

# CAPÍTULO V

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 5.1 Discusión

A pesar de que no se cuenta con información geocronológica de la mayoría de las rocas descritas en el área de estudio, se ha podido establecer la historia geológica aproximada del CVST-SCT a partir de datos geológicos, estratigráficos y escasas edades aportadas por trabajos de López-Hernández (2009) y García-Palomo et al. (2002). El primer autor señala, en su estudio geológico regional, que existió una importante actividad volcánica en el sector Pachuca-Apan-Cerro Grande (parte oriental de la FVTM). Dicho autor propone que la actividad volcánica inició en las localidades de Real del Monte y Pachuca, y después ésta migró del NW al SE, dentro de la FVTM (Figura 5.1). Así, en los alrededores de la Ciudad de Apan se emplazaron lavas andesíticas con espesores que van de los 800 a los 900 m, y este magmatismo continuó con dirección al SE, hasta el poblado de Santiago Tetlapayac, donde se emplazaron domos riolíticos acompañados de extensos depósitos de ignimbritas. Estos depósitos tienen una edad  $^{38}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  de  $12.6 \pm 0.4$  Ma (López-Hernández, 2009).

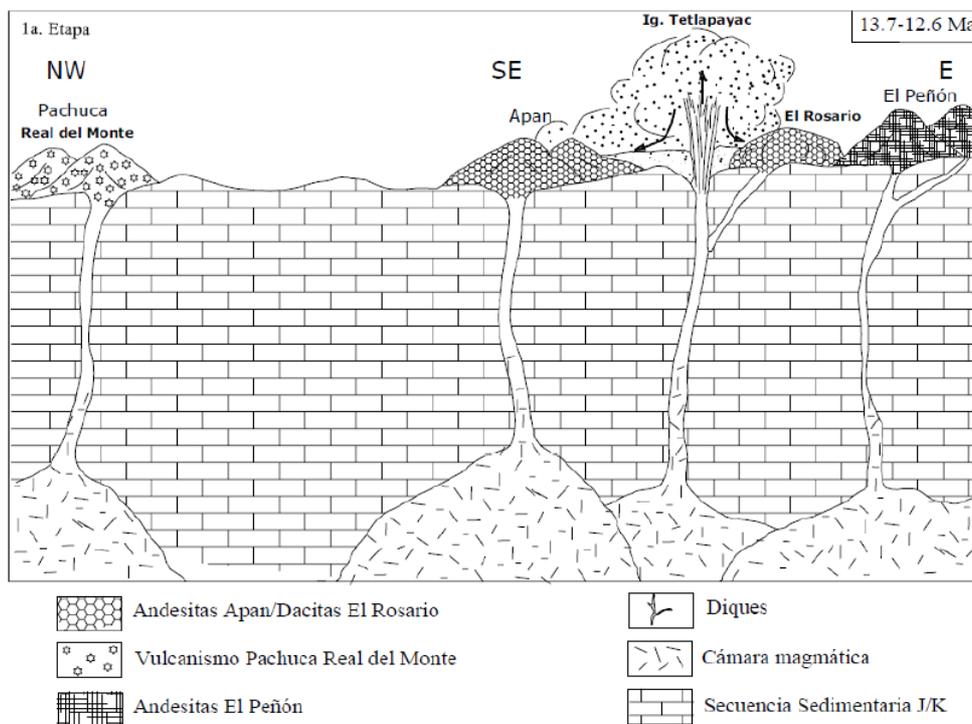


Figura 5.1. Esquema del vulcanismo Pachuca-Apan-El Peñón (Tomado de López-Hernández, 2009).

Con anterioridad, García-Palomo et al. (2002) propusieron que, dentro del área de estudio se produjeron dos episodios magmáticos principales: el primero de edad Mioceno (~13.4 a 5.3 Ma) y el segundo durante el Plioceno-Pleistoceno (~2.1 a 1.5 Ma). Las edades de estos eventos fueron propuestas a partir de fechamientos realizados por estos autores y por trabajos previos como los de Ledezma-Guerrero (1987) realizados en la región de Apan-Calpulalpan. A partir de las edades de estos dos eventos se puede remarcar, que en esta porción de la FVTM existió un “hiatus” magmático cercano a los cinco millones de años.

