

## Índice

### Resumen

### Agradecimientos

### Lista de figuras y tablas

	Pág.
<b>Capítulo I. Introducción</b>	
1.1 Generalidades	1
1.2 Localización y vías de acceso al área de estudio	2
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo	5
1.4.1 Objetivos específicos del trabajo	6
1.5 Metodología	6
1.5.1 Trabajo de gabinete	6
1.5.2 Trabajo de campo	7
1.5.3 Trabajo de laboratorio	7
<b>Capítulo II. Descripción de Técnicas Analíticas</b>	
2.1 Obtención de muestras de afloramiento	9
2.2 Elaboración de laminas delgadas	10
2.3 Trituración y pulverización de muestras	10
-Cuarteo y homogenización de las muestras pulverizadas	
2.4 Determinación de concentraciones de elementos mayores y algunos traza por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX)	13
- Preparación de muestra para su análisis por Fluorescencia de Rayos X	
2.5 Determinación de concentración de los elementos de tierras raras por medio de ICP-MS	16
2.6 Determinación de relaciones isotópicas de Sr y Nd por medio de espectrometría de masas.	18
- La espectrometría de masas	
<b>Capítulo III. Geología</b>	
3.1 Contexto Geológico Regional	24

-Faja Volcánica Trans-Mexicana	24
3.2 Marco Geológico del área de estudio	30
3.2.1 Basamento	30
3.2.2 Inicios de la actividad magmática de la zona de estudio	31
-Andesita Apan (Mioceno Medio)	31
-Dacita El Rosario	31
-Ignimbrita Tetlapayac	32
-Secuencia Volcánica Acoculco	32
+Unidad Pre-Caldera	32
+Unidad Sin-Caldera	33
+Actividad postcaldérica	33
-Campo Volcánico Tezontepec-Chignahuapan	33
3.3 Resultados: Descripción geológica del Campo Volcánico	
Santiago Tetlapayac-Santa Cruz-El Tepozán	36
3.3.1 Unidad Volcánica Inferior ( $\approx 13.4 - 12.6$ Ma)	36
-Ignimbrita Tetlapayac	37
-Ignimbrita Las Pailas	39
-Domos e ignimbritas dacítico-riolíticas	42
+Cerro Blanco-Terrerillos	42
+Cerro La Defensa	42
-Riolita Tellez-Peña Los Órganos	44
-Ignimbrita No-Diferenciada	45
3.3.2 Unidad Volcánica Superior ( $\approx 2.5 - 1.5$ Ma)	46
- Conjunto de conos volcánicos Coronilla – Tecajete (traquandesita basáltica – basalto)	46
+Cono Cantera 1	47
+Cerros Balconcillo y Tecajete	48
+Cerro Coronilla	49
-Conjunto de conos El Muerto y La Puerta	50
-Grupo de conos San Antonio-El Resorte	51

-Cono San José Coliuca	55
-Volcán escudo El Coyote	57
<b>Capítulo IV. Resultados: Petrografía, Geoquímica e Isotopía de Sr y Nd</b>	
4.1 Petrografía y Análisis modal	59
4.1.1 Unidad Volcánica