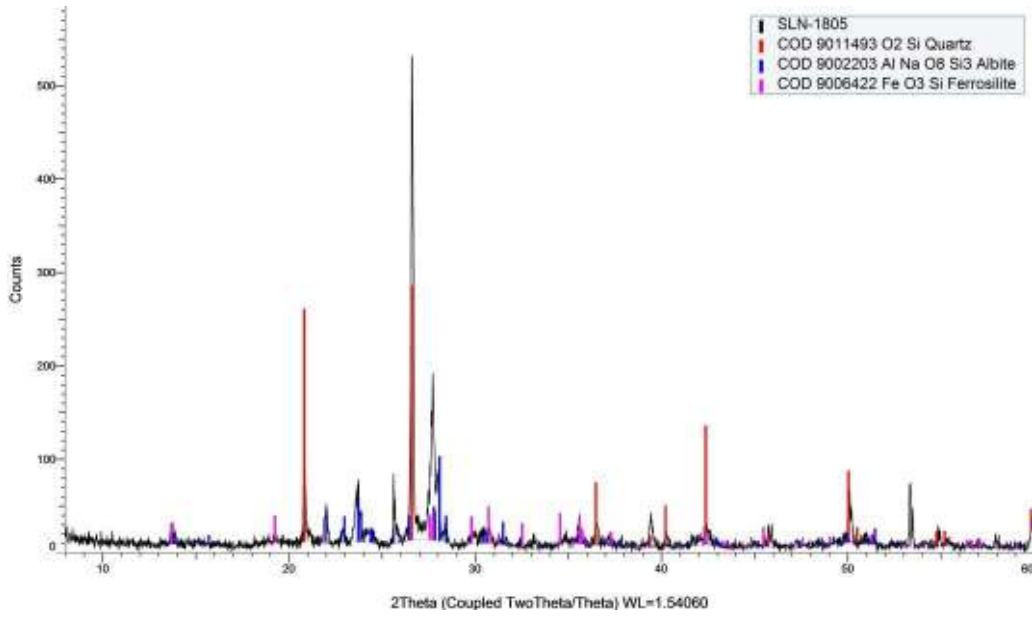


Fig. 67. Difractograma de una riolita fluidal con alto contenido en litofizas, evento volcánico circundante.

Las Mesas

(Coupled TwoTheta/Theta)

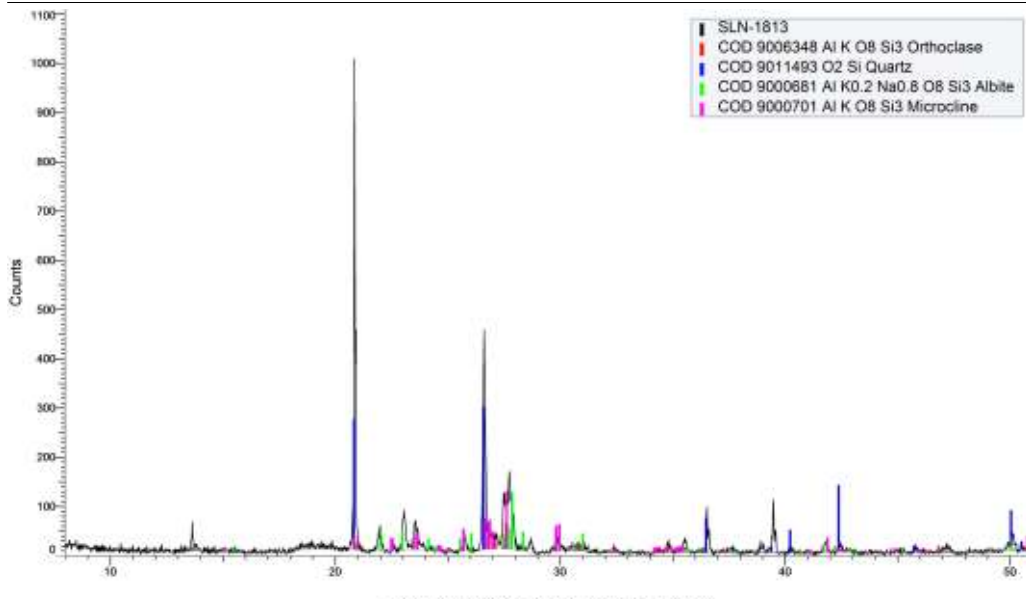


Fig. 68. Difractograma de una riolita fluidal con alto contenido en litofizas, evento volcánico circundante.

Anexo 5: Evaluación Cualitativa en equipo portátil FRXP (LADIPA)

Evaluación en conjunto (portátil vs semi-portátil)

El análisis de la evaluación cualitativa y cuantitativa de las obsidias permitieron reconocer por lo menos cinco grupos característicos de la población elemental: a) Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra, b) Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir, c) Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra, d) Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración) y e) Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras.

a) Elementos que son considerados como identidad petrológica de la muestra

>1000 ppm

Zr, Fe, Mn, Ti, K

750 >100 ppm

Rb, Zn, Ca, Nb, e Y

<10 ppm

Sr

b) Elementos identificados en el patrón del espectro que tienen un interés a discutir.

Mo, W, Cu, Ni, Co, Cr, V, Ag, Cl, Na y Ga

c) Elementos que únicamente fueron identificados en el patrón del espectro de la muestra

Si, Al

d) Elementos neutros en la muestra (identificados en el patrón del espectro y/o en la concentración)

U, Th, Pb, Bi, Tm, Tc, F, Mg, P, S, Yb, Ac

e) Elementos no fueron identificados en el patrón del espectro ni en las concentraciones de las muestras

Au, Se, As, Hg, Sc, S, Sb, Sn, Cd

SLN-1804 1

Test All Geo

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Ag.

Low (morado)

Al, Si, Cl, K a-b, Ti, Mn?, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Zr

High (azul)

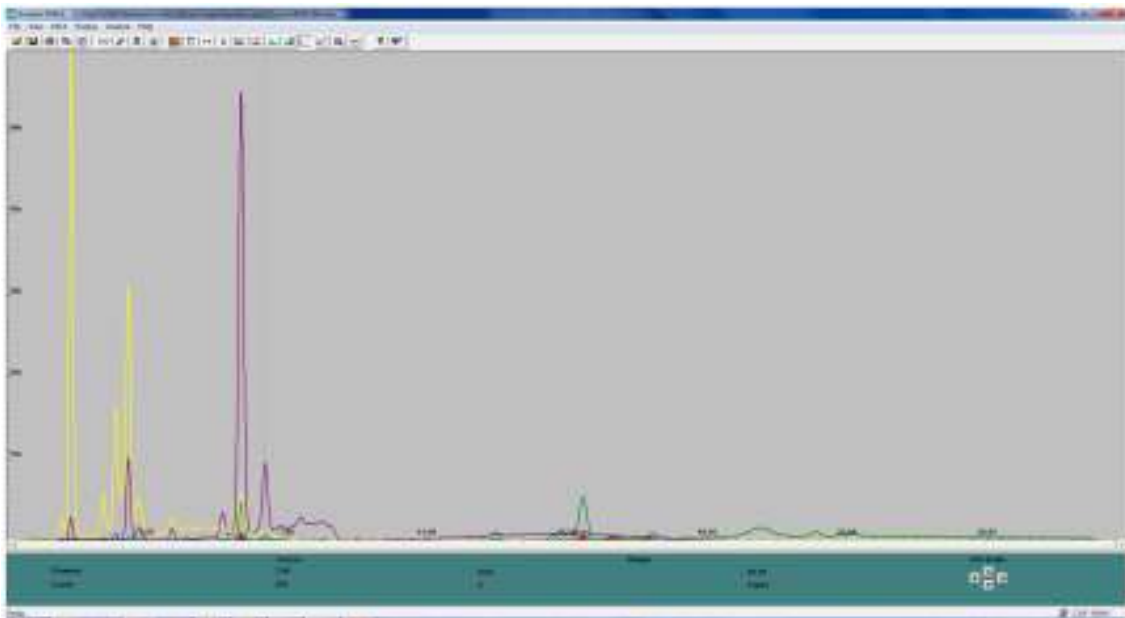
K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a, Zr, Nb, Mo, Tc

