Modelo vulcanológico del volcán Cerro Prieto, B.C.

José Luis Macías Vázquez[1] y Víctor Santiago Rocha López[2]
[1]Instituto de Geofísica, UNAM, campus Morelia. [2]Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México. E-mail: santiago.rocha@cfe.gob.mx

Resumen
La estructura del volcán de Cerro Prieto se distingue como un rasgo geomorfológico constituido por dos estructuras volcánicas de conos de lavas y domos de composición dacítica en forma de elipse y orientación NE-SW, asociados al sistema de fallas Vulcano. Alcanza una elevación de 220 msnm y localizado a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, B.C. Se encuentra emplazado sobre un basamento granítico en la Planicie o Valle Aluvial de Mexicali (secuencia terrígena y sedimentos deltaicos del Río Colorado) que rellenan la depresión transtensional conocida como Salton Trough. Esta depresión está asociada al Sistema de Fallas San Andrés, de orientación NW-SE, ubicándose el volcán entre las fallas Cerro Prieto e Imperial. Otras estructuras del sistema de San Andrés son las fallas Cucapah, Laguna Salada y Elsinore. En la porción noreste del volcán hay actividad fumarólica con temperaturas superficiales de 42°C-50°C. El volcán Cerro Prieto es parte inherente del campo geotérmico, formado en una área tectónicamente activa debido a la separación de las placas de Norteamérica y del Pacífico, lo que da lugar a un proceso de rifting continental una de cuyas expresiones es el sistema de San Andrés con fallas con componentes de tipo lateral derecho. El volcán es en realidad un complejo volcánico compuesto por lava brechada dacítica, depósitos epiclásticos, lavas, domos y diques dacíticos, depósitos de caída, y depósitos de flujo de escombros tipo lahar. Fechamientos de $^{40}Ar/^{39}Ar$ hechos sobre muestras de la lava brechada (75 ± 16 ka**)** de su base y del dique dacítico (79±13ka**)** indican que la formación del complejo volcánico ocurrió hace aproximadamente 80 mil años. La actividad volcánica en este complejo se inició con la emisión de lavas dacíticas, las cuales al llegar cerca de la superficie probablemente atravesaron sedimentos saturados de agua provocando el brechamiento y/o enfriamiento brusco de la lava y mezclándose parcialmente con los sedimentos. Sobre estas lavas se emplazó posteriormente un domo dacítico. Posteriormente tuvo lugar el emplazamiento de los domos SW en distintas etapas. En general las todas las rocas volcánicas tienen una composición dacítica, con plagioclasas > piroxenos > cuarzo > hornblenda, en una matriz vítrea y microlítica. La composición química de estos magmas varía de 67 a 69% en peso de SiO_2, con contenidos medios de potasio. Su origen está probablemente asociado ya sea a la fusión del manto superior por descompresión o a la fusión de una parte de la corteza en donde yacen rocas de arco.

Palabras clave: Vulcanología, composición mineralógica, composición química, dataciones, fallas laterales, Sistema de San Andrés.

Volcanologic model of the Cerro Prieto Volcano, BC

Abstract
The Cerro Prieto volcano is composed of two structures of volcanic lava cones and domes of dacitic composition, ellipse-shaped and oriented NE-SW, related to the Vulcano fault system. It is at 220 masl, located 30 km southeast from Mexicali, BC. It was emplaced on a granitic basement on the Plain or Alluvial Valley of Mexicali (terrigenous sequence and deltaic sediments of the Colorado River) that fills the transtensional depression known as Salton Trough. This depression is associated with the San Andreas Fault System, NW-SE oriented, being the Cerro Prieto volcano placed between the Cerro

Prieto and Imperial faults. Other structures of the San Andreas System are the Cucapah, Laguna Salada and Elsinore faults. On the northeast volcano there is fumarole activity with surface temperatures of 42-50°C. The Cerro Prieto volcano is an inherent part of the geothermal field, formed on a tectonically active area due to the separation of the North America and Pacific plates. This volcano is actually a volcanic complex composed of brecciated dacitic lava, epiclastic deposits, dacitic lava, dikes and domes, and air-fall deposits and flow debris deposits of lahar type. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating on lava breccia samples (75 ± 16 ka) from its base and dacitic dike (79 ± 13 ka) indicate that volcanic complex formation occurred approximately 80,000 years. Over these lavas a dacitic dome was emplaced, and then a series of SW domes at different times. In general, all the volcanic rocks are dacitic, with plagioclase > pyroxene > quartz > hornblende in a glassy and microlitic matrix. Chemical composition of these magmas varies from 67 to 69% by weight of SiO_2, with mean contents of potassium. Their origin is related to mantle melting by decompression or partial melting of crust containing arc-rocks.



Fig. 1. Localización del Volcán Cerro Prieto.

Keywords: Volcanology, mineral composition, chemical composition, dating, lateral faults, San Andreas System.

1. Introducción

El estudio de la evolución volcánica y geoquímica del Volcán Cerro Prieto obedece al interés de actualizar la información sobre el mismo, debido a que se conoce muy poco de su estructura interna, edad absoluta, estructura volcánica y evolución. Este estudio se realizó mediante un contrato de servicios entre el Instituto de Geofísica de la UNAM y la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad. Sus dos objetivos centrales fueron:

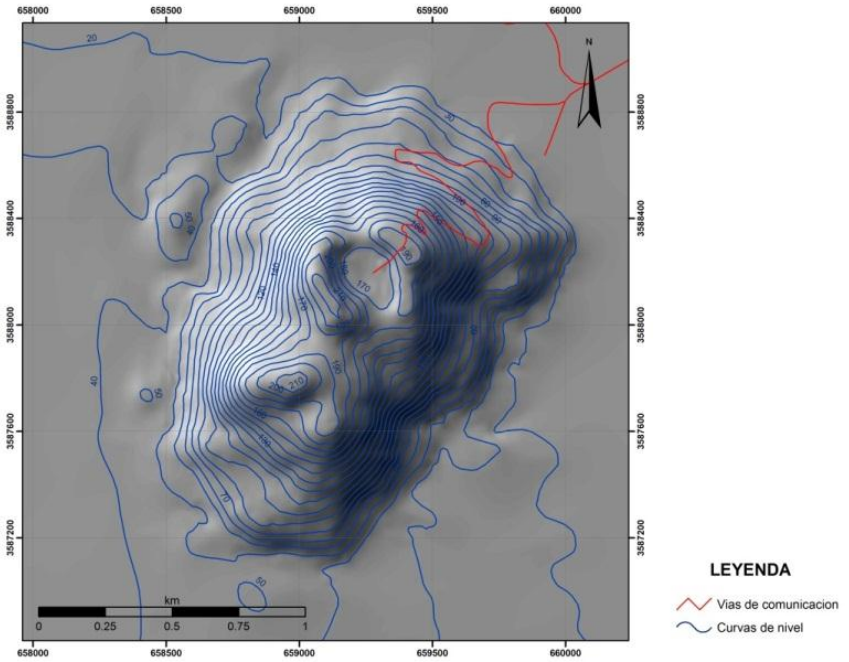

Fig. 2. Modelo digital de elevación del volcán Cerro Prieto.