En la presente tesis se pudieron identificar lavas y depósitos piroclásticos pertenecientes a los dos episodios magmáticos, los que fueron agrupados en dos eventos magmáticos principales: Unidad Volcánica Inferior y Unidad Volcánica Superior.

Tomando como base las descripciones geológicas, estratigráficas y petrográficas realizadas en campo y en laboratorio, y de acuerdo a datos previos de los autores antes mencionados, se puede deducir que las rocas que formaron a la Unidad Volcánica Inferior se emplazaron de la siguiente manera:

Los primeros flujos piroclásticos en emplazarse en el área fueron los depósitos de la Ignimbrita Tetlapayac con una edad de 12.6 Ma (López-Hernández, 2009). Le siguieron flujos piroclásticos que formaron la Ignimbrita Las Pailas, y una serie de domos, coladas de lava y espigas volcánicas de composición dacítica-riolítica que formaron los cerros de Los Órganos, La Defensa, Blanco y Terrerillos. Por último, se emplazó un extenso depósito de ignimbritas con alto contenido de pómez blanca que se denominó Ignimbrita No-diferenciada. Posterior a esta serie de emplazamientos volcánicos de composición dacítica a riolítica (>66% de sílice), se tiene un período de inactividad volcánica e intensa erosión sobre la región durante aproximadamente 5 Ma.

En la Figura 5.2 se muestra un posible modelo de emplazamiento de las rocas antes mencionadas. Los afloramientos de estas rocas en el área de estudio no muestran ninguna distribución regular como los localizados en la región de Apan, Hidalgo, donde la mayoría de los afloramientos presentan una distribución NE-SW asociados con fallas normales de la misma dirección. Lo que sí se puede establecer es que estos depósitos piroclásticos y rocas dacítico-riolíticas son relativamente mas antiguas ya que se encuentran erosionadas,

cortadas por algunas fallas NW-SE o bien sepultadas parcialmente por eventos volcánicos recientes. Es necesario efectuar más trabajos geológicos en esta porción de la Faja Volcánica Trans-Mexicana para tratar de identificar las posibles estructuras volcánicas de las cuales fueron expulsados muchos de los depósitos piroclásticos riolíticos. No obstante, se puede asegurar que estos eventos volcánicos explosivos debieron ser producidos a partir de estructuras volcánicas de grandes dimensiones que se encuentran en la región (por ejemplo, la Caldera de Acoculco, la región de Chignahuapan).

En cuanto a los eventos de la Unidad Volcánica Superior se puede resumir lo siguiente: En el área de estudio se identificaron al menos 12 aparatos volcánicos monogenéticos, que consisten de pequeños volcanes tipo escudo, conos cineríticos o de escoria y coladas de lava de composición basáltica, traquiandesita-basáltica y andesita-basáltica. En la Figura 5.3 se presenta un dibujo esquemático de los fenómenos volcánicos que debieron ocurrir en la zona de estudio y que produjeron las estructuras volcánicas de esta segunda unidad.

Como se puede observar en el mapa geológico de la Figura 3.4, las estructuras volcánicas de la Unidad Superior presentan una distribución preferencial con dirección NE-SW, muy similar a las direcciones de emplazamiento de las rocas volcánicas de la región de Apan, las que según Ledezma-Guerrero (1987) y García-Palomo et al. (2002) se encuentran asociadas con el sistema de fallas Apan-Tlálloc. La distribución de los volcanes monogenéticos en el área de estudio sugiere la existencia de un sistema de fallas “oculto” en esta dirección, que facilitaron el ascenso del magma. Se denominó sistema de fallas “oculto” debido a que en superficie no se ven rasgos estructurales que permitan identificarlas plenamente; sino que la orientación que presentan los conos volcánicos permiten suponer su existencia en el subsuelo. Es importante remarcar que la actividad tectónica del sistema de fallas Apan-Tlálloc se ha mantenido por grandes períodos de tiempo, ya que García-Palomo et al. (2002) informan de la actividad ocurrida a lo largo de éste. Al parecer, este sistema de fallas sigue activo, ya que se han seguido registrando sismos en la zona de acuerdo a lo considerado por López-Hernández (2009).