Light (amarillo)

Al, Si, Cl, Ar, K a-b, Ti, Fe a-b

Conjunto

Al, Si, Cl, K, Ti, Mn, Fe, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Cu, Mo y Ag



Soils

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, As, Rb a-b, Zr a-b, Nb a-b, Ag

Low (morado)

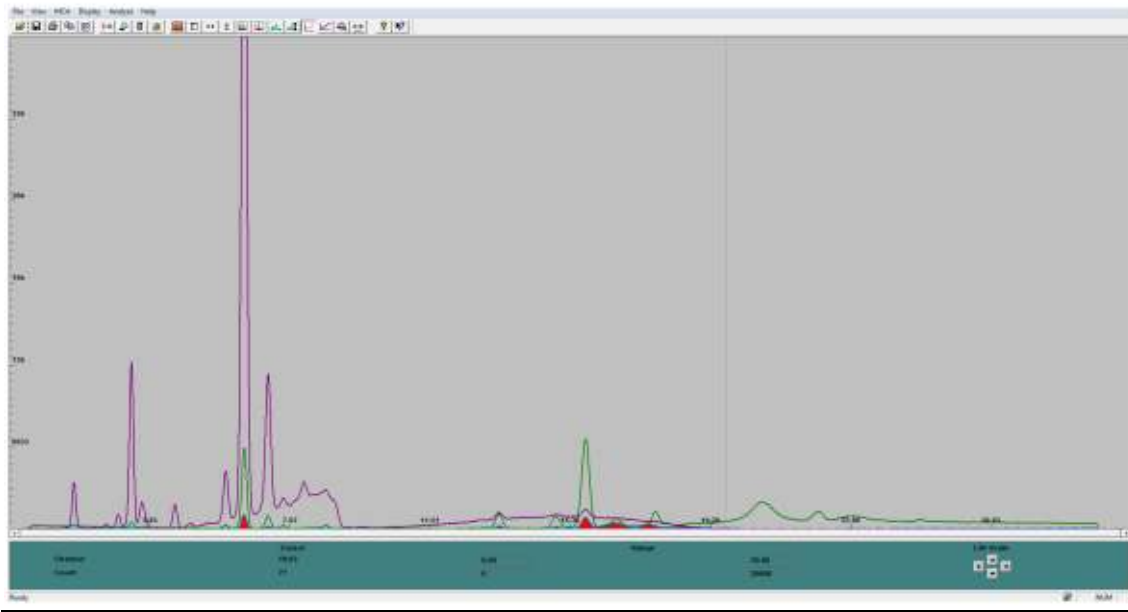
Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr

High (azul)

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr, Nb, Mo a-b

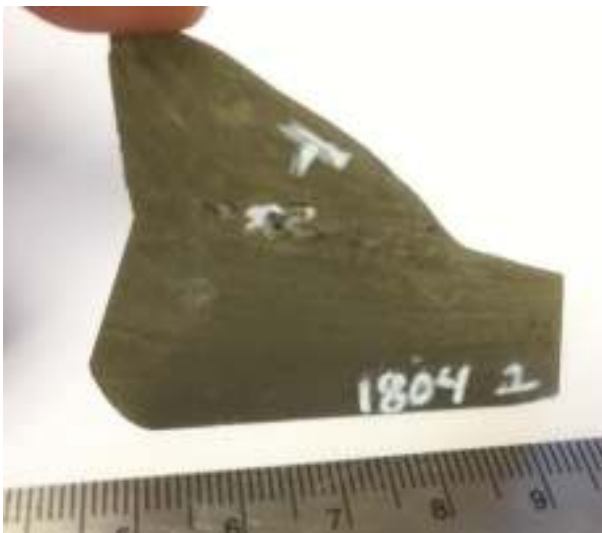
Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo a-b y Ag



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo a-b y Ag



SLN-1804 2

Test All Geo

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Zr a-b, Nb, Ag.

Low (morado)

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb

High (azul)

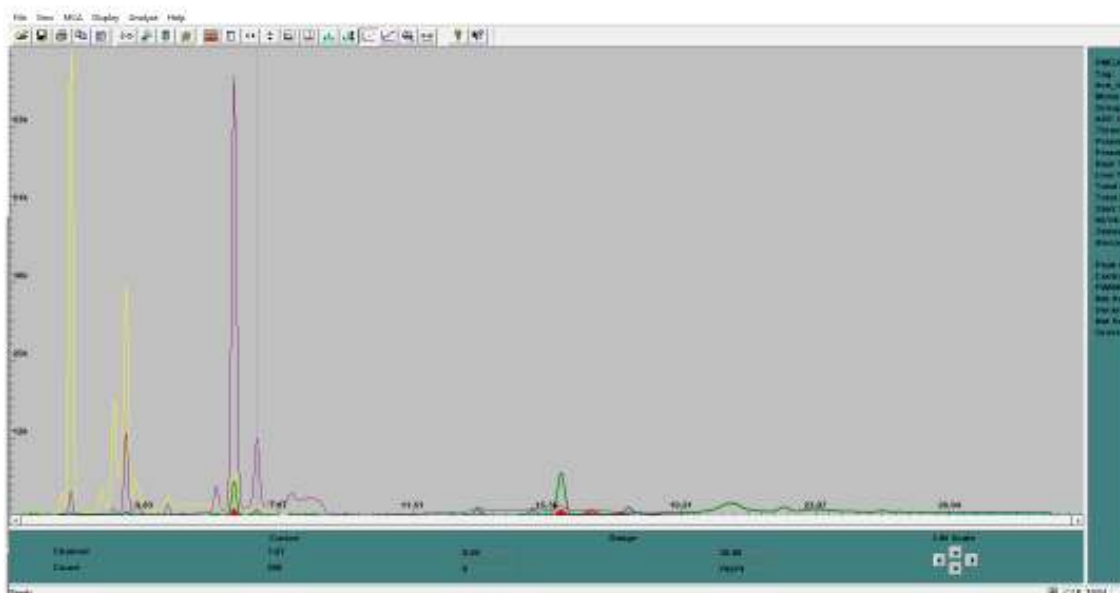
Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr, Nb, Mo, Tc

Light (amarillo)

Al, Si, S, Cl, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b

Conjunto

Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Zn, Rb, Zr, Nb, Cu, Zn, Mo, Tc y Ag



Soils

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, As, Rb a-b, Zr a-b, Nb a-b, Ag

Low (morado)