- Realizar el primer estudio cartográfico y litoestratigráfico del Volcán Cerro Prieto (Complejo Cerro Prieto) con la ayuda de fechamientos radiométricos ($^{40}Ar/^{39}Ar$).

- Definir la petrología y evolución geoquímica del complejo volcánico.

El volcán Cerro Prieto (115°19' W y 32°25' N) se localiza a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali BC (Figura 1), en la Planicie o Valle Aluvial de Mexicali, compuesta por sedimentos deltaicos del Río Colorado que rellena una depresión conocida como Salton Trough, asociada al sistema de fallas de San Andrés.

2. Modelo digital de elevación (DEM)

Este modelo fue generado con el Programa ArcMap 9.3 con base en una carta topográfica con espaciamiento de curvas de nivel cada 10 m, y orto-fotomapas de escala 1:20,000. Se llevó a cabo una geo-referenciación con base topográfica para coincidir las coordenadas.

Con el mapa topográfico corregido se generaron los mapas altitudinales, pendientes y sombreados, y posteriormente se importo al Programa ILWIS 3.3 para concluir el DEM. Este último es la representación digital del terreno con información altitudinal en formato raster, donde cada pixel tiene una resolución de 5 m^2, así como los valores coordenados de X, Y y Z (Fig. 2).

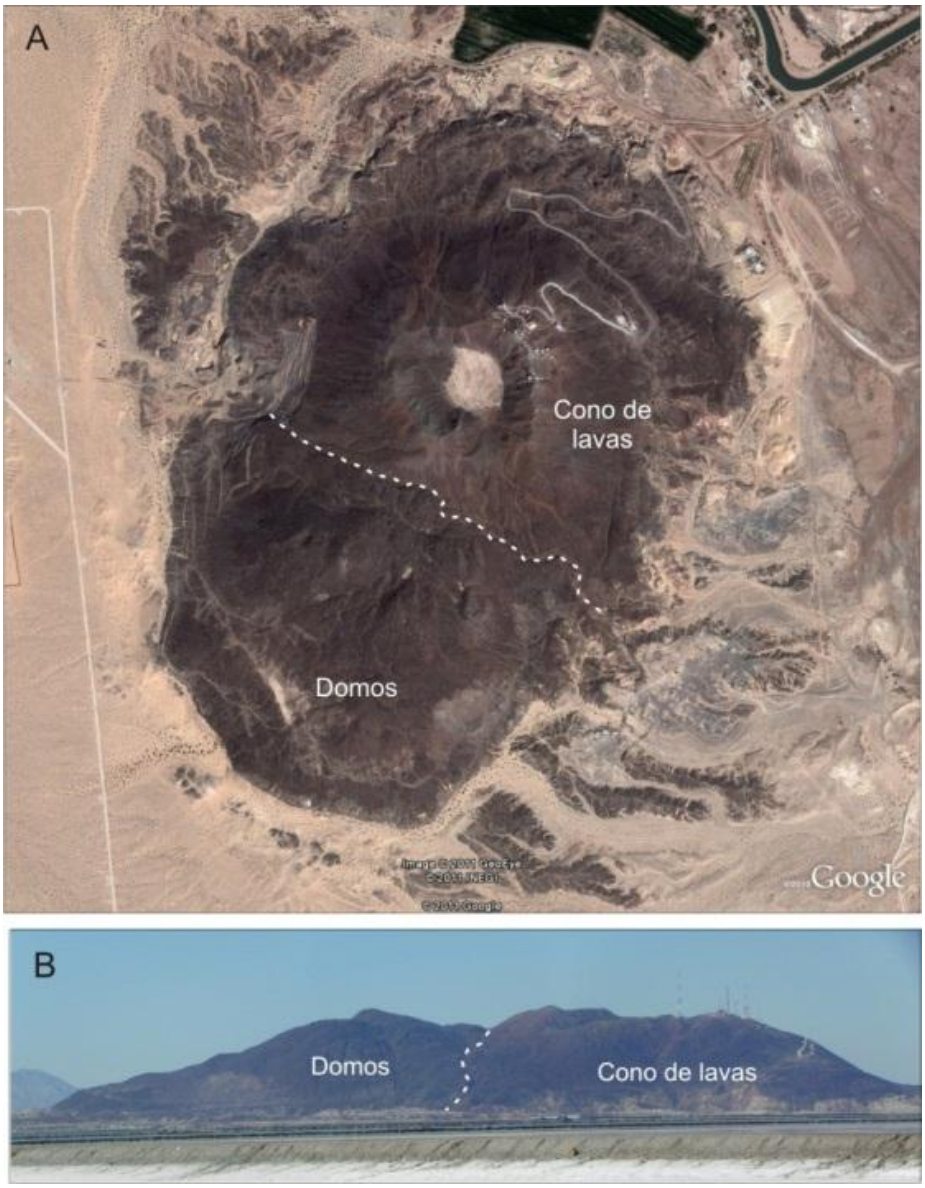

Fig. 3. A) Vista en planta del Volcán Cerro Prieto. El volcán consiste de dos estructuras volcánicas: un cono de lavas con un cráter central en su porción NE y varios domos ubicados al SW. La separación entre ambas estructuras está marcada por la línea blanca discontinua. B) Vista hacia el noroeste tomada desde el campo geotérmico, que muestra el límite entre los domos y el cono del volcán Cerro Prieto.