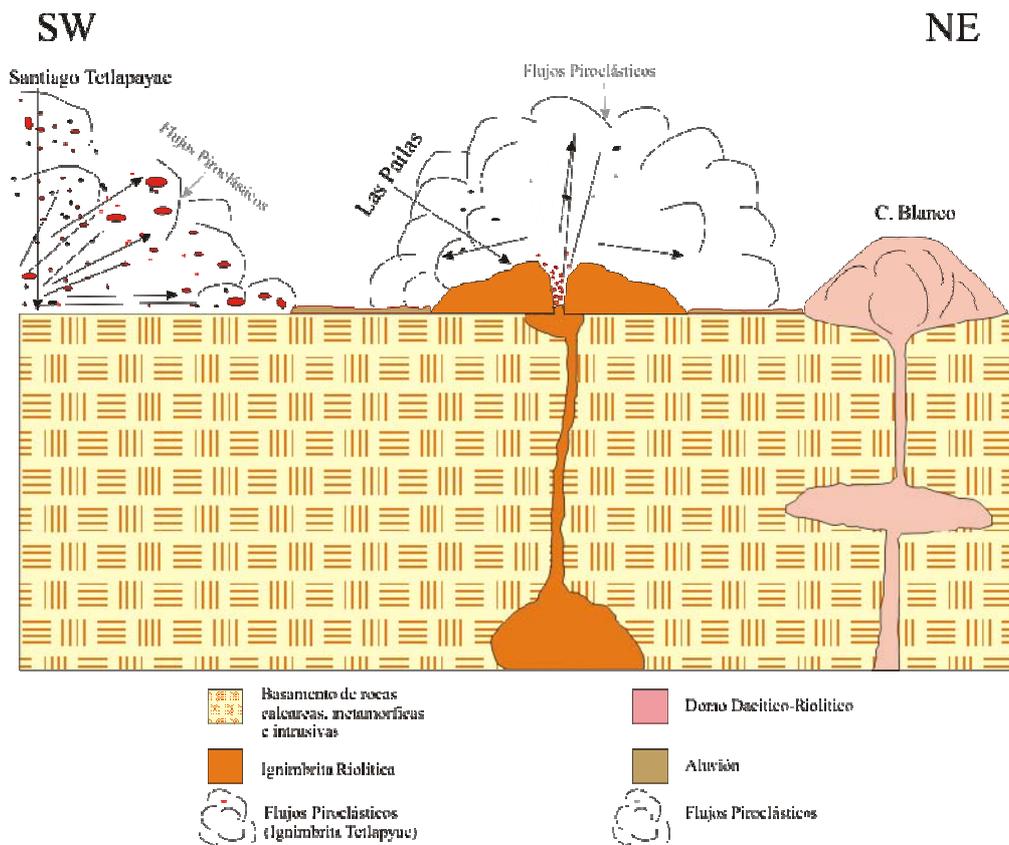


Figura 5.2. Modelo esquemático del emplazamiento del episodio magmático del Mioceno (~13.4 – 5.3 Ma) que produjo la Unidad Volcánica Inferior.