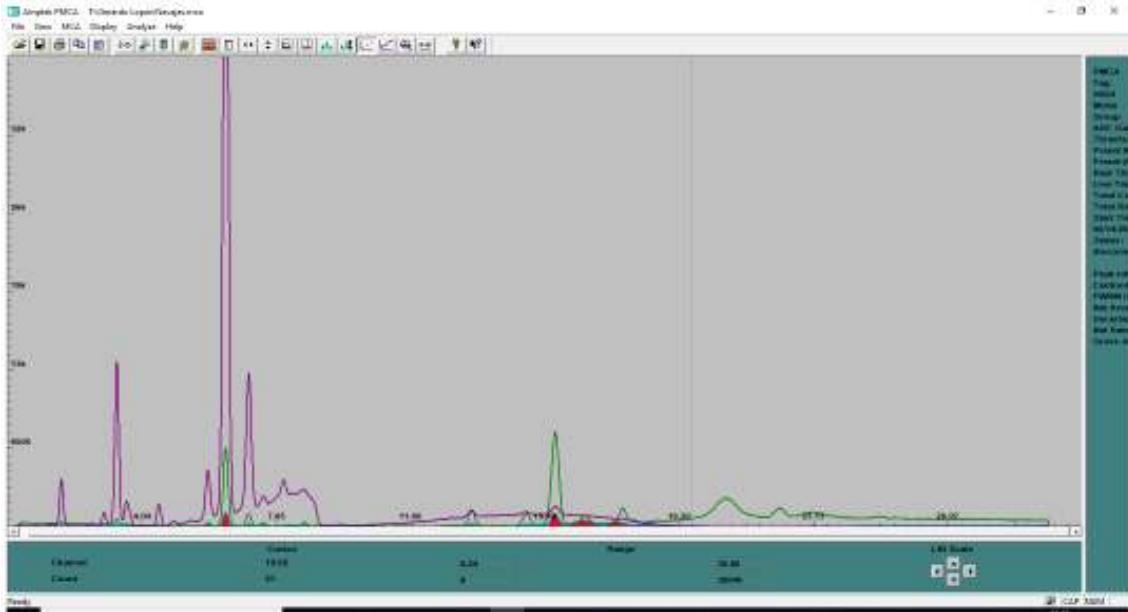
Si, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr

High (azul)

K, Mn, Fe a-b, Cu, Zn, As, Rb a-b, Zr, Nb, Mo a-b, Tc

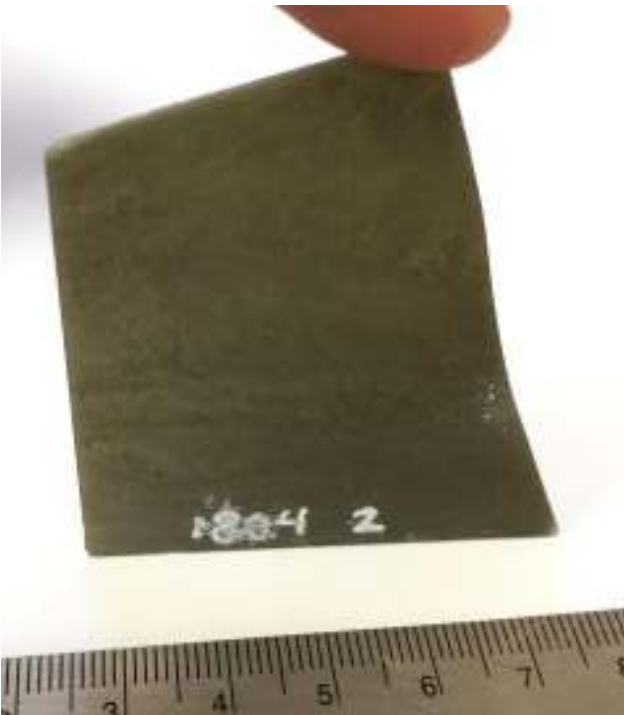
Conjunto

Si, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo a-b, Tc y Ag



Todos

Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Zn, Rb, Zr, Nb, Cu, Zn, Mo, Tc y Ag



SLN-1806 1

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb a-b y posibles Yb Lb, As Ka, Th La

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr

High

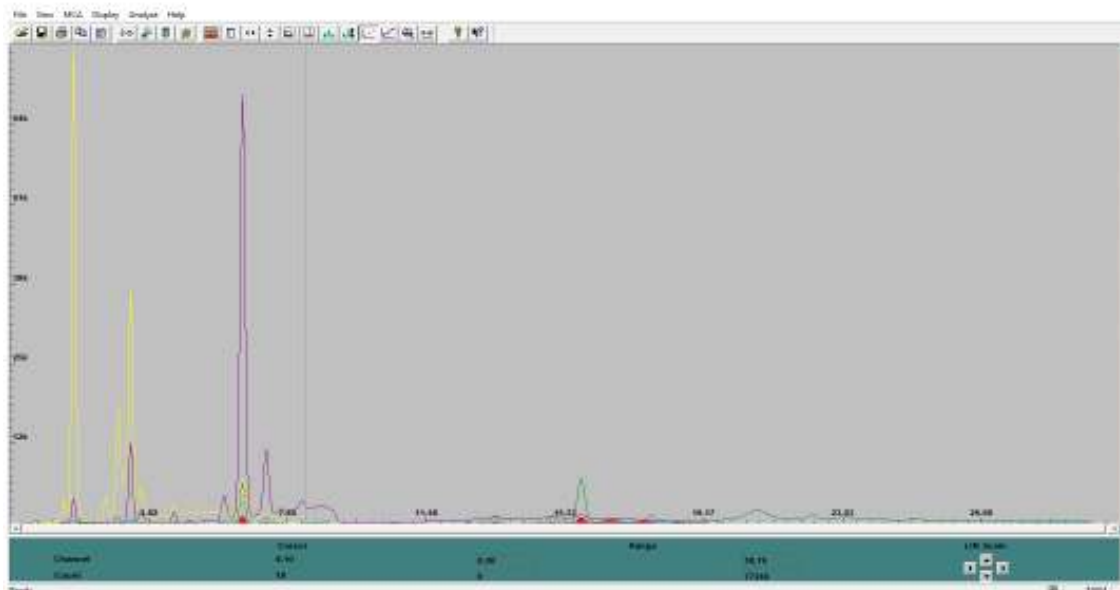
K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc

Light

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b y posible F, Na, Mg, P y S

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb a-b, Mo, Tc y posible F, Na, Mg, P, S, Yb, As, Th La.



Soils

High

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Tm, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb y posibles Ga, Pb La-Lb y Th La

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y y Zr

High

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc a-b

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Tm, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Mo, Tc a-b y posibles Ga, Pb La-Lb y Th La



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Tm, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb a-b, Mo, Tc a-b y posible F, Na, Mg, P, S, Yb, As, Th La, Ga y Pb La-Lb

SLN-1806 2

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb y posibles Ac La, Yb Lb, As Ka, Th La

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr

High

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc a-b

Light

Si, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b y posible Na, Mg, y S

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc a-b y posible Na, Mg, S, Yb, As, Ac, Th.



Soils

Main

Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb y posibles Ga y Ac

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr y posible F

High

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo a-b, Tc

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Mo a-b, Tc y posibles F, Ga y Ac



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Mo a-b, Tc a-b y posible F, Na, Mg, S, Ga, Yb, As, Ac, Th.



SLN-1810

Test All Geo

Main (verde)

Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb

Low (morado)

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb

High (azul)

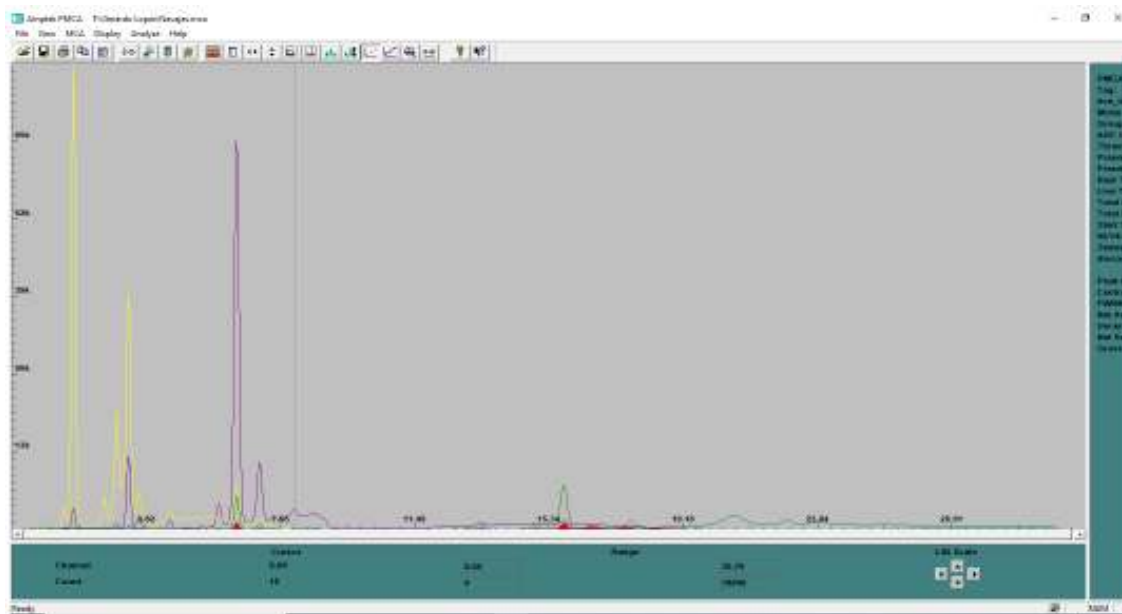
K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr, Nb, Mo a-b