3. Geomorfología

El Complejo Volcánico alcanza una elevación de 210 msnm. Está compuesto por una brecha basal donde se levantan dos estructuras volcánicas complejas alineadas NE-SW: un cono de lava en su porción noreste y tres domos y lavas expuestos en su porción suroeste (Fig. 3). El cono de lava (Cerro Prieto) posee un cráter en forma de elipse con un diámetro en su eje mayor de 387 m por 337 m en su eje menor.

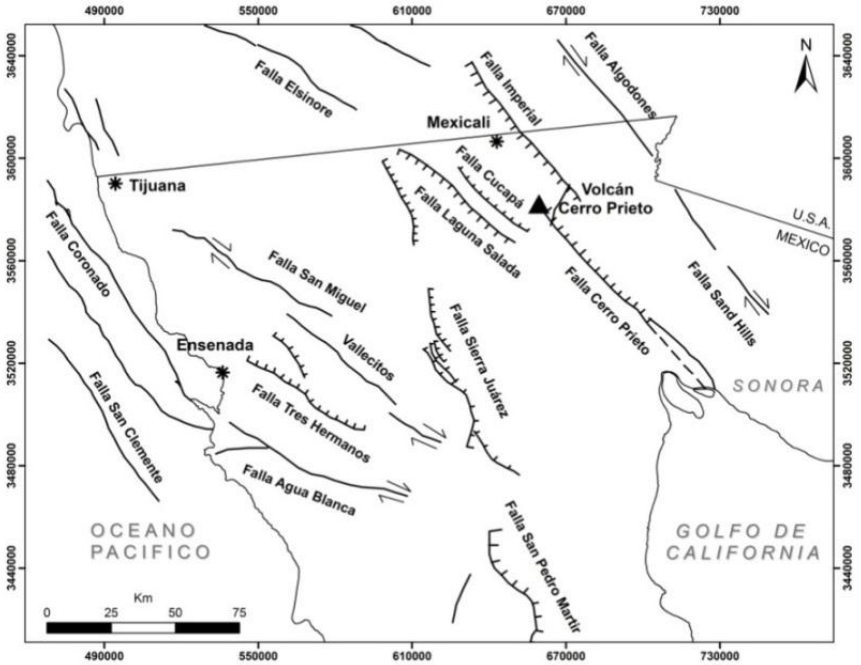

Fig. 4. Principales estructuras regionales periféricas al volcán.

4. Ambiente tectónico

El Valle de Mexicali, el campo geotérmico (CGCP) y el Complejo Volcánico de Cerro Prieto están situados al oriente de la Sierra de Cucapah, que tiene una orientación regional NW-SE. La región está dominada por el Sistema de Fallas San Andrés. Las estructuras locales inherentes al volcán Cerro Prieto tienen también una orientación NW-SE, siendo las principales las fallas Imperial, Cerro Prieto y Cucapah (Fig 4.), que son de tipo lateral derecho y dan lugar a depresiones o cuencas transtensionales (Puente y De la Peña, 1979).

5. Estratigrafía

5.1. Litología regional

Está constituida por rocas basamentales intrusivas y metamórficas del Triásico-Cretácico, que constituyen los principales alineamientos geomorfológicos NW-SE de la Sierra Cucapah. Le sobreyacen una secuencia de depósitos terrígenos y sedimentos deltaicos que constituyen la Planicie o Valle Aluvial de Mexicali del Terciario–Cuaternario, y finaliza con el emplazamiento del Complejo Volcánico de Cerro Prieto en el Cuaternario (Fig. 5).

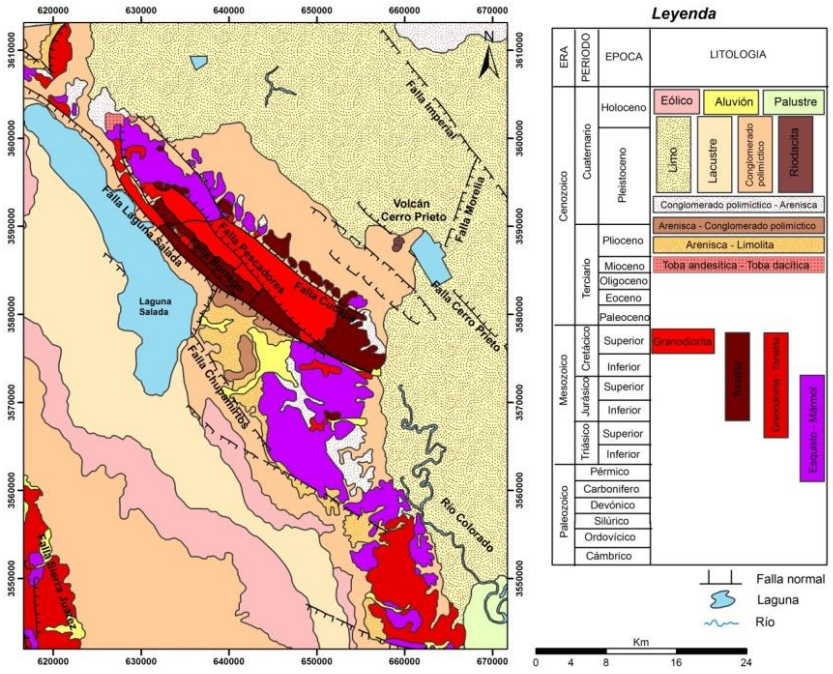

Fig. 5. Cartografía regional (tomada del SGM).

5.2. Litología del subsuelo

Todas las unidades del subsuelo han sido identificadas a partir de la descripción litológica de las muestras de núcleo y de canal obtenidas durante la perforación de los pozos geotérmicos (Lira, 2005; Aguilar, 2010).

Basamento granítico y metamórfico. Está constituido por granitos y granodioritas del Jurásico-Cretácico Superior, que afloran en su mayor parte en la Sierra de Cucapah. Estas unidades se correlacionan con las cortadas a 1478 m y 2792 m de profundidad en los pozos del campo.

Unidad de Lutita Gris. Constituida por sedimentos continentales que rellenaron la cuenca tectónica y que sobreyacen al basamento granítico. La componen lutitas y lutitas limolíticas de color gris a negro, con importantes intercalaciones de areniscas. Se le estima un espesor promedio de 3000 m. Por su posición estratigráfica, se le asignó una edad terciaria. Las areniscas son permeables y porosas y alojan a los fluidos geotérmicos, por lo que en su conjunto esta unidad es considerada como la zona productora del yacimiento (Izquierdo et al., 2006).

