

## Actualización vulcanológica del complejo de Las Tres Vírgenes, BCS

José Luis Macías Vázquez<sup>1</sup> y Esteban Jiménez Salgado<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geofísica, UNAM, campus Morelia. <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México. E-mail: [esteban.jimenez01@cfe.gob.mx](mailto:esteban.jimenez01@cfe.gob.mx)

### Resumen

Se llevó a cabo la actualización geológica y estratigráfica del Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV), ubicado en la porción norte de Baja California Sur en un área de interés de 105 km<sup>2</sup>. Mediante mapeo de campo, estratigrafía y la ayuda de dataciones de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar se definieron veinte unidades volcánicas. El CVTV está emplazado en un sistema de fallas laterales derechas de dirección NW-SE asociado a la apertura del Golfo de California. Este sistema genera fallas de ángulo bajo (R) que se comportan como fallas derechas (Sistema Bonfil) y fallas de ángulo alto (R') que se relacionan con una zona de tensión, responsable de la formación del CVTV (falla lateral izquierda Cimarrón). Este complejo se levanta sobre un basamento cristalino (99.1 ± 0.8 Ma) que no aflora en el área de estudio pero que ha sido cortado en los pozos geotérmicos y que ha aparecido como xenolitos en varios depósitos más recientes. Le sobreyacen rocas vulcano-sedimentarias del Mioceno del Grupo Comondú (Andesita Santa Lucía), el Basalto La Esperanza (7.64 ± 1.16 Ma) y rocas volcánicas y epiclásticas del Plioceno Tardío a Pleistoceno de las calderas de Reforma (1.34-1.09 Ma) y El Aguajito (0.5-0.76 Ma). El CVTC consiste de tres aparatos volcánicos alineados y denominados, del más antiguo al noroeste hacia el más reciente al suroeste, como El Viejo (198 ± 42 ka), El Azufre y La Virgen. El Viejo se formó mediante la extrusión de varios domos y lavas dacíticos y sufrió el colapso de su flanco norte produciendo una avalancha de escombros hacia el arroyo El Azufre. El volcán El Azufre se formó de la misma manera, mediante la destrucción de su domo central y el emplazamiento de flujos piroclásticos de bloques y cenizas a su alrededor y la emisión final de un nuevo domo central. La actividad volcánica migró sobre una fisura eruptiva con la formación de conos de escoria, hasta dar lugar al emplazamiento del volcán La Virgen, el más meridional y reciente de los tres. Este volcán se ha construido a través de la efusión de domos y lavas basáltico-andesíticas a dacíticas y muy pocas erupciones de tipo explosivo, una erupción pliniana (Pómez La Virgen ~36 ka) y otra de tipo vulcaniano (Mezquital). Las erupciones más recientes se han originado a través de varias fisuras en la cima del volcán y han fluido hacia sus flancos. Las rocas del CVTV y de sus conos periféricos varían de basaltos (olivino + clinopiroxeno + plagioclasas), andesitas basálticas (plagioclasas + clinopiroxenos + ortopiroxenos + olivino), andesitas (plagioclasas + ortopiroxenos + clinopiroxenos + hornblenda + cuarzo) hasta dacitas (plagioclasas + hornblenda + ortopiroxenos + clinopiroxenos + biotita + cuarzo). Químicamente se trata de rocas sub-alcalinas de tipo calco-alcalino y contenidos medios de potasio. Los magmas que las originaron fueron generados a profundidad y se han estacionado a unos 7 a 9 km por debajo del CVTV antes de entrar en erupción. Esta profundidad concuerda con la actividad sísmica asociada al movimiento de fluidos en el yacimiento geotérmico que ocurre entre 2 y 7 km.

**Palabras clave:** Evolución vulcanológica, estructuras, fallas, vulcanismo, tectónica, Golfo de California.

### Localización

El Campo Volcánico de Las Tres Vírgenes (CVTV) está localizado en la porción norte del estado de Baja California Sur, en la península de Baja California. La principal vía de acceso es la Carretera Federal No. 1 que conecta Santa Rosalía con Ensenada. Desde el poblado de Santa Rosalía se toma la Carretera Federal No. 1 hasta el kilómetro 27, aquí se toma una carretera pavimentada al norte que conduce a las instalaciones de la CFE y comunica la porción oriental del área de estudio. Se puede tomar otra terracería que comunica la parte occidental del área de estudio, continuando otros

15 km sobre la misma Carretera Federal no. 1 y unos 5 km antes del poblado de Bonfil. Esta terracería comunica con el caserío pesquero de Santa Ana ubicado a 36 km al norte (Figura 1).