Light (amarillo)

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Cr, Mn, Fe a-b y posibles Na, Mg, P, S.

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Mo, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, y Ag



Soils

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb a

Low (morado)

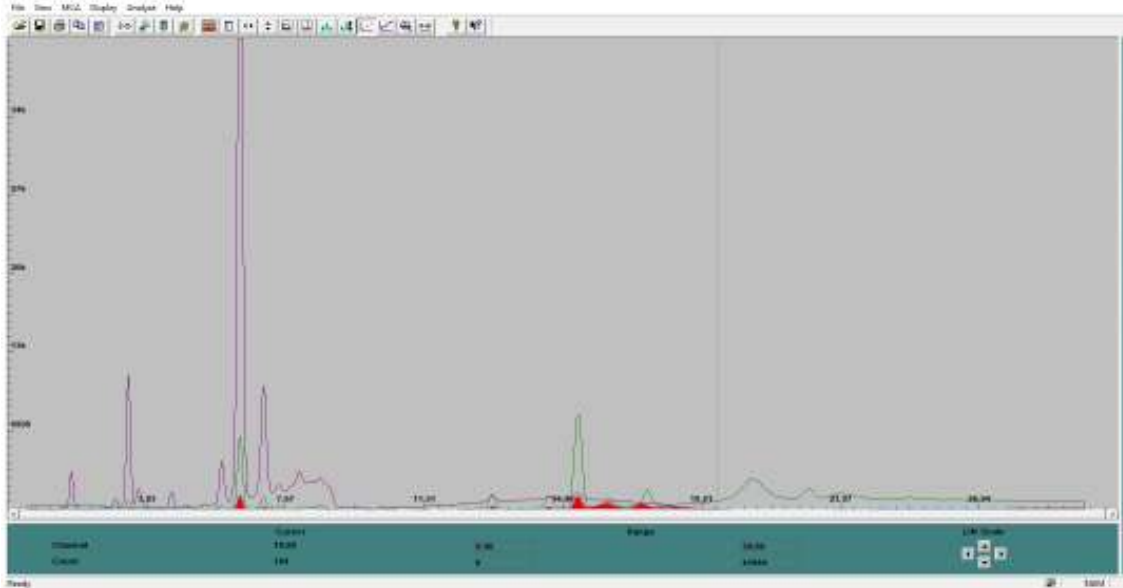
Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr y posible Na, Mg, P, S, V

High (azul)

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn a-b, Rb a-b, Zr, Nb, Mo, Tc a-b

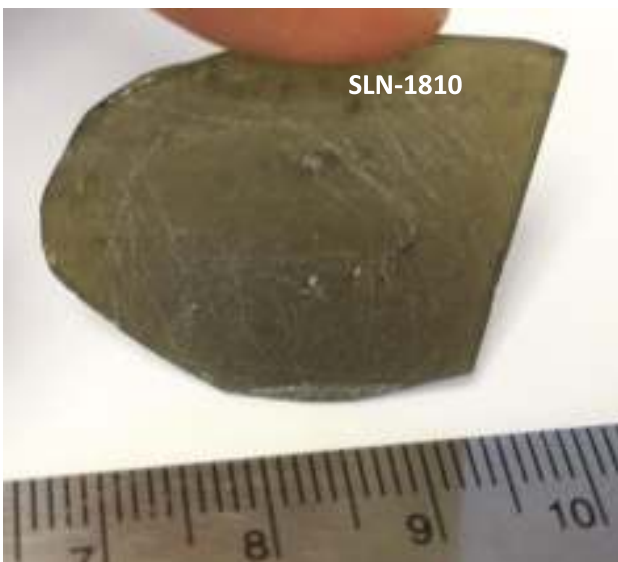
Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo, Tc a-b y posible V



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Y, Zr a-b, Nb, Mo, Tc a-b, Ag y posible V



SLN-1816 A1

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr

High

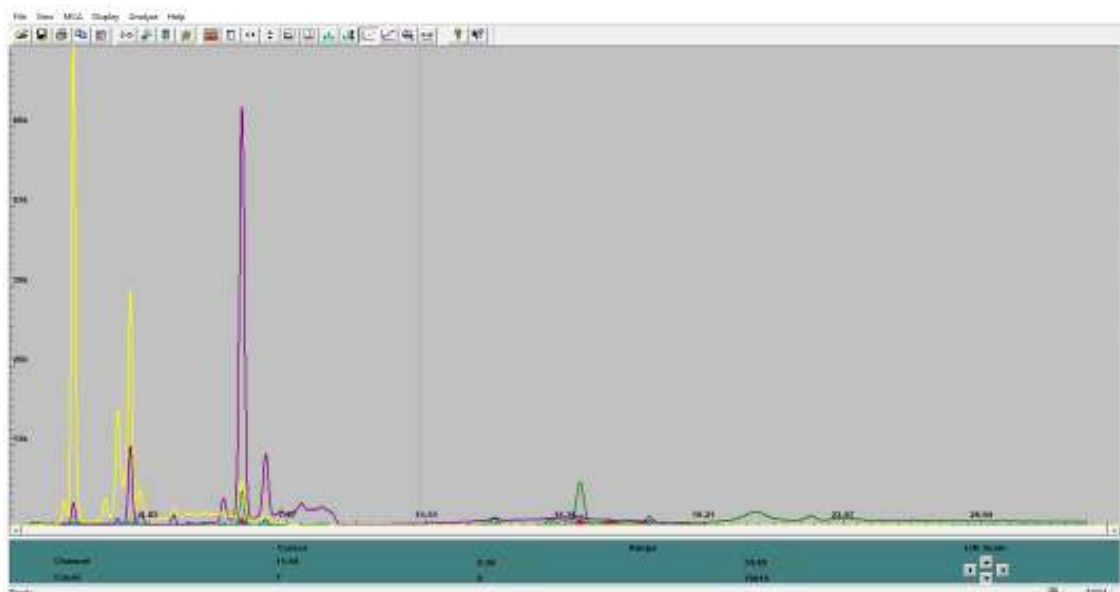
K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc

Light

Al, Si, Cl, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b y posible Na, Mg y S

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Na, Mg y S



Soils

Main (verde)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low (morado)