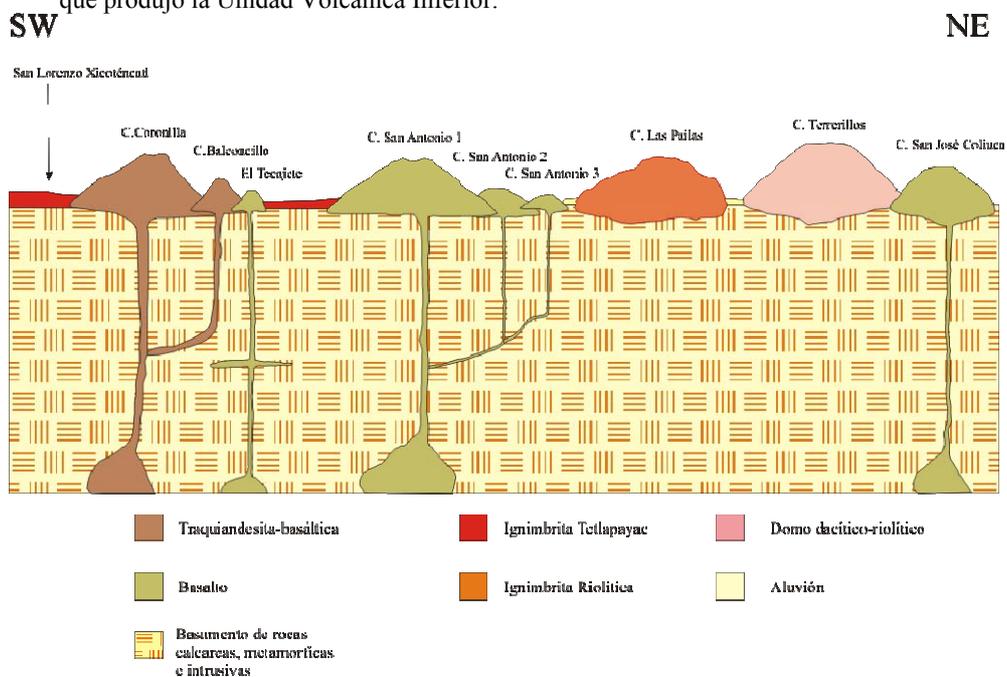


Figura 5.3 Modelo esquemático del episodio magmático del Plioceno-Pleistoceno (~2.1 – ~1.5 Ma) que produjo la Unidad Volcánica Superior.

En lo que concierne a las características petrográficas que presentan las rocas del área de estudio se pueden inferir algunos de los procesos magmáticos grabados en las texturas y mineralogía observada. Como ejemplos de estas características texturales se tiene estructura de tamiz, golfos de corrosión, bordes de reacción, zoneamiento y formación de pseudomorfos de anfíbol con minerales de óxidos de Fe y Ti. Los fenocristales de plagioclasa, cuarzo y ferromagnesianos, existentes en las rocas de la Unidad Inferior, presentan características como las señaladas anteriormente y que podrían indicar cambios físicos y químicos en las condiciones de cristalización de estos minerales. Dichos cambios pudieron ser producidos por procesos de cristalización fraccionada, por el ascenso en etapas del magma y/o por la existencia de cambios en la composición del magma debidos a procesos de mezcla de magmas o asimilación cortical. Estos cambios podrían ser identificados más claramente por medio de estudios detallados de microanálisis de minerales y matriz o mediante la propuesta de modelos petrogenéticos.

En lo que concierne a las rocas de la Unidad Volcánica Superior, estas presentan características mineralógicas y petrográficas más homogéneas que indican que fueron producidas por magmas básicos poco evolucionados. No obstante, se puede afirmar, que las características mineralógicas y petrográficas presentes en las rocas de ambas unidades son similares a las observadas en rocas volcánicas de áreas vecinas dentro de la FVTM.

Por otra parte, los patrones de comportamiento de los elementos mayores y traza de las rocas analizadas son parecidos a los que se presentan en la mayoría de lavas de la FVTM (Gómez-tuena et al., 2005 y referencias citadas). Así, todas las muestras analizadas del área de estudio caen dentro del campo de las series calcoalcalina, aunque las rocas de la Unidad Volcánica Superior caen en los límites de las series calcoalcalinas y calcoalcalinas ricas en  $K_2O$ , según el diagrama de Peccerillo y Taylor (1978). Análisis químicos efectuados por García-Palomo et al. (2002) y por Núñez-Castillo (2010), en rocas de localidades vecinas de la zona de estudio, muestran comportamientos similares a los ya descritos. Núñez-Castillo (2010) efectuó una caracterización geológica y geoquímica de rocas volcánicas pertenecientes a la falla Apan-Tlálóc y de igual manera sus rocas se caracterizan por tener comportamiento químico perteneciente a las series calcoalcalina.

Los diagramas tipo Harker muestran relaciones y variaciones de los datos que pueden ser explicadas por procesos de cristalización fraccionada de plagioclasa, óxidos de hierro y titanio, piroxenos y apatito, ocurridos en los magmas a altas temperaturas y que empobrecieron al fundido residual. Aun en lavas poco evolucionadas como las del cerro Coronillas, que tienen una composición de traquiandesita-basáltica, se puede inferir un cierto proceso de cristalización fraccionada como lo indica la Figura 5.4. Aquí, las muestras TTC-01, TTC-12 y TTC-14, pertenecientes a diferentes frentes de lavas del cerro Coronillas, muestran una clara disminución en su contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . También, en los diagramas de la Figura 4.6 se puede inferir estos procesos de cristalización fraccionada tanto para las rocas de la Unidad Inferior como de la Superior.