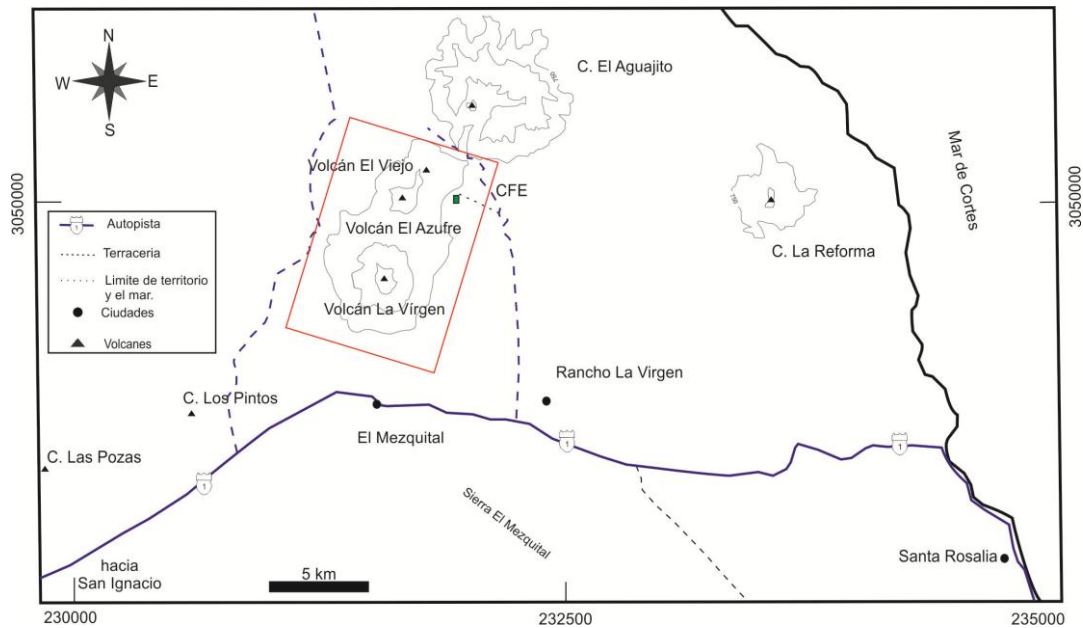


Fig. 1. Ubicación del Campo Volcánico de Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y principales vías de acceso. En rojo se aprecia la zona de estudio.

## Geología

El CVTV se encuentra localizado dentro del dominio tectónico transtensional del sistema de fallas laterales derechas que provocaron la separación de Baja California del occidente de México, configurando el actual Golfo de California o Mar de Cortés. Este proceso se inició hace 12 Ma, pasando transicionalmente de un ambiente de subducción de las placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa de Norteamérica a un ambiente de rift después de los 5 Ma.

Dentro del campo volcánico y sobre un basamento formado por rocas que van del Cretácico ( $99.1 \pm 0.8$  Ma) al Plioceno, se pueden reconocer tres grandes complejos volcánicos y de evolución diferente: la Caldera de Reforma, la Caldera del Aguajito y el Complejo Volcánico de Las Tres Vírgenes (Fig. 2). En este último se pueden definir dos subgrupos: Domos y Volcán La Virgen. El