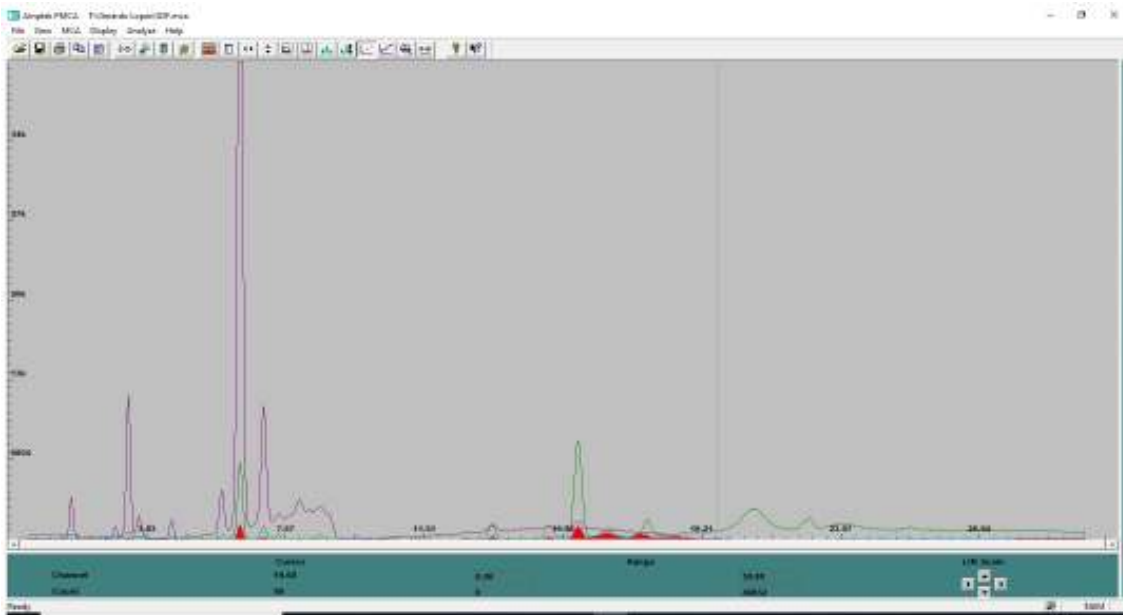
Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr

High (azul)

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc a-b

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Mo, Tc a-b



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Mo, Tc a-b_y posible Na, Mg y S

SLN-1816 A2

Test All Geo

Main

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc

High

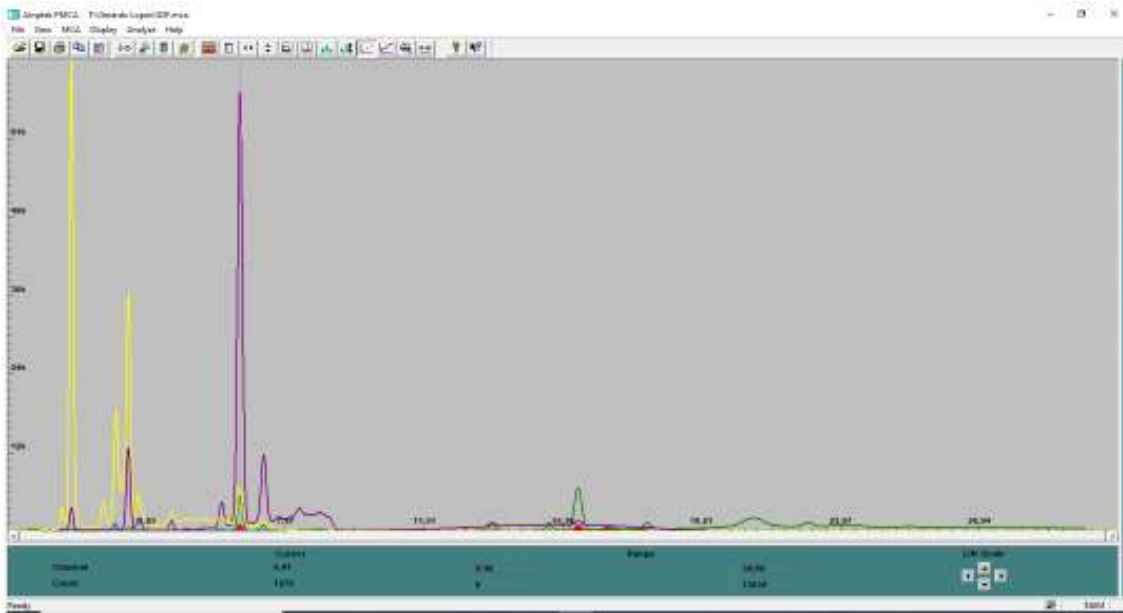
K a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc

Light

Al, Si, Cl, K a-b, Ti a-b, Mn, Fe a-b y posibles Na, Mg, S

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posibles Na, Mg, S



Soils

Main (verde)

Si, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni k, Zn, As, Rb a-b, Zr a-b, Nb a

Low (morado)

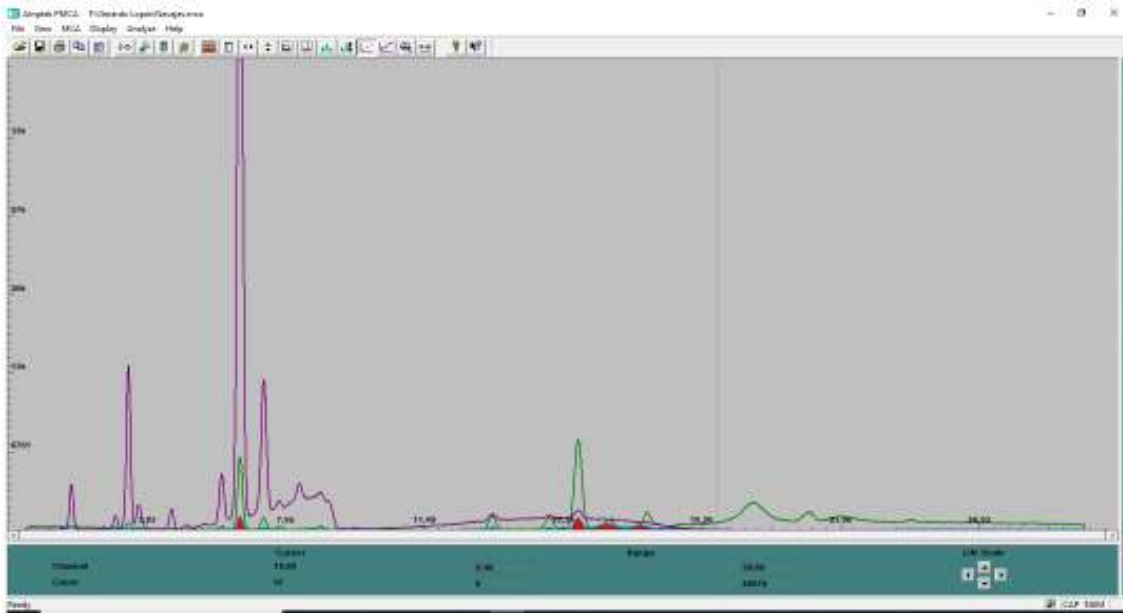
Al, Si, Cl, K a-b, Ca b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr

High (azul)

K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo a-b, Tc

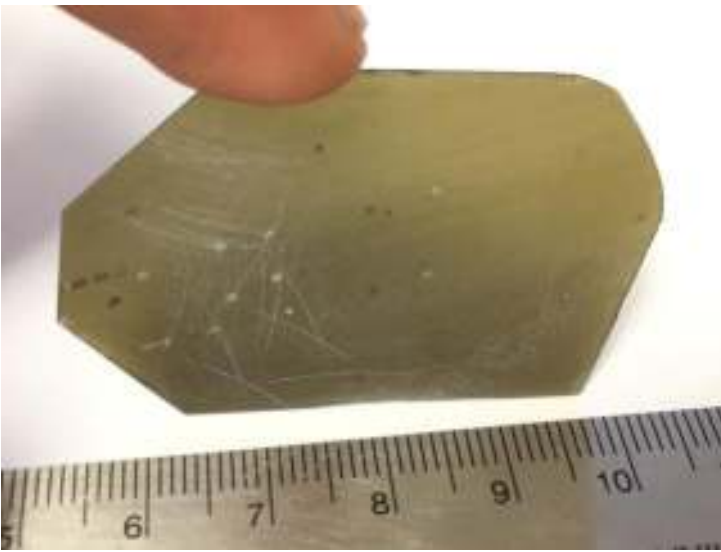
Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Y, Zr a-b, Nb, Mo y Tc