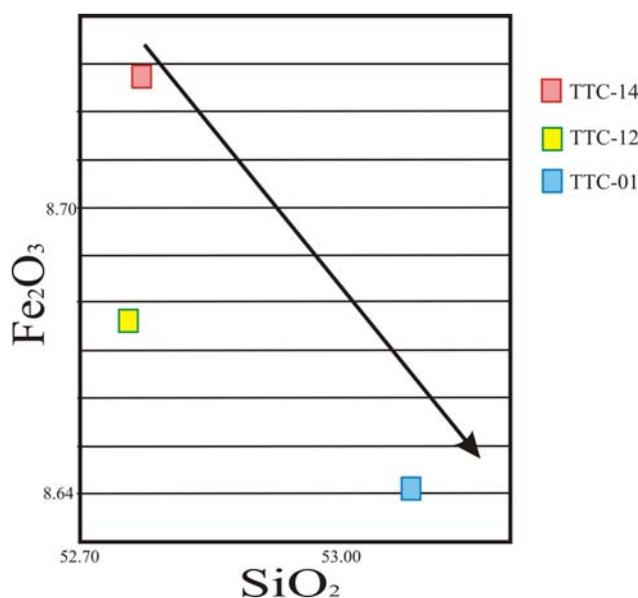


Figura 5.4. Ejemplo del comportamiento de la concentración del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , con respecto al  $\text{SiO}_2$  de diferentes frentes de lava del cerro Coronilla, donde se observa la disminución de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que tuvo a lo largo de su historia eruptiva y que pudo ser producida por procesos de cristalización fraccionada.

En cuanto a las variaciones de concentración de los elementos traza, se puede ver, de manera general, un clásico enriquecimiento de elementos tipo LILE, del Pb y Th con respecto a los elementos HFS (se observan anomalías negativas de Nb y Ta); lo cual indicaría que las rocas del CVST-SCT estarían asociadas a procesos magmáticos de subducción. Sin embargo, las rocas pertenecientes a las dos unidades no se pueden asociar con una sola fuente magmática. Esto se puede demostrar en los diagramas multi-

elementales presentados en las figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, donde el comportamiento y las concentraciones totales de elementos traza, observados para las rocas de las diferentes unidades, no se pueden explicar como producidas a partir de una misma fuente magmática.

Si se observan los patrones de elementos traza, para las rocas de la Unidad Volcánica Superior (en particular los diagramas de Tierras Raras), se pueden considerar que tienen un comportamiento muy homogéneo. Esto indicaría que los magmas provienen probablemente de una fuente magmática común o similar. Dicha fuente magmática podría ubicarse en un manto enriquecido, ya que las rocas máficas no presentan las típicas anomalías negativas de Nb y Ta en los diagramas multielementales (Figuras 4.7 y 4.8). Sin embargo, estas rocas sí se tienen un ligero enriquecimiento en elementos solubles y móviles como el Pb y Ba. Por otra parte, los patrones de elementos traza para las rocas de la Unidad Volcánica Inferior son un poco más variables y presentan fuertes anomalías negativas de los elementos HFSE con respecto a los LILE, lo que indicaría una fuente magmática ubicada en un manto empobrecido asociada a un sistema de subducción. Estas evidencias en el comportamiento de los elementos traza permiten confirmar que las fuentes magmáticas que produjeron las rocas de las dos unidades son ligeramente distintas.

Las relaciones isotópicas iniciales para las rocas del CVST-SCT son ligeramente más radiogénicas y variables que las obtenidas para estructuras volcánicas mayores pertenecientes a la FVTM, como el Nevado de Toluca, el complejo volcánico Telapón o el Popocatepetl (ver Figura 4.10). Al analizar los datos isotópicos obtenidos para las rocas del área de estudio se puede observar una marcada variación entre las distintas unidades. De esta manera se puede confirmar que las rocas de la Unidad Volcánica Superior fueron generadas a partir de una fuente distinta a las rocas de la Unidad Volcánica Inferior. Así se puede ver que las dos muestras de riolitas y dacitas fueron producidas por una fuente relativamente poco radiogénica y mucho más cercana a las que presentarían los basaltos de cordilleras Meso-oceánicas (MORB) y con una escasa interacción con rocas de la corteza continental. Este comportamiento es relativamente poco común para rocas tan silíceas, ya que normalmente, por ser rocas muy evolucionadas, deberían presentar valores isotópicos más radiogénicos indicando un cierto grado de interacción con rocas de la corteza

continental. Este es el comportamiento más común observado en las dacitas y riolitas presentes en el volcán Telapón, Sierra Nevada (García-Tovar, 2009).