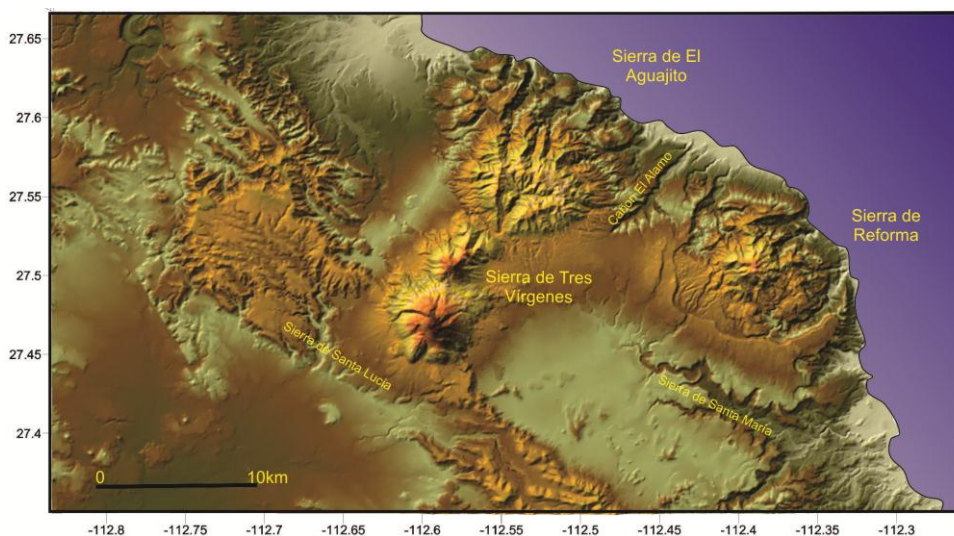


Fig. 2. Principales edificios volcánicos de la zona.

primero está constituido por los domos del Viejo y el Azufre, donde hasta ahora se ha desarrollado el campo geotérmico, con mucha alteración y que forman parte del vulcanismo ligado a una estructura NNE-SSE. Ambos tienen estructuras de colapso hacia el NNE y paralelos a la fractura. La edad del Viejo es de al menos 180 mil

años. El otro subgrupo es el del Volcán La Virgen. Se trata de un edificio volcánico con una altura máxima de 1800 msnm formado a partir de una fractura eruptiva de orientación casi NNE-SSW, con edades de al menos 36,000 años al Reciente. Dentro del edificio de La Virgen se aprecia un antiguo centro localizado al SE, donde se encuentra instalada la actividad reciente. El edificio antiguo perdió su geometría en el sector NW, donde se aprecia actividad efusiva importante que enmascara el colapso del edificio. La parte NE del edificio ha sido formada por la efusión de grandes derrames de lava y pequeños crecimientos de domos (Figura 2).

## Geología estructural

Se pueden separar rasgos con dos orientaciones preferenciales: NW-SE y NNE-SSE, formados todos ellos sobre secuencias mayoritariamente volcánicas soportadas por secuencias sedimentarias y magmáticas. Entre las estructuras principales están las siguientes.

La Sierra de Santa Lucía (Bonfil) se compone de un relieve de clara tendencia NW-SE que estructuralmente conforma un alto estructural delimitado por estructuras con geometría de fallas normales que configuran un horst, con elevaciones que van de 770 msnm a 258 msnm. Las fallas conforman los escarpes con pendientes más pronunciadas que tienden hacia la vertical. Las litologías de lavas e ignimbritas soldadas generan escarpes pronunciados que han labrado importantes cañones. Los drenajes son muy marcados, de tipo dendrítico y paralelo. Las sierras de Las Tres Vírgenes, Bonfil, Reforma y Aguajito tienen una tendencia NW-SE, mientras que el CVTV tiene una dirección NE-SW y forma parte de la falla Cimarrón (Figura 2).

La Sierra de Reforma, que geológicamente constituye una caldera resurgente con levantamiento de granitos cretácicos, de 1240 msnm, constituye un relieve índice en la región de Santa Rosalía. La forma de esta sierra es obviamente circular, ya que está gobernada por un colapso caldérico de aproximadamente 10 km de diámetro y desniveles aproximados de 50 m. Ocurren varios tipos de drenaje desde radial (intrusivo cretácico) y en los flujos piroclásticos; concéntrico, que está ligado a los colapsos, paralelo, relacionado con fallas y fracturas de orientación NE-SW y N-S, y dendrítico, en donde afloran depósitos epiclásticos y de flujo piroclástico.

La Sierra de El Aguajito conforma un relieve que varía de 0 a 1120 msnm, gobernado por una falla normal de orientación NNE-SSE. Este esquema estructural permitió un desarrollo de drenaje profundo con desniveles importantes, sobre todo los ocasionados por la Falla Cimarrón. Los flancos este y oeste, así como partes en su centro ocupado por rocas volcánicas del Plioceno, están disectadas por un drenaje de tipo dendrítico. En su flanco norte se distinguen una serie de domos y coladas de lava de composición ácida. El cañón El Álamo, que divide a las sierras de El Aguajito y La Reforma, tiene un desnivel de más de 200 m.