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Y, Zr a-b, Nb, Mo, Tc y posibles Na, Mg, S



SLN-1816 A31

Test All Geo

Main (morada)

As, K, Rb, Y, Zr a-b, Nb

Low (verde)

Al, Si, Cl, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb

High (azul)

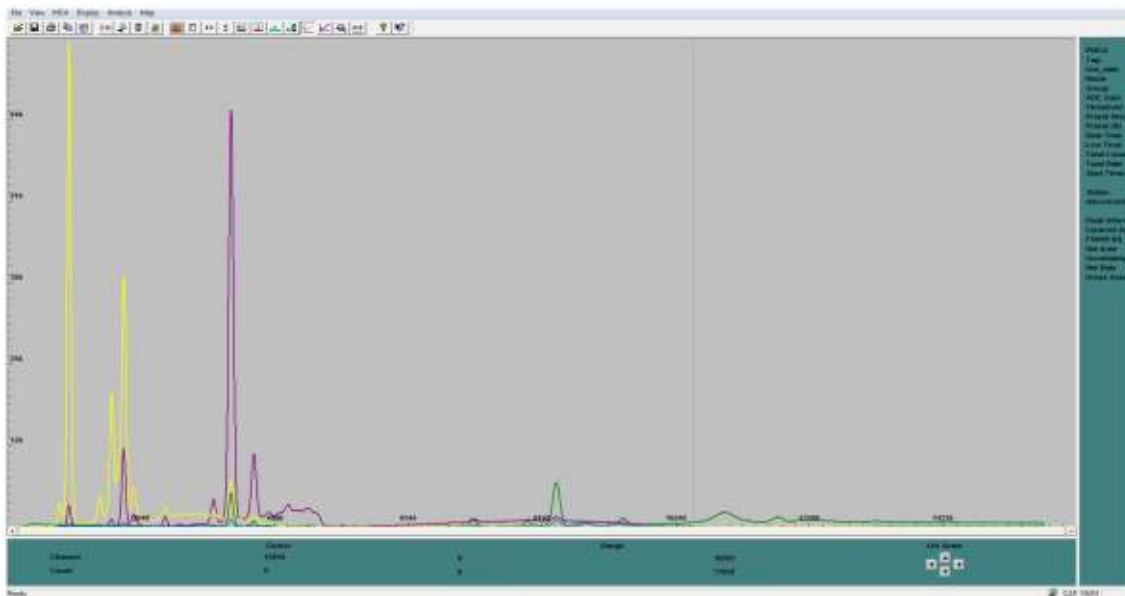
Nb, Mo, Tc a-b (únicos diferentes)

Light (amarillo)

Al, Si, S, Cl, Ca

Conjunto

Al, Si, Cl, K, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Ca



Soils

High

Si, K, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Kr, Rb, Y, Zr a-b, Nb.

Low

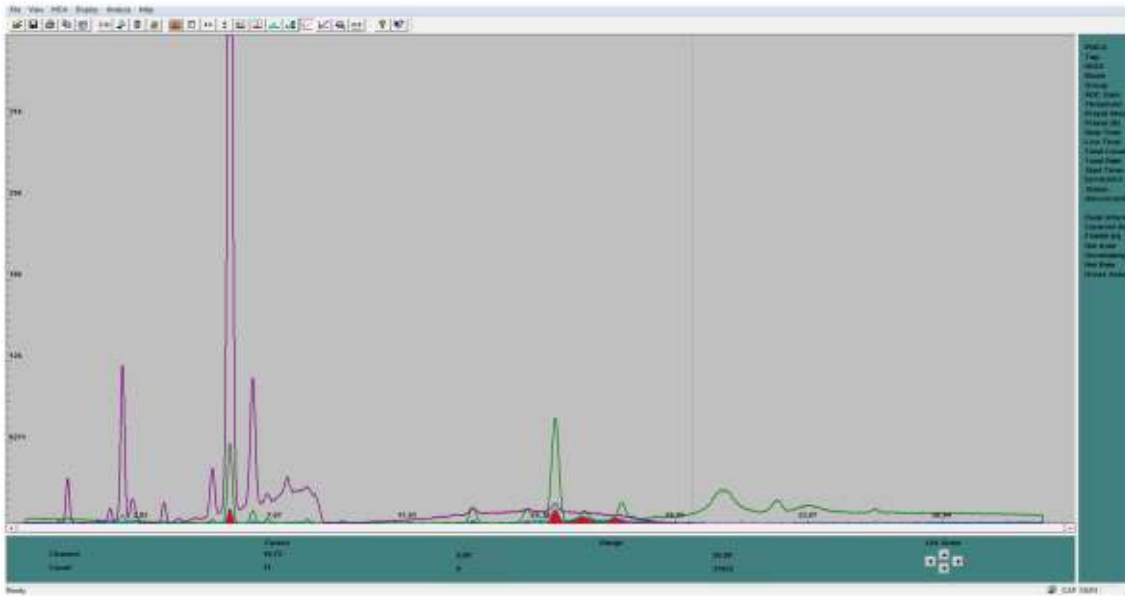
Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb.

High

K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb, Tc.

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ti, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb y posible Ca y Tc.



Todos

Al, Si, Cl, K a-b, Ti, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Ca



SLN-1816 A33

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb y posible As.

Low

Al, Cl, K a-b, Ti a-b, Cr, Cu, Zn

High

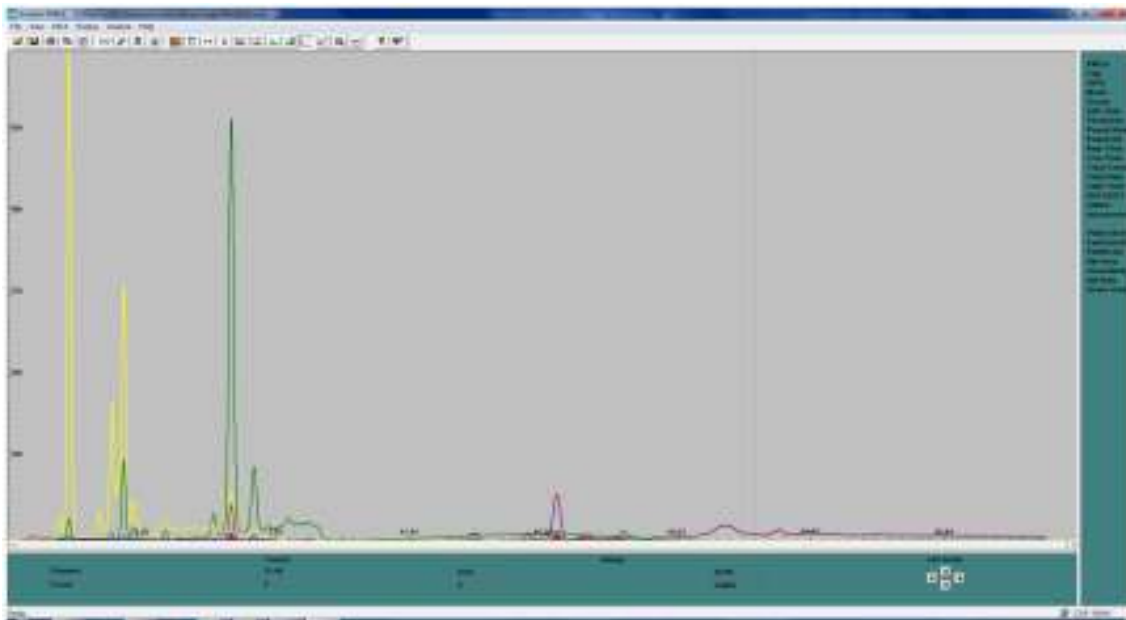
Mo (único diferente)

Light

Al, Cl, y posible Ca, Cr y V

Conjunto

Al, Si, Cl, K, Ti, Mn, Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb y posible As, Ca, Cr y V.