Por otra parte, las rocas máficas de la Unidad Volcánica Inferior presentan mayores variaciones en las relaciones isotópicas de Sr y un poco menores en Nd (Figura 4.10), indicando una fuente similar al arreglo del manto pero variablemente afectada por procesos de asimilación cortical. En el diagrama de la Figura 5.5 se graficó el contenido de SiO<sub>2</sub> contra las relaciones iniciales de <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de las 10 muestras analizadas. Es posible observar cierta correlación lineal entre las muestras de la Unidad Volcánica Superior con una tendencia positiva, con lo cual se puede corroborar que las muestras de esta unidad sufrieron una ligera asimilación cortical. Así, un magma basáltico parece haber asimilado a rocas de la corteza continental, más radiogénicas, lo que produjo las lavas de andesita-basáltica y traquiandesita-basáltica. Las rocas de la Unidad Volcánica Inferior muestran menores relaciones isotópicas <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, lo que indica una menor interacción de la corteza continental del magma que originó estas rocas y una fuente distinta a la que generó a las rocas máficas jóvenes.

Finalmente, con base en los resultados de los análisis geoquímicos e isotópicos, alcanzados en el presente trabajo, se pueden proponer las siguientes hipótesis:

El magma que originó las rocas de la Unidad Volcánica Superior se produjo probablemente en una fuente del manto ligeramente enriquecida (muy similar a la que produciría los basaltos intra-placa), pero adicionada con elementos derivados del proceso de subducción. Este magma ascendió relativamente rápido en la corteza continental, pero sufrió una moderada asimilación y un ligero proceso de cristalización fraccionada. Finalmente, la presencia de fallas normales NE-SW, existentes en el área de estudio, facilitaron el ascenso de los magmas máficos hasta la superficie.

En el caso de los magmas que generaron las rocas de la Unidad Volcánica Inferior, con edades de ≈12.6 Ma. (López-Hernández, 2009), se puede proponer la siguiente hipótesis para su origen:

Los magmas se generaron a partir de la fusión parcial de una corteza oceánica subducida (joven y menos densa lo que facilita su fusión). Dicha fusión parcial generaría directamente magmas andesítico-dacíticos, los cuales al ascender rápidamente y producirse fenómenos de cristalización fraccionada, con una escasa interacción con rocas de la corteza continental producirían las riolitas y dacitas encontradas en el área de estudio.

Una evidencia de esta hipótesis se puede ver en la Figura 4.10, donde los valores isotópicos de Sr y Nd para estas rocas están muy cercanos a los valores de rocas tipo MORB, que son los componentes de la placa en subducción. Mori (2007) reporta rocas volcánicas, ubicadas al norte de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Sucesión Volcánica de Queretaro), muy cerca del área de estudio, cuyas edades y composiciones petrográficas, geoquímicas e isotópicas son similares a las rocas de la Unidad Volcánica Inferior descrita en esta tesis.

Este autor propone que los magmas que generaron esas rocas se produjeron a partir de la fusión parcial de la placa oceánica en subducción. Este tipo de rocas se les ha denominado como adakitas, por lo que se puede proponer que las rocas riolíticas-dacíticas del área de estudio se produjeron por procesos similares. Es necesario realizar más estudios geológicos, geoquímicos e isotópicos de rocas antiguas de áreas cercanas para confirmar estas hipótesis.

En la Figura 5.6 se presenta una clasificación con fines de origen tectónico, basado en concentraciones de elementos traza de Th, Ta e Yb. Aquí se puede confirmar que las rocas de la Unidad Inferior presentan afinidad con un ambiente de basaltos tipo MORB, mientras que las rocas de la Unidad Superior presentan características afines con ambientes de intraplaca.