La Sierra de Las Tres Vírgenes es también un complejo volcánico formado por tres cúspides (El Viejo, El Azufre y La Virgen) de orientación NNE-SSW que se sobreponen a la morfología de la Sierra de Santa Lucía. El Viejo tiene una cima de 1245 msnm y una base de 680 msnm y está controlado por un drenaje paralelo de orientación NNE-SSE. El Azufre con una cima de 1600 msnm y una base a 770 msnm, también presenta un drenaje profundo semejante al del Viejo, pero sus flancos tienen un drenaje radial. El aparato volcánico más imponente es el de La Virgen con una cima a 1927 msnm y una base a 545 msnm. Todo su flanco norte está ocupado por productos efusivos, los cuales parecen enmascarar un colapso abierto hacia el NNW. Más adelante se describe esta sierra con más detalle.

Desde un punto de vista tectónico se pueden reconocer dos sistemas estructurales que han disectado a las rocas sedimentarias del Mioceno-Plioceno y han influido en el vulcanismo de la zona. El primer sistema corresponde a una serie de fallas normales de dirección NW-SE ligadas al

inicio de la apertura del Golfo de California. Estas estructuras producen bloques caídos hacia el NE (Golfo de California) y SW, labrando la Sierra de Santa Rosalía formada por el Grupo Comondú y por las Andesitas Santa Lucía. El segundo sistema lo conforman fallas laterales regionales de dirección NNW-SSE y NW-SE (Falla Bonfil) de tipo derecha, y estructuras de dirección NE-SW con componente normal (Falla Cimarrón). Este sistema está asociado a un sistema de Riedel con estructuras de bajo ángulo (Falla de Bonfil) y alto ángulo (Falla Cimarrón). Es en este sistema de Riedel, activo, donde se han desarrollado los campos volcánicos de Reforma, Aguajito y CVTV.

Con la finalidad de comprender mejor a cada estas estructuras se describe su geometría, sobre todo de aquellas que intervienen en la conformación del CVTV, conformado por los volcanes El Viejo, El Azufre, La Virgen y varios aparatos volcánicos de tipo monogenético.

Las fallas El Campamento y Mezquital son estructuras que conforman una serie de sierras paralelas a la costa del Golfo de California, que en los sectores de Santa Rosalía y La Reforma presentan bloques caídos hacia el NE. Estas estructuras afectan a las unidades vulcano-sedimentarias del Mioceno-Plioceno y en la zona de estudio conforman, junto con las unidades cretácicas, el basamento del CVTV.

### *Sistema de Fallas de Bonfil*

Hacia el SW del volcán La Virgen y por debajo de este mismo se encuentran una serie de estructuras lineales que controlan los drenajes principales y/o la morfología de las unidades cuaternarias. Dentro de ellas destaca la Falla de Bonfil, que es una falla lateral derecha con dirección  $N35^\circ$ , con una longitud de 25 km, y un desnivel vertical de 10 m. El desplazamiento horizontal es de aproximadamente 400 m, ambos acumulados. Se considera que esta estructura es una falla de bajo ángulo de la falla principal de El Mezquital.

La Falla Bonfil es una falla activa que podría presentar sismos actualmente. La estructura tiene un movimiento aparente hacia el SW. En el campo es poco usual encontrar los planos de esta falla, pero los depósitos de aluvión del arroyo principal de Bonfil están deformados, seguramente por eventos sísmicos recientes (Fig. 3).

Hacia el este de la Falla de Bonfil aparecen otros dos segmentos, con menos relieve pero que conservan el rasgo de posibles fallas activas y que están controlando los principales afluentes. La dirección de estos dos segmentos es NW-SE, con longitudes de 6 km y con



**Fig. 3. Trazo de la falla activa de Bonfil (Santa Lucía) donde se ve un desplazamiento acumulado de aproximadamente 400 m en forma lateral derecha.**

muy baja conservación de sus escarpes y con geometría que resulta en un aspecto de falla con una componente lateral importante. Hacia el SE y NW del Volcán La Virgen se observan rasgos rectilíneos que controlan parte de los afluentes de las rocas del Plioceno-Mioceno que podrían pertenecer a este sistema de fallas de Bonfil; estas estructuras estarían afectando también al vulcanismo actual.