Soils

High

F?, Si?, K, Ti?, Mn, Fe a-b, Ni a-b, As, Rb a-b, Zr a-b, Nb a-b, Ag a-b y Cd.

Low

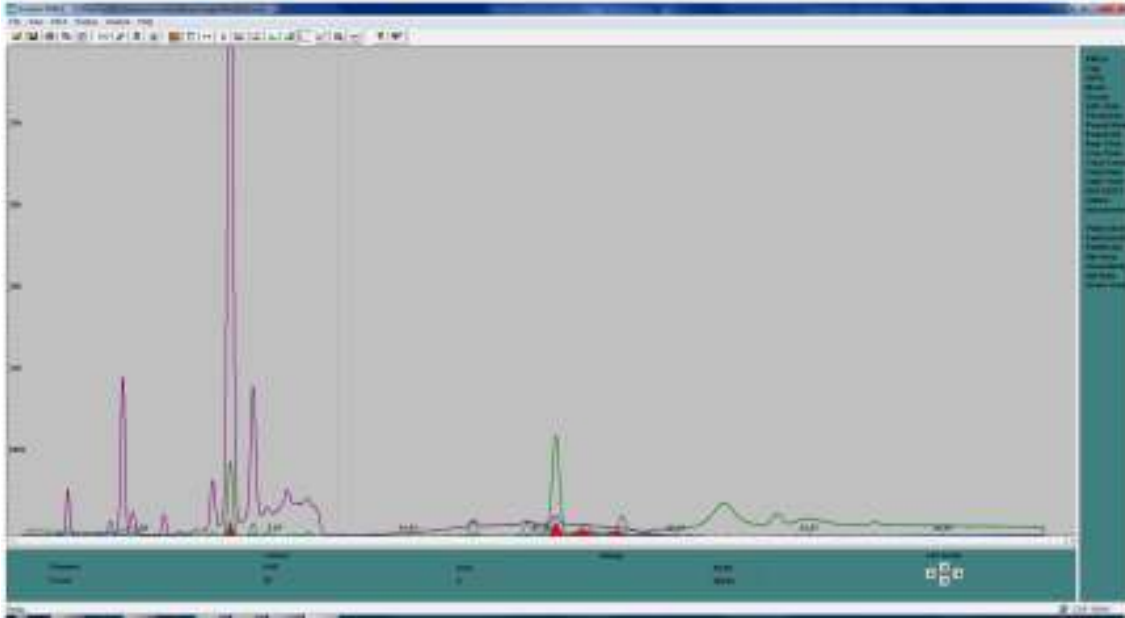
Al, Si, Cl, K a-b, Ca a-b, Ti a-b, Cr?, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Cu, As?, Rb a-b, Zr.

High

K, Mn, Fe a-b, Ni, Rb a-b, Zr, Nb a-b, Mo, Tc

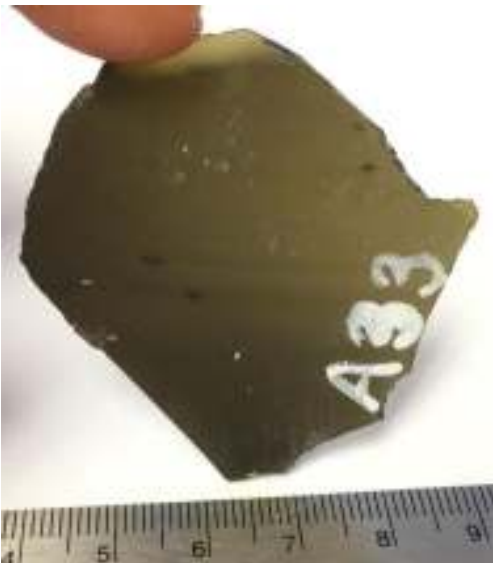
Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca a-b, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Cu, Rb a-b, Zr a-b, Nb a-b, Mo y posible F, As y Tc.



Todos

Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cr, Cu, Rb, Y, Zr, Nb, Mo y posible F, As y Tc.



SLN-1816 A4

Test All Geo

Main

Si, K a-b , Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Rb, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr

High

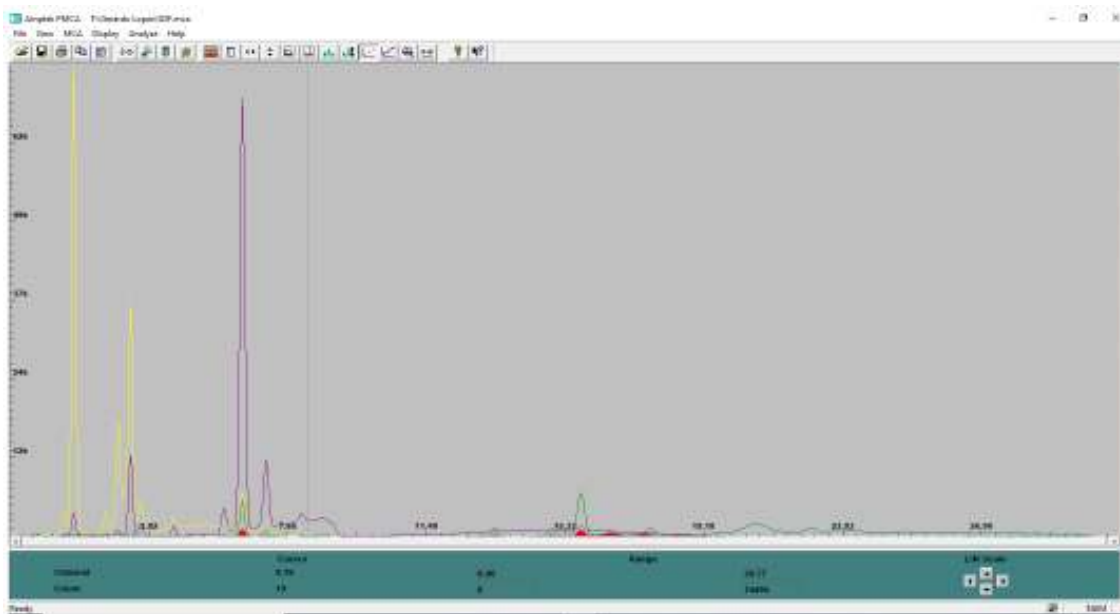
K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc

Light

Al, Si, Cl, K a-b, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b y posible Na y P

Conjunto

Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Na y P



Soils

High

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Rb a, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr

High

K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr, Nb, Mo a-b, Tc

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo a-b



Todos

Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Na y P



Evaluación Cualitativo en equipo semi-portátil FRXP (Universidad de Sonora)

SLN-1806 2

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, W, Zn, Ga, As, Pb La, Ac, Th La, Rb, Sr, Y, Zr a-b, Nb.

Low

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr a-b.

High

Light

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, W, Cu, Zn, Ga, As, Pb, Ac, Th, Rb, Sr, Y, Zr a-b, Nb



Soils

Main

Si, K a-b, Ca, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Ga, W Lb, As, Ac, Th La, Rb a-b, Sr, Y, Zr a-b, Nb a-b.