Unidad de Lutita Café. Está conformada por lutitas y lutitas limolíticas de color café, presentando intercalaciones de areniscas y arenas muy permeables de color café claro, cementadas principalmente por carbonatos. Su espesor varía desde unos cuantos metros hasta 500 m.

Lodolitas. Se encuentran sobre las unidades de lutita gris y lutita café. Presentan un color café con intercalaciones de arenas y gravas consolidadas.

Sedimentos clásticos no consolidados. Sobreyacen a las otras unidades y están compuestos por limos, arenas y algunas gravas del Cuaternario. Su espesor va desde los 400 m a los 2500 m. Son producto del material depositado por el Río Colorado y abanicos aluviales de la Sierra Cucapah.

5.3. Secuencia del complejo volcánico

Este complejo está compuesto por cinco unidades volcánicas y dos epiclásticas, que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente (Fig. 6). Todos los flujos del volcán presentan una polaridad magnética normal lo que sugiere una época magnética Brunhes no antes de 0.7 Ma (De Boer, 1980).

Lava Brechada Dacítica Cerro Prieto (LBDP). Conforma la base del complejo volcánico y alcanza un espesor de al menos 40 m. Presenta xenolitos redondeados de arenisca. Es de textura porfirítica con fenocristales de Plg + Qz (plagioclasas y cuarzo) en una matriz vítrea. Una muestra de roca de esta unidad fue fechada con el método de $^{40}Ar/^{39}Ar$ (roca total) dando una edad de 75 ± 16 ka.

Unidad de Depósito Epiclástico (DEi). Está expuesta alrededor del volcán y tiene un espesor aproximado de 8 m. Se trata de un depósito masivo de color amarillo claro, compuesto en su mayoría por fragmentos redondeados de cuarzo del tamaño de arena gruesa y en menor cantidad por cristales de Plag + Clinopiroxeno + Muscovita. Dentro del depósito se encuentran algunos clastos de arenisca, rocas lávicas y granito.

Lava Dacítica Cerro Prieto (LDCP). Conforma el edificio principal del cono de Cerro Prieto, y está constituida por varias coladas de lava en bloques que afloran en torno al edifico volcánico presentando un color gris oscuro alterando a rojo. Las rocas son de textura porfirítica con 20% de fenocristales de

Plg + Qz + Ortopiroxeno + vidrio alterado en una matriz vítrea. Debido a esta mineralogía se le asignó una composición dacítica.

Dique Dacítico Cerro Prieto (DDP). Este dique está expuesto en varias partes alrededor del cono de Cerro Prieto, al cual intrusiona. La roca es de color gris claro alterando a rojo. Presenta exfoliación vertical con una dirección que va de N40°-55°W y una inclinación de 47°-67° al SW. Se observan fracturas radiales por enfriamiento y zonas de brechamiento. Presenta una textura afanítica con pocos fenocristales (Plg + Hb + Opx + Cpx + Qz). Por esta mineralogía se le asignó una composición dacítica. Una muestra de esta unidad fue fechada con el método de $^{40}Ar/^{39}Ar$ (roca total) dando una edad de 79 ± 13 ka.

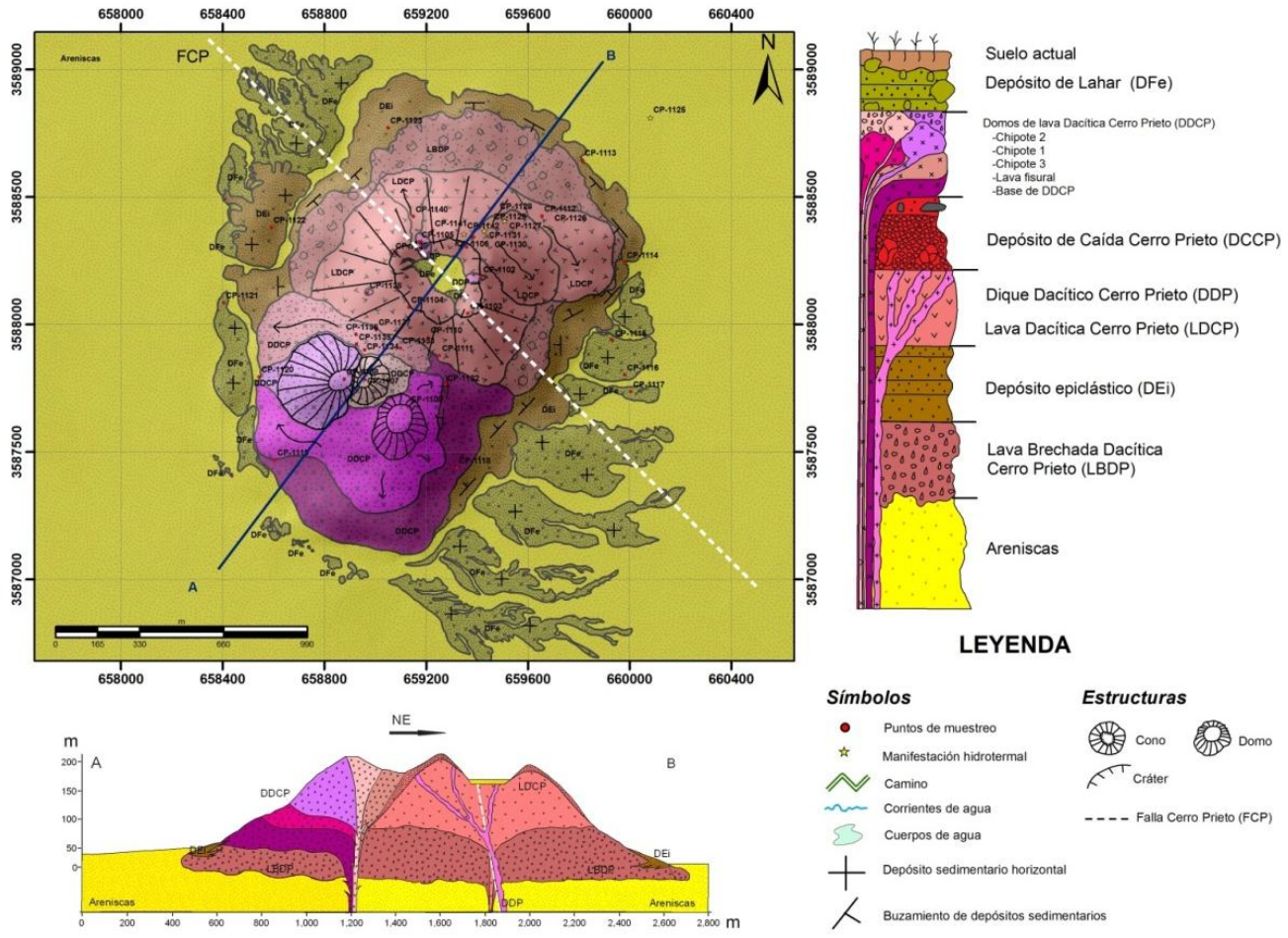

Fig. 6. Secuencia litológica del complejo volcánico de Cerro Prieto.