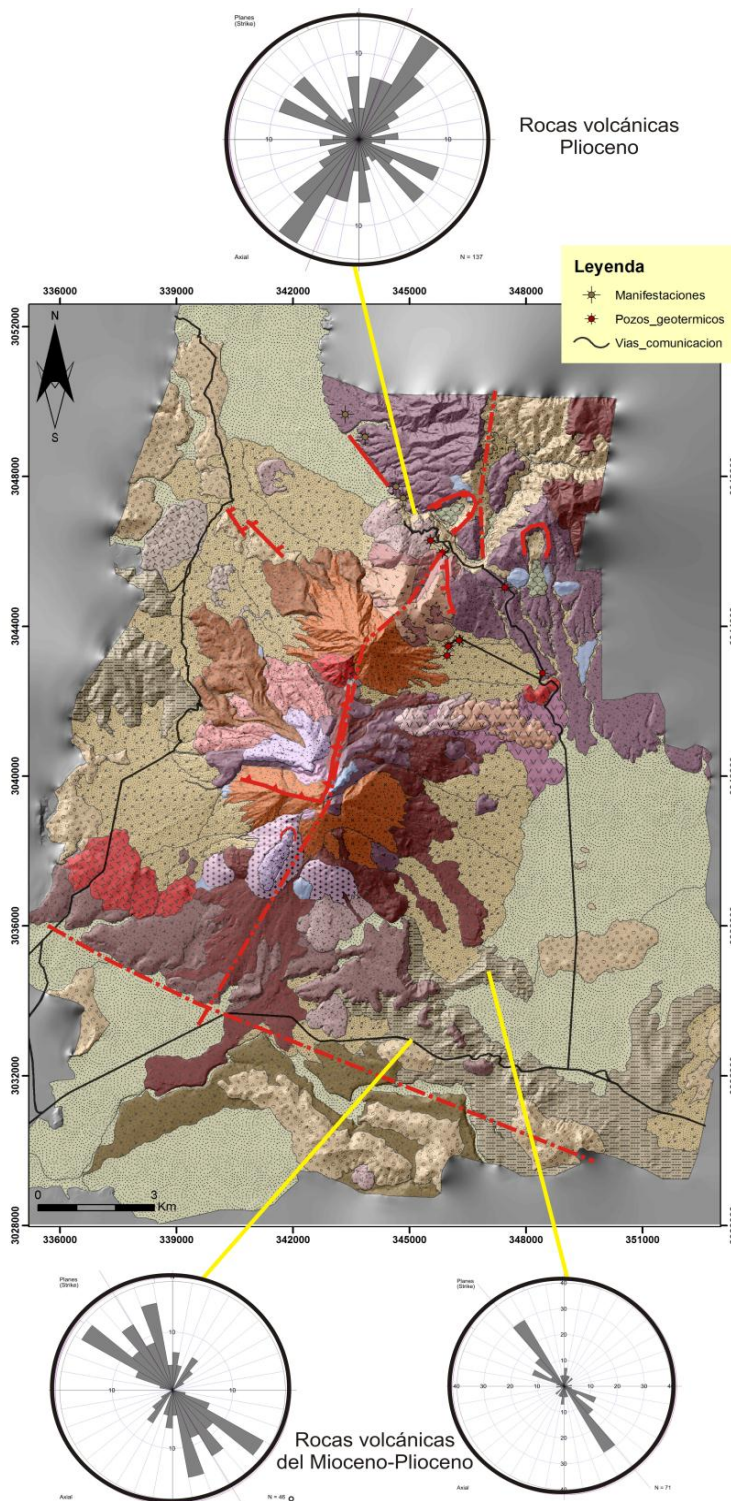


Fig. 4. Carta geológica con las principales estructuras del CVTV. Diagramas Rosa con las principales tendencias de fallamiento y fracturamiento de los tres sitios estudiados. Los trazos rojos corresponden a estructuras mayores, destacando de nuevo la fractura eruptiva de Las Tres Vírgenes.

### Análisis mesoestructural

En campo se realizó un análisis mesoestructural en tres zonas estratégicas del CVTV para comprender el fracturamiento y fallamiento de las rocas que forman parte del yacimiento geotérmico y cuidando que los datos, junto con lo realizado a nivel regional, ayudaran a entender la cinemática de la deformación en esta zona con evidencias de fallamiento activo. En la Figura 4 se presentan las tres zonas estudiadas (Sierra de Santa Lucía, Lomas del Campamento, al sur, y Cañón de El Azufre, al norte).

Se observa que en las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno de la Sierra de Santa Lucía y Lomas del Campamento, las estructuras planares de fallas y fracturas tienen orientaciones que en forma general se podrían considerar como NW-SE. En forma detallada se observa que se agrupan en tres grupos con direcciones  $N10-20^{\circ}W$ ,  $N30-40^{\circ}W$  y  $N50-60^{\circ}W$ . Estas estructuras son coherentes con las grandes estructuras de las fallas Mezquital y El Campamento. No obstante, también se observan estructuras de dirección NNW-SSE.