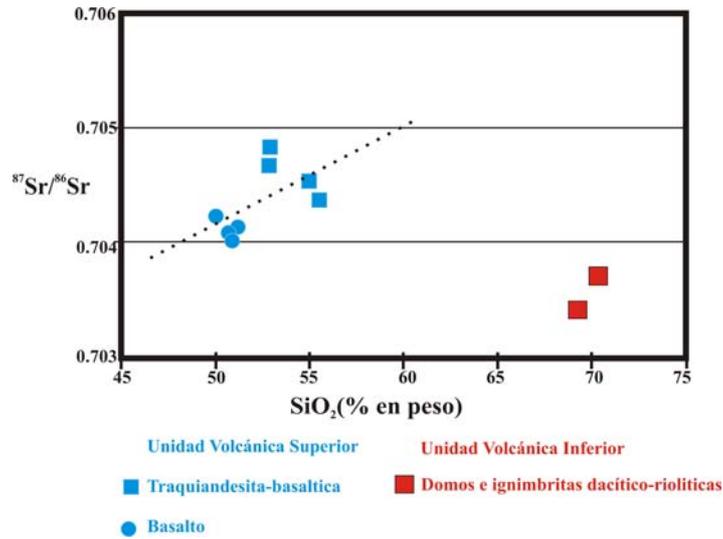


Figura 5.5. Diagrama de SiO<sub>2</sub> vs. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, donde se observa una tendencia positiva en las rocas basálticas y traquiandesita-basáltica, lo cual sugiere que existió una asimilación cortical de los magmas basálticos que originaron cambios en la composición isotópica. Las rocas de la Unidad Volcánica Inferior se apartan fuertemente de las rocas de la unidad inferior indicando una fuente magmática distinta.

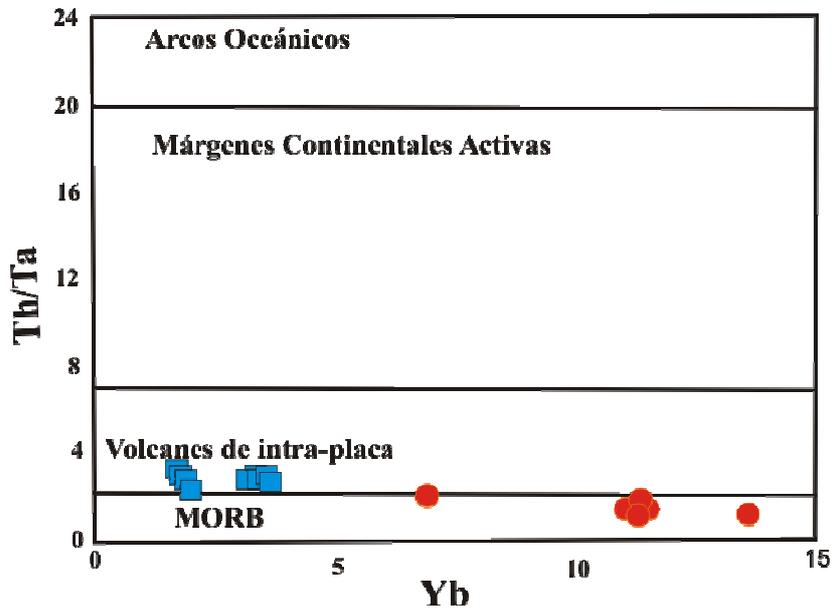


Figura 5.6. Diagramas de variación Th/Ta vs. Yb (modificado de Gorton y Schandl, 2000). Se observa que las rocas de las Unidad Volcánica Superior (en azul) caen en el campo de los magmas de intraplaca, mientras que la Unidad Volcánica Inferior (en rojos) se relacionan con magmas similares al MORB (Modificado de Gorton y Schandl, 2000).