Depósito de Caída Cerro Prieto (DCCP). Está compuesta por depósitos de caída masivos, bloques angulosos de dacita, capas de caída piroclástica de color rojo a amarillo, masivas, compuestas por fragmentos angulosos de lapilli grueso de lava dacítica.

Domos de lava Dacítica Cerro Prieto (DDCP). Estos domos consisten de lavas en bloque de color gris oscuro que alteran a rojo. Son poco vesiculares con grietas de enfriamiento y esferulitas. La roca presenta textura porfirítica con 15% de fenocristales (Plg + Opx + Qz + Hb + Sanidino). Por esta mineralogía se le asignó una composición dacítica.

Unidad de Depósitos de Flujo de escombros (DFe). Es el depósito más reciente y se encuentra expuesto principalmente en las porciones NW y SE del Complejo Volcánico de Cerro Prieto. Alcanza un espesor aproximado de 5 m. Está constituido por una intercalación de depósitos de lahar: flujos de escombros hiper-concentrados y sedimentos fluviales. Fueron producidos por la erosión pluvial del Complejo Volcánico de Cerro Prieto.

6. Petrografía

Se llevaron a cabo análisis petrográficos de las unidades cartografiadas representadas en el mapa geológico (Fig. 6). Las descripciones petrográficas se realizaron con ayuda de un microscopio petrográfico, tomando en cuenta la textura de la roca, así como características particulares de cada fase mineral presente. La síntesis de las descripciones petrográficas se presenta en la Tabla 1.

Unidad	Roca	Cristalinidad	Granularidad	Textura	Mineralogía	Observaciones
LDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica	**Minerales (17%)**: Plg (7%), Opx (8%), Ox (2%). **Matriz (83%):** vitrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El opx se presenta como microfenocristal con bordes de reacción. El ox se en cuentra como microlito con bordes reabsorbidos. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota, como mineral de alteración, rellenando espacios entre los microlitos de plg.
DDP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica	**Minerales (10%)**: Plg (6.5%), Opx (2%), Ox (1%), Cpx (0.5%). M**atriz (90%):** vítrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox, opx y apatito. El opx se presenta como micro y fenocristal con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El ox se encuentra como microlito y microfenocristal con bordes reabsorbidos. El cpx se encuentra como microfenocristal de forma subhedral. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares.
LDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Traquítica	**Minerales (12%)**: Plg (7%), Ox (4.5%), Opx (0.5%). **Matriz (88%)**: Víetra con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg con textura de tamiz, bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y opx. Ox se encuentra como microlito con formas irregulares. El opx se encuentra como microfenocristal con bordes de reacción. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración.
DDP	Dacita	Hipocritalina	Inequigranular	Afírica con matriz traquítica	**Minerales (13%):** Plg (10%), Opx (2.3%), Ox(0.5%), Cpx (0.2%). **Matriz (87%):** vitrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan bordes reabsorbidos e inclusiones de apatito. El opx presenta bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y apatito. El ox se encuentra como microlitos con bordes reabsorbidos. El Cpx se encuentra como microfenocristal con bordes corroidos. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración.
DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica-Seriada	**Minerales (23.6%**): Plg (20%), Opx (2%), Ox (1%), Cpx (0.5%), Anf (0.1%). **Matriz (76.4%): vítrea con** microlitos de plag.	Fenocristales de plg presentan zonamiento y bordes reabsorbidos. El opx presenta bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El ox se encuentra como microfenocristal con bordes reabsorbidos. El cpx se encuentra con formas subhedrales. El anf se observa como fantasma, muy alterado y con bordes reabsorbidos. Presencia de ocas vesículas pequeñas e irregulares.
DDCP	Dacita	Hipocritalina	Inequigranular	Pilotaxítica-Traquítica-Seriada	**Minerales (19%):** Plg (9%), Ox (6%), Opx(4%). **Matriz (81%):** vitrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y opx. El ox se encuentra como microlito y microfenocristal con bordes reabsorbidos. El opx presenta bordes de reacción, mientras que pocos se encuentran remplazados por estos bordes de reacción. Se observan pocas vesículas medianas y alargadas.

DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxitica-traquítica-Seriada	**Minerales (10%):** Plg (5%), Ox (3%), Opx (2.5%). **Matriz (89.5%):** vítrea con microlitos de plg, opx.	Los fenocristales de plg presentan inclusiones de ox y opx. El ox se encuentra como microlito y microfenocristal con bon bordes reabsorbidos. El opx presenta bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares. Las plg muestran un continuo rango de tamaños.
LDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Traquítica	**Minerales (10.6%):** Plg (5.6%), Ox (4%), Opx (1%). **Matriz (89.4%):** vítrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El ox se presenta con forma pseudomorfa. Pocos opx presenta bordes de reacción, mientras que la mayoría se encuentra totalmente remplazados por los cristales de reacción. Se observa epidota rellenando espacios entre los microlitos.
LDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Afírica con matriz traquítica y variolítica	**Minerales (11%):** Plg (7.5%), Opx (2.4%), Ox (0.6%), Cpx (0.5%).	Algunos fenocristales de plg presentan textura de tamiz, bordes reabsorbidos e inclusiones de apatito. El opx presenta bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El ox se encuentra como microfenocristal con bordes reabsorbidos. El Cpx se presenta como microfenocristal con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares.
LBDP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Afírica con matriz pilotaxitica y variolítica	**Minerales (8.5%):** Plg (6%), Opx (2%), Ox (0.5%)). **Matriz (91.5%):** vítrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan macado tipo reloj de arena, bordes reabsorbidos e inclusiones de opx y ox. El opx presenta bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El ox se encuentra como microfenocristal con bordes reabsorbidos. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares.
DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Traquítica-Pilotaxitica	**Minerales (13%):** Plg (7%), Ox (3.9%), Opx (2%), Cpx (0.1%). **Matriz (87%):** vitrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y opx. El ox se encuentra como microlito, microfenocristal y fenocristal con forma subhedral-anhedral. El opx se encuentra como microlito, micro y fenocristal con inclusiones de ox. El cpx se presenta como fenocristal e inclusiones de ox. Presencia de pocas vesículas pequeñas y medianas con formas irregulares.
DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Traquítica-Pilotaxítica	**Minerales (13.5%):** Plg(7.5%), Ox (4%), Opx (2%). **Matriz (86.5%):** vítrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan inclusiones de ox y opx. Los cristales de ox se encuentran como microlito y mocrofenocristal subhedral-anhedral. Algunos cristales de opx presentan bordes corroídos. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración.
	Arenisca calcárea				**Minerales**: Qz, Microclina, plg, biotita	Arenisca compuesta por granos detríticos de Qz, microclina, plg y micas cementados por mineral de calcita. En general, la roca tiene un buen grado de selección (good sorting). Los minerales tienen formas que van de subangulosos a subredondeados.
DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica-Seriada	**Minerales (6.8%):** Plg (2.3%), Ox (2.5%), Opx (2 %). **Matriz (93.2 %):** vitrea con microlitos de plg.	Algunos fenocristales de plg presentan bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y opx. El ox se encuentra como microfenocristal con bordes reabsorbidos. El opx presenta bordes de reacción y algunos están totalmente remplazados por los cristales de reacción. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración.
DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica	**Minerales (6.5%):** Plg (2%), Ox (2.5%), Opx (2%). **Matriz (93.5%):** vítrea con microlitos de plg.	Fenocristales de plg con bordes reabsorbidos e inclusiones de opx y apatito. El ox se encuentra como microfenocristal con bordes reabsorbidos. El opx se encuentra con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y apatito. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración.

DDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Traquítica	**Minerales (7.4%)**: Plg (2.4%), Ox (3%), Opx (2%). **Matriz:** vítrea con microlitos de plg.	Fenocristales de plg con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox y opx. El ox se encuentra como microlito y microfenocristal con forma subhedral-anhedral. El opx presenta bordes corroídos e inclusiones de ox. Presencia de pocas vesículas medianas irregulares y epidota como mineral de alteración.
LDCP	Dacita	Hipocristalina	Inequigranular	Pilotaxítica	**Minerales (5.3%):** Plg (2.3%), Opx (1.5%), Ox (1.5%). **Matriz (94.7 %):** vítrea con microlitos de plg.	Fenocristales de plg con bordes reabsorbidos e inclusiones de ox. El opx presenta bordes de reacción e inclusiones de ox. El ox se encuentra como microfenocristal de forma subhedral-anhedral. Presencia de pocas vesículas pequeñas e irregulares y epidota como mineral de alteración

Tabla 1. Descripción petrográfica de muestras superficiales de roca del complejo de Cerro Prieto.

7. Geoquímica de roca total

Se realizaron análisis químicos de roca total en diez muestras seleccionadas, mediante el método de fluorescencia de rayos X para determinar la concentración de elementos mayores y algunos traza. Estos se realizaron en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de la UNAM. Las muestras también se analizaron por el método de ICP-MS para determinar la concentración de elementos traza, incluyendo tierras raras, lo que se llevó a cabo en los laboratorios de Activation Labs, en Canadá.

Las diez muestras analizadas cubren todas las unidades descritas en el mapa geológico. Se considera que cada análisis es representativos de la unidad a la que corresponde la muestra, dado que en general las unidades no presentan variaciones composicionales ni mineralógicas importantes. Cabe destacar que en la literatura son muy pocos los análisis que se reportan sobre el volcán Cerro Prieto, además de que en este informe se reportan datos de elementos traza y tierras raras que tampoco han sido incluidos en estudios previos.

En general las rocas del complejo de Cerro Prieto tienen una variación muy restringida, de 65 a 69% en peso (en base anhidra) de SiO_2 (Tabla 2), y todas caen en el campo de las dacitas (Fig. 7A; Le Bas et al., 1986; datos en base anhidra).

Muestra	CP-1101	CP-1104	CP-1105	CP-1107	CP-1108	CP-1109	CP-1112	CP-1113 A	CP-1133	CP-1140
Unidad	LDCP	LDCP	DDP	Chipote 2	Chipote 1	Chipote 3	LDCP	LBDP	DLDCP	LDCP
SiO_2	66.77	65.64	65.6	68.29	66.83	67.33	67.41	68.92	67.06	67.57
Al_2O_3	14.52	14.5	14.7	15.2	14.75	15.08	14.45	14.78	14.82	14.66
Fe2O3	4.51	4.58	4.47	4.76	4.56	4.63	4.49	4.66	4.82	4.69
MnO	0.089	0.097	0.089	0.094	0.09	0.092	0.09	0.092	0.093	0.093
MgO	0.73	0.93	0.63	0.74	0.82	0.82	0.63	0.63	0.86	0.69
CaO	4.08	4.5	3.97	3.14	3.66	3.6	3.16	2.87	3.91	4.08
Na_2O	5.31	5.13	5.21	5.23	5.15	5.15	5.31	5.28	5.12	5.26
K_2O	1.52	1.46	1.58	1.63	1.53	1.56	1.58	1.63	1.48	1.56
TiO_2	0.472	0.521	0.495	0.545	0.523	0.529	0.498	0.499	0.512	0.485
P_2O_5	0.14	0.16	0.11	0.13	0.13	0.13	0.11	0.13	0.15	0.13
PCX	1.77	2.55	1.46	1.19	2.1	1.46	2.11	0.19	2.14	1.46
Total	99.92	100.1	98.31	100.9	100.1	100.4	99.83	99.67	100.9	100.7

Tabla 2. Resultados de análisis químicos (en base anhidra) de elementos mayores sobre muestras del complejo volcánico.

La roca más ácida con el 69 % en peso SiO_2 (CP-1113A, ver Tabla 2) corresponde a uno de los domos localizados al SW del cráter de Cerro Prieto, presumiblemente una de las rocas más recientes de esta estructura volcánica.