La tercera zona fue la del Cañón de El Azufre. Las estructuras medidas en las secuencias sedimentarias marinas y en las rocas volcánicas de la Caldera de El Aguajito presentan tendencias de orientación NE-SW, predominando las estructuras  $N30-40^{\circ}E$ , es decir en correspondencia con la Falla Cimarrón.

### Estratigrafía general del CVTV

Los tres volcanes que le dan su nombre al complejo volcánico (Las Tres

Vírgenes) se emplazaron a lo largo de una fisura eruptiva de dirección NNE-SSW. El más antiguo ( $198 \pm 42$  ka) es el volcán El Viejo, compuesto por rocas andesíticas y dacíticas, en su mayoría domos, derrames de lava y flujos piroclásticos de bloques y ceniza y epiclásticos. Después de las erupciones ocurrió el colapso de su flanco norte, lo que produjo una avalancha de escombros hacia el Arroyo El Azufre. Al migrar la actividad eruptiva hacia el sur-suroeste se formó el volcán El Azufre, compuesto por rocas similares pero de composición predominantemente dacítica. Un domo central original fue destruido, emplazándose después flujos piroclásticos de bloques y cenizas en su derredor, y finalmente se emplazó un nuevo domo central. El volcán La Virgen, por su parte, es el más reciente ( $< 36$  ka) presenta la mayor variación en cuanto al tipo de rocas y composición mineralógica. Aunque tiene un dominio de derrames de lava y domos, presenta algunas secuencias piroclásticas importantes como los depósitos La Virgen y El Mezquital.

Alrededor del complejo volcánico existen varios conos de escoria interestratificados con los productos del mismo CVTV.

El mapa geológico del CVTV se presenta en la Figura 5. Las diferentes unidades litológicas aflorantes se agruparon en 29 unidades, de acuerdo a su posición estratigráfica.