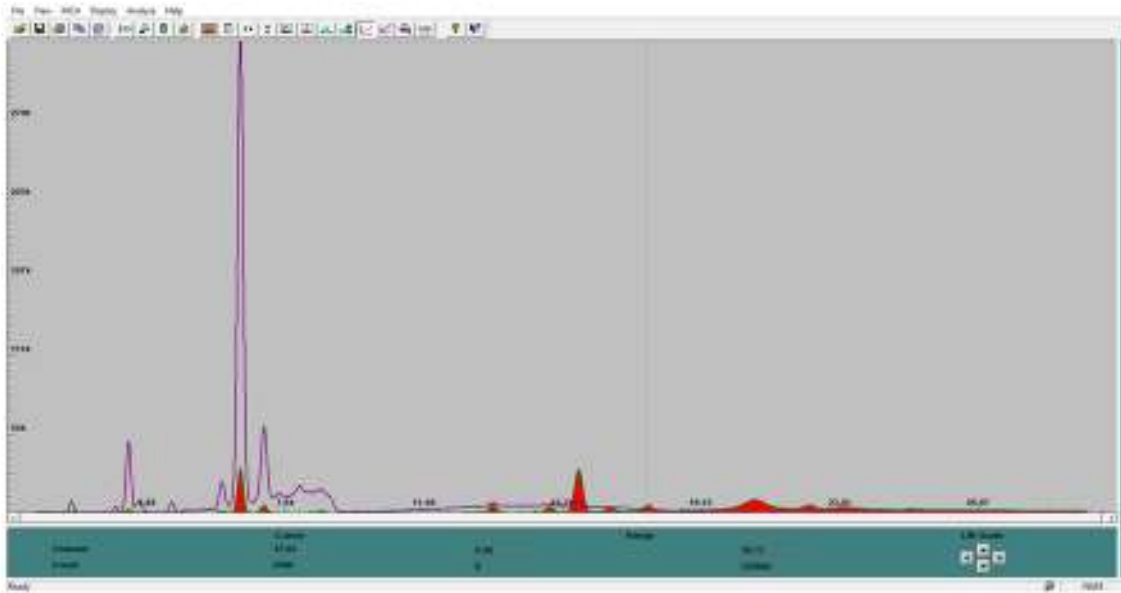
Low

Al, Si, P, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Ga, Zn, As, Rb, Y, Zr a-b

High

Conjunto

Al, Si, P, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Ga, W, As, Ac, Th, Rb a-b, Sr, Y, Zr a-b, Nb a-b



Todos

Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, W, Cu, Zn, Ga, As, Pb, Ac, Th, Rb, Sr, Y, Zr, Nb.



SLN-1816 A4

Test All Geo

Main

Si, K a-b, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Ac La, Th La, Rb, Sr, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low

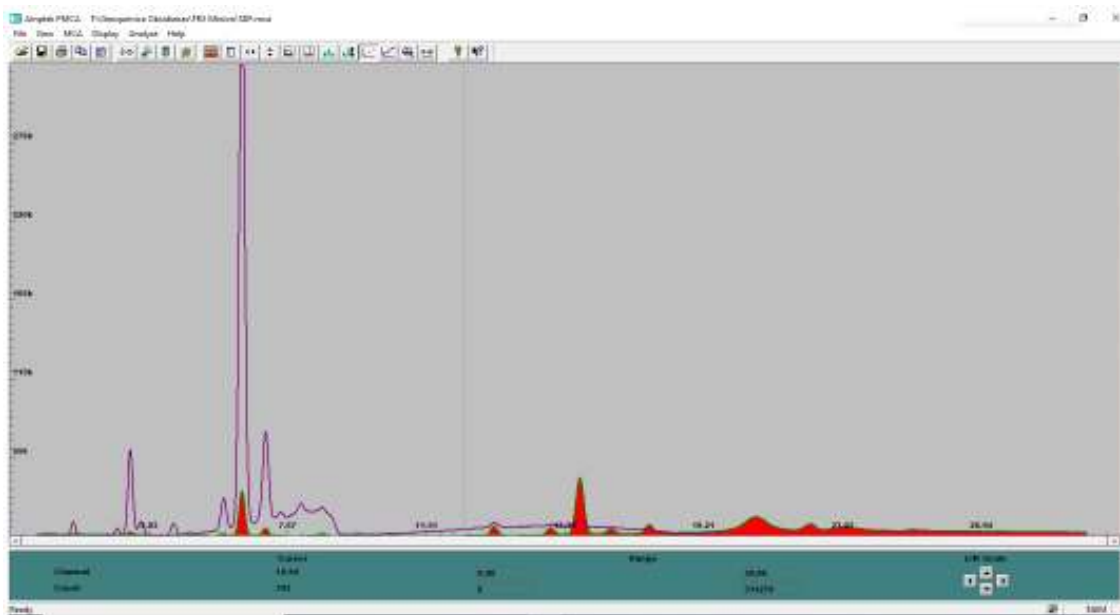
Mg b, Al, Si, S, Cl, K a-b, Ca b, Ti a-b, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Y, Zr a-b

High

Light

Conjunto

Mg, Al, Si, S, Cl, K a-b, Ca, Ti, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Ac, Th, Rb, Sr, Y, Zr a-b, Nb a-b



Soils

High

Si, K, Ti, Mn, Fe a-b, Ni a-b, Zn, Rb a, Y, Zr a-b, Nb a-b

Low

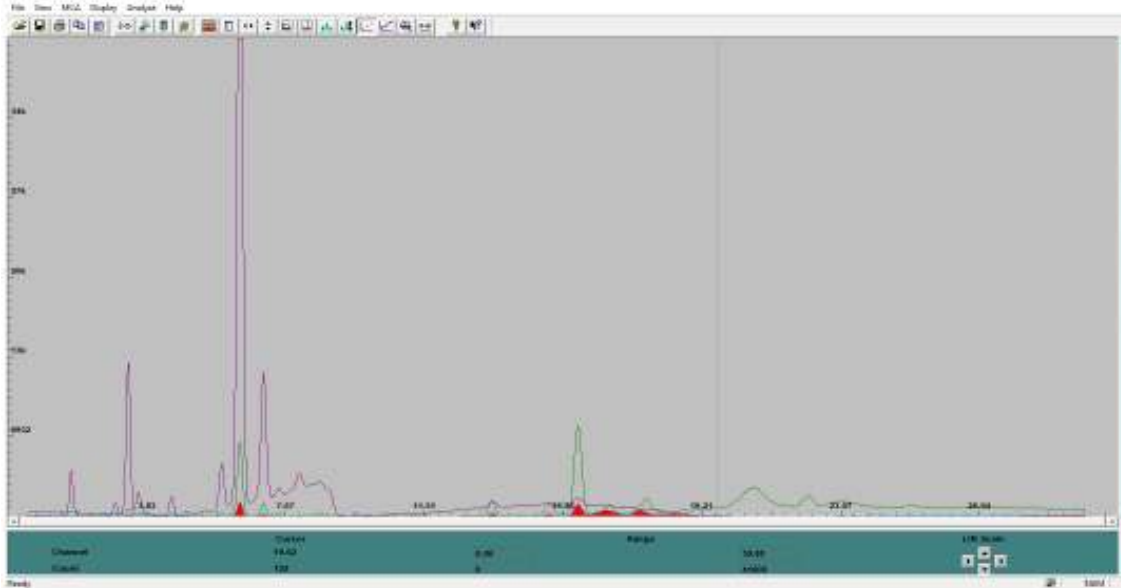
Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr

High

K, Mn, Fe a-b, Ni, Zn, Rb a-b, Zr, Nb, Mo a-b, Tc

Conjunto

Al, Si, Cl, K a-b, Ca, Ti a-b, Cr, Mn, Fe a-b, Ni, Cu, Zn, Rb a-b, Zr a-b, Nb, Mo a-b



Todos

Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Tc y posible Na y

P