Así mismo, usando la gráfica de Irvine y Baragar (1971), las muestras presentan valores bajos de álcalis (% en peso de K_2O + Na_2O), por lo que se trata de rocas sub-alcalinas (Fig. 7B). Usando la terminología de Pecerillo y Taylor (1976), todas las muestras caen en la serie calco-alcalina, con contenidos medios en potasio (Fig. 7C), lo cual llama la atención dado que el ambiente tectónico en el que se encuentra Cerro Prieto es de extensión, asociado a la apertura del Golfo de California o continuación al sur de la Falla de San Andrés, por lo que se esperaría tener magmas alcalinos ricos en K_2O (Sagong et al. 2001).

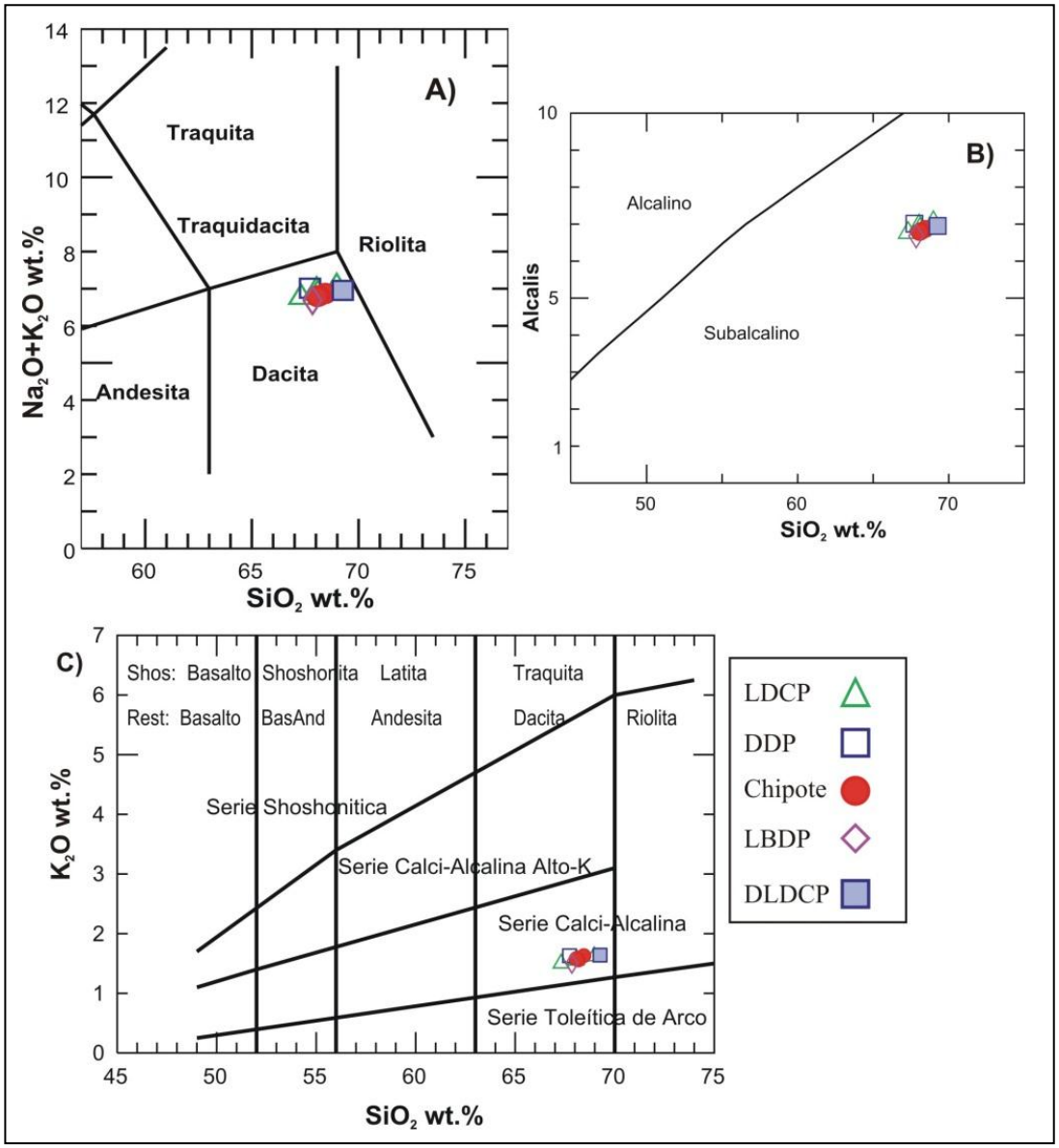

Fig. 7. Diagramas de clasificación de rocas: A) con base en los álcalis totales vs SiO_2 (Le Bas et al., 1986); B) álcalis vs SiO_2 con campos de alcalino y sub-alcalino (Irvine y Baragar, 1971); C) K_2O vs SiO_2 con campos de contenidos de potasio (Pecerillo y Taylor, 1976).

8. Génesis de los magmas

Con los datos que se tienen hasta el momento es difícil determinar cómo fue la génesis de los magmas que dieron origen a la estructura de Cerro Prieto. Esta complejidad radica en que no se observaron rocas máficas en ningún afloramiento, ya sea basaltos o incluso andesitas. Todas las rocas descritas son de composición dacítica y corresponden, por tanto, a rocas evolucionadas. Por lo tanto, para este caso no es posible decir por el momento a partir de qué magma fueron generadas.

Sin embargo, considerando el ambiente tectónico, caracterizado por una serie de fallas transtensivas, y que además se la zona de Cerro Prieto es un área que está en extensión, es probable que la génesis de los magmas que han originado las estructuras del complejo volcánico de Cerro Prieto esté relacionada con fenómenos de descompresión (relacionado con la apertura y el sistema "*pull apart*", pero las características geoquímicas no son concluyentes, por ejemplo el bajo contenido en K_2O (Fig. 7B).

Es recomendable, por tanto, llevar a cabo estudios isotópicos, tanto de las rocas estudiadas, como de algunas rocas básicas de los alrededores o bien de las reportadas en el subsuelo de campo geotérmico en algunos pozos.