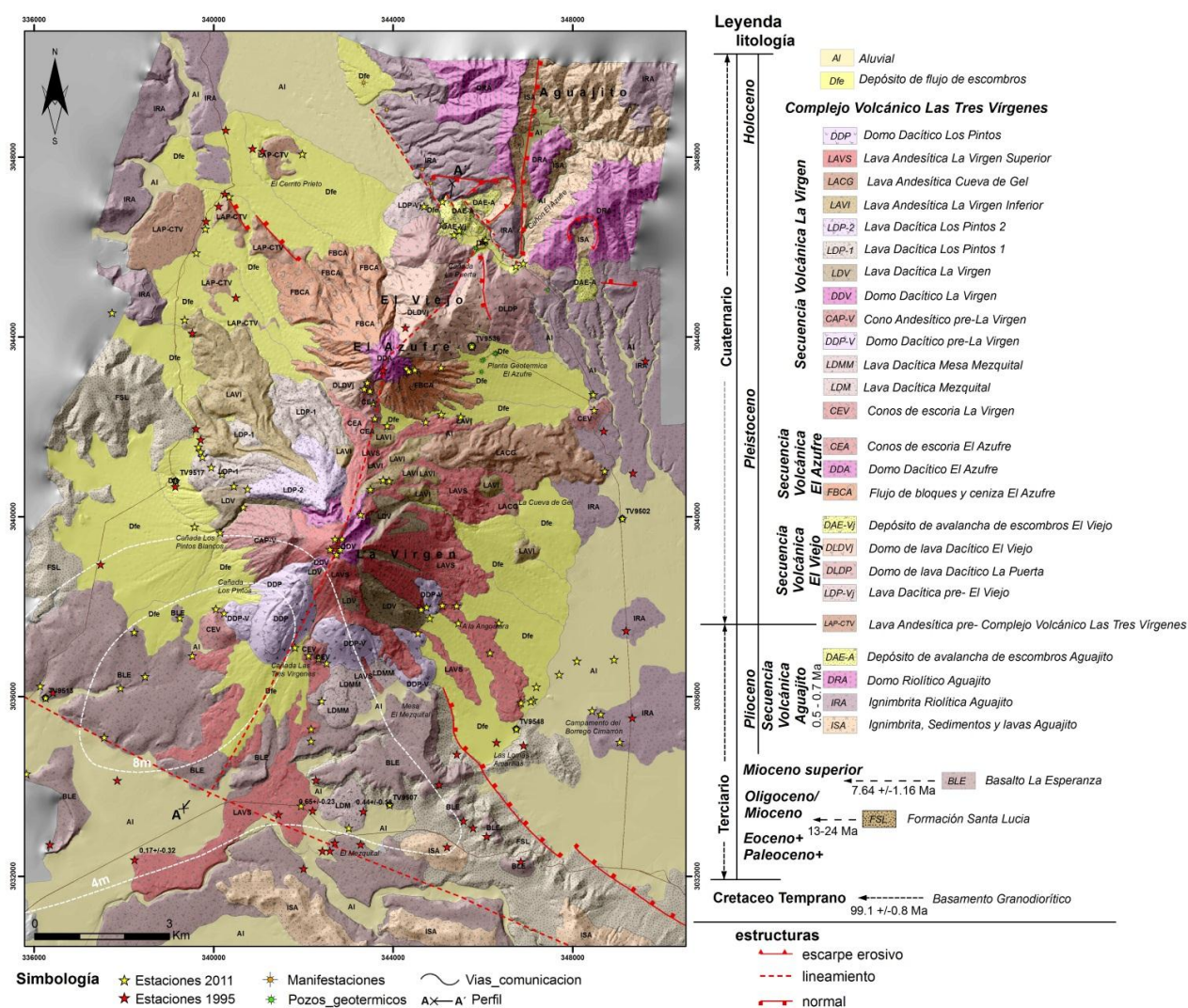


Fig. 5. Mapa geológico del CVTV.

En cuanto a su composición mineralógica, las rocas volcánicas del CVTV y de sus conos periféricos incluyen basaltos (olivino + clinopiroxeno + plagioclasas), andesitas basálticas (plagioclasas +

clinopiroxenos + ortopiroxenos + olivino), andesitas (plagioclasas + ortopiroxenos + clinopiroxenos + hornblenda + cuarzo), y dacitas (plagioclasas + hornblenda + ortopiroxenos + clinopiroxenos + biotita + cuarzo). De acuerdo con su composición química se trata de rocas sub-alcálinas de tipo calco-alcálico y contenidos medios de potasio. Los magmas que las originaron fueron generados a profundidad habiéndose estacionado a unos 7 a 9 km por debajo del CVTV, antes de entrar en erupción. Esta profundidad concuerda con la actividad sísmica asociada al movimiento de fluidos en el yacimiento geotérmico que ocurre entre 2 y 7 km.

Por su parte, el modelo geológico conceptual aparece en la Figura 6. Es un perfil topográfico con la sección estratigráfica del área estudiada donde puede observarse la interdigitación de las diversas unidades litológicas, la mayor parte de las cuales aflora con las características señalada en la Figura 5. También se ubicó la posición de dos de los pozos geotérmicos perforados por la CFE (pozos LV-2 y LV-4).

Finalmente, la columna estratigráfica generalizada del CVTV se presenta en la Figura 7.

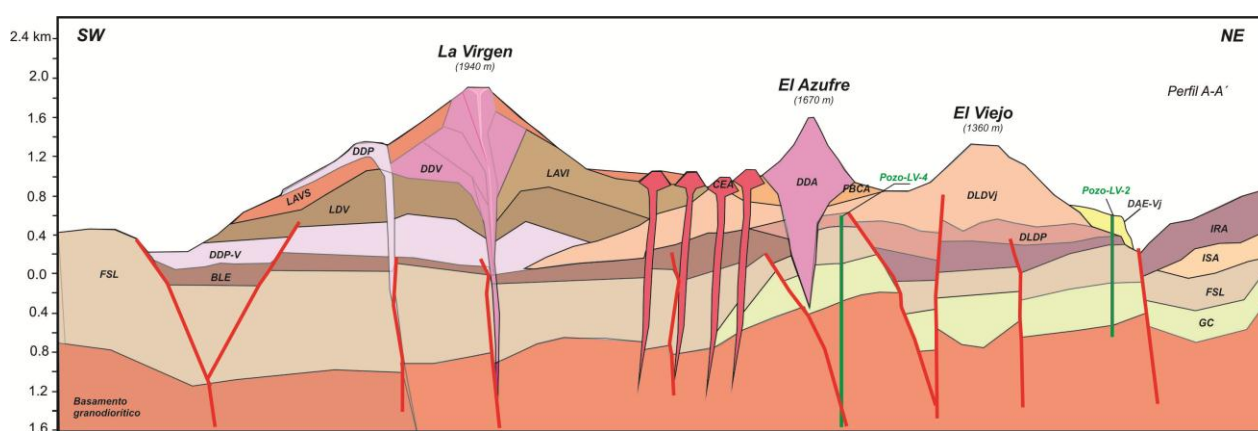


Fig. 6. Perfil topográfico y sección estratigráfica del área de estudio.

## Bibliografía

- Capra, L., Macías, J.L., Espíndola, J.M., Siebe, C., 1998. Holocene Plinian eruption of La Virgen volcano, Baja California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 80, pp. 239-266.
- Demant, A., 1981. Plio-Quaternary volcanism of the Santa Rosalia area, Baja California, Mexico. In: Ortlieb, L., Roldan-Quintana, J. (Eds.), *Geology of Northwestern Mexico and Southern Arizona*, Field Guides and Papers. UNAM, Inst. Geol., Estación Regional del Noroeste, México D.F., pp. 295-307.
- Fabriol, H., L.A. Delgado-Argote, J.J. Danobeitia, D. Córdoba, A. González, J. García-Abdeslem, R. Bartolomé, B. Martín-Atienza, and V. Frías-Camacho, 1999. Back scattering and geophysical features of volcanic ridges offshore Santa Rosalia, Baja California Sur, Gulf of California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93, pp. 75-92.
- Garduño-Monroy, V.H., H. Vargas-Ledezma, and O. Campos-Enríquez, 1993. Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, pp. 47-58.
- Gastil, R.G., R.P. Phillips, and E.C. Allison, 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 140, 170 p.
- Gastil, R.G., R.P. Phillips, and E.C. Allison, 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, pp. 839-857.

Hausback, B.P., 1992. Blocky pyroclastic flow deposits at Volcano Las Tres Virgenes, Baja California Sur, Mexico. *Resúmenes de la Tercera Reunión Nacional, Volcán de Colima*, Universidad de Colima, México, pp. 64–65\_abstract.

Hausback, B.P., and M.G. Sawlan, 1995. Eruption of La Virgen tephra, Volcán Las Tres Virgenes. Baja California Sur, México. *Memorias de la Tercera Reunión Internacional sobre Geología de la Península de Baja California*, Abril 17-21, 1995.

Hausback, B.P., and M.J. Abrams, 1996. Plinian eruption of La Virgen Tephra, Volcán Las Tres Virgenes, Baja California Sur, Mexico. *Eos Transactions*, 77 (46 Suppl.), pp. 813-814.

Hausback, B.P., and M.J. Abrams, 1997. La Virgen Tephra, Volcán Las Tres Virgenes, Baja California Sur, Mexico. *IAVCEI General Assembly*, p. 38\_abstract.

Ives, R.L., 1962. Dating of the 1746 eruption of Tres Virgenes volcano, Baja California del Sur, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 73 (5), pp. 647-648.

Sawlan, M.G., 1986. Petrogenesis of Late Cenozoic volcanic rocks from Baja California Sur, Mexico. Ph. Doctoral Thesis, University of California. Inédito.

Schmitt, A.K., D.F. Stockli, and B.P. Hausback, 2006. Eruption and magma crystallization ages of Las Tres Virgenes (Baja California) constrained by combined  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$  and (U-Th)/He dating of zircon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158, pp. 281-295.

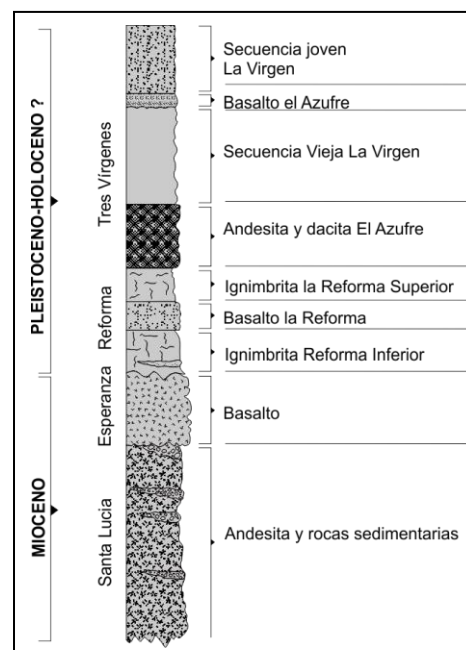


Fig. 7. Columna litoestratigráfica generalizada del CVTV.