## 5.2 Conclusiones

- Se realizó un mapa geológico del CVST-SCT que cubre un área aproximada de 180 km<sup>2</sup>. En dicho mapa se manifiestan composiciones contrastantes en las rocas (basaltos a riolitas). Estas rocas se encuentran distribuidas en conos de escoria, volcanes de escudo, coladas de lava, domos de composición ácida y depósitos de flujos piroclásticos.
- Las unidades cartografiadas fueron agrupadas, con base en su disposición estratigráfica en campo, con datos geocronológicos publicados por diferentes autores y de acuerdo al grado de alteración por intemperismo, en dos unidades. Unidad Volcánica Inferior compuesta por: la Ignimbrita Tetlapayac, Ignimbrita Las Pailas, Domos e ignimbritas Dacítico-Riolítica, Riolita Tellez-Peña-Los Órganos e ignimbrita no diferenciada. Unidad Volcánica Superior compuesta por: basaltos, andesitas-basálticas y traquiandesitas-basálticas.
- La petrografía indica que el magma que originó las rocas de las dos unidades sufrió cambios físicos y químicos durante su ascenso y emplazamiento, lo que se ve reflejado en las texturas de tamiz, golfos de corrosión, bordes de reacción y zoneamiento que presentan una gran parte de los fenocristales de plagioclasa y en algunos de ferromagnesianos y óxidos de Fe y Ti.
- Las relaciones observadas en los elementos mayores de las rocas volcánicas del área indican proceso de cristalización fraccionada de plagioclasa, óxidos de fierro-titanio, piroxeno y apatito ocurridos en magmas de alta temperatura y que empobrecieron al fundido residual. Además, las rocas de la Unidad Volcánica Inferior se ubican en los límites de las series calcoalcalina y calcoalcalina rica en K, mientras que las rocas de la Unidad Volcánica Superior se clasifican dentro de las series calcoalcalina con K medio. Estas series magmáticas se han asociado comúnmente con ambientes tectónicos de subducción.

- Los patrones de elementos traza que presentan las rocas de las dos unidades (enriquecimiento de elementos LILE con respecto a HFS y enriquecimiento de las tierras raras con respecto a las pesadas), permiten asociar sus fuentes magmáticas con ambientes de subducción, lo cual aporta más evidencias sobre el origen de la FVTM en su conjunto. Sin embargo, las fuentes magmáticas que produjeron a las dos unidades volcánicas fueron distintas.
- Las relaciones isotópicas de Sr y Nd obtenidas para las rocas de la Unidad Volcánica Inferior indican una fuente magmática muy próxima a los basaltos de tipo MORB, con una baja interacción con rocas de la corteza continental. En cuanto a las rocas máficas de la Unidad Volcánica Superior; presentan una fuente magmática afín al arreglo del manto, pero con una interacción más importante con rocas corticales más radiogénicas.
- Finalmente, a través de este estudio se cuenta con información básica, sobre esta porción de la FVTM (Estado de Hidalgo), que puede ser utilizada con diferentes enfoques económicos o de ingeniería, por ejemplo: en la exploración de sistemas geotérmicos recientes o antiguos (posibles yacimientos minerales), en el desarrollo de proyectos geotécnicos al proponer una caracterización litológica regional para el desarrollo de infraestructura carretera o civil en general y para identificar posibles fuentes de materiales de construcción. Así mismo, la información puede ser aplicada en la caracterización de acuíferos, determinando las posibles fuentes de recarga y los materiales que forman los reservorios. Los datos geológicos, geoquímicos e isotópicos obtenidos en la presente tesis podrían ser incluidos en la base de datos del Servicio Geológico Mexicano para la caracterización geológica del país.

## **Recomendaciones**

- Como se vio, el área de estudio presenta rasgos muy importantes e interesantes, por lo que se recomienda realizar fechamientos de rocas de las unidades volcánicas Inferior y Superior, con el fin de establecer una columna estratigráfica detallada y completa. Los métodos de fechamiento que se podrían utilizar serían K-Ar,  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  y posiblemente U-Pb en zircones.
- Efectuar más estudios geológico-vulcanológicos en áreas aledañas o vecinas con el fin de determinar con más certeza las fuentes de emisión de las ignimbritas encontradas en el campo Volcánico Santiago-Tetlapayac-Santa Cruz-El Tepozán.
- También será necesario determinar las variaciones geoquímicas de los minerales por medio de microsonda electrónica, y así inferir la temperatura, presión y composición de los magmas que formaron las rocas emplazadas en el CVST-SCT.
- Un estudio vulcanológico mas detallado para determinar con más certeza las fuentes de emisión de las ignimbritas encontradas.
- Se recomienda realizar más análisis geoquímicos e isotópicos de Sr y Nd de rocas con características similares, de áreas vecinas, para confirmar las hipótesis propuestas en el presente trabajo.