9. Evolución volcánica del complejo de Cerro Prieto

La actividad volcánica empezó con el emplazamiento de una lava dacítica (LBDP) en las areniscas y sedimentos terrígenos saturados en agua (DEi) provenientes del Río Colorado (ver Figura 6 para identificar las claves de las unidades). Este evento tuvo lugar hace 75 ± 16 ka. El contacto entre la lava caliente a unos 920°C y los sedimentos provocó su brechamiento (LBDP), la formación de vidrio volcánico y la formación de bolsas brechoides dentro de los sedimentos.

La actividad volcánica continuó con la emisión de lavas dacíticas que eventualmente formaron uno o varios domos dacíticos (LDCP), que fueron intrusionados por un dique de la misma composición (DDCP) y que arrojó una edad $^{40}Ar/^{39}Ar$ de 79 ± 13 ka. Las dos edades radiométricas obtenidas en este trabajo y sobre todo su rango de incertidumbre, indican que estos dos eventos ocurrieron muy cercanos en el tiempo y por ende la formación del Complejo Volcánico de Cerro Prieto tuvo lugar en unos cuantos cientos a miles de años.

La actividad volcánica continúo con una erupción violenta que formó un cráter con un diámetro 387 × 337 m, aproximadamente, que representa el actual cono de Cerro Prieto. La explosión produjo un depósito de caída (DCCP) compuesto por fragmentos de lava dacítica del domo previo (LDCP). No se aprecia material juvenil en la explosión, por lo que es probable que este evento haya sido de origen freático, debido al sobrecalentamiento de agua intersticial en el substrato sedimentario, lo que habría generado una sobrepresión en el conducto volcánico. La presencia de fragmentos con estructura de rompecabezas en varias partes del depósito de caída y con fracturas de hidratación termal (*hydration cracks*) sugiere que las rocas estaban calientes y que contenían una cierta cantidad de agua en forma de vapor.

La actividad magmática migró unos 400 m hacia el suroeste para dar lugar a la emisión casi continua de varios domos dacíticos, ubicados hacia la parte suroeste del cono de Cerro Prieto (DDCP). La actividad continuó con la emisión de una lava fisural que surgió entre los domos DDCP y el cono de lava Cerro Prieto. Esa lava, que fluyó hacia el NW, representa la actividad lávica más reciente de LDCP.

Posteriormente, todas las rocas del Complejo Volcánico de Cerro Prieto han sido re-movilizadas hacia la planicie alrededor de la estructura volcánica, originando depósitos de lahar (flujos de escombros e hiper-concentrados) y sedimentos fluviales (DFe). Debido a que existe nula o muy poca cubierta vegetal sobre las rocas del complejo volcánico, este material es fácilmente removido por lluvias extraordinarias.

10. Conclusiones

- El volcán Cerro Prieto es en realidad un complejo volcánico compuesto por lava brechada dacítica, depósitos epiclásticos, lavas domos y diques dacíticos, depósitos de caída, y depósitos de flujo de escombros tipo lahar.

- La estructura del volcán de Cerro Prieto se distingue como un rasgo geomorfológico constituido por dos estructuras volcánicas de conos de lavas y domos de composición dacítica, forma de elipse y orientación NE-SW.

- El cono de lava de Cerro Prieto posee un cráter en forma de elipse con un diámetro de 387 m en su eje mayor por 337 en su eje menor.

- El volcán Cerro Prieto se encuentra emplazado sobre un basamento granítico en la Planicie o Valle Aluvial de Mexicali, que rellena la depresión transtensional conocida como Salton Trough. Esta depresión está asociada al Sistema de Fallas San Andrés, de orientación NW-SE.

- Fechamientos de $^{40}Ar/^{39}Ar$ hechos sobre muestras de roca total de la lava brechada (75 ± 16 ka) de su base y de un dique dacítico (79 ± 13 ka)**,** indican que la formación del complejo volcánico ocurrió hace aproximadamente 80 mil años.

- La composición química de los magmas que dieron origen al vulcanismo varía de un 65% a un 69% en peso de SiO_2, con contenidos medios de potasio.

- Las estructuras relacionadas con el complejo volcánico de Cerro Prieto tienen orientación NW-SE. De ellas, las fallas Imperial, Cerro Prieto y Cucapah presentan una componente lateral derecha y dan lugar a la formación de depresiones o cuencas transtensionales.

- La litología superficial incluye rocas basamentales intrusivas y metamórficas del Triásico-Cretácico, una secuencia de depósitos terrígenos y sedimentos deltaicos que constituyen la Planicie o Valle Aluvial de Mexicali, de edad Terciario-Cuaternario, y el emplazamiento del Complejo Volcánico de Cerro Prieto, ocurrido en el Cuaternario.

- La secuencia litológica del Complejo Volcánico de Cerro Prieto está compuesta por cinco unidades volcánicas y dos epiclásticas. Todas las unidades volcánicas son de composición dacítica, con una variación química muy restringida, de 65 a 69 % en peso (en base anhidra) de SiO_2.

- Las dacitas pertenecen a la serie calco-alcalina de Pecerillo y Taylor (1976), lo que llama la atención por la ubicación tectónica del complejo volcánico que haría esperar magmas más ricos en K_2O.

Referencias

Aguilar, A., 2010. Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 23, No. 2, pp. 33-40.

De Boer, J., 1980. Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes volcanic domes in the northern part of the Gulf of California rhombochasm. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*. Comisión Federal de Electricidad and Departament of Energy, pp. 1-8.

Irvine, T.N., W.R.A. Baragar, 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **8**, pp. 523-548.

Izquierdo, G., A. Aragón, E. Portugal, V.M. Arellano., J. de León, y J. Álvarez, 2006. Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México. *Geotermia*, Vol. 19, No. 2, pp.2-12.

Le Bas, M.J., R.W. Le Maitre, A. Streckeisen, and R. Zanettin, 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, **27**, pp. 745-750.

Lira, H., 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico del Cerro Prieto. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.

Peccerillo, A., and S.R. Taylor, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 58, pp. 63-81.

Puente, I., and De la Peña, A., 1979. Geology of the Cerro Prieto Geothermal Field. *Geothermics*. **8**, pp. 155-175.

Sagong, H., S.T. Kwon, C.S. Cheong, and S.H. Choi, 2001. Geochemical and isotopic studies of the Cretaceous igneous rocks in the Yeongdong Basin, Korea: Implications for the origin of magmatism in pull-apart basins. *Geosciences Journal*, Vol. 5, No. 3, pp. 191-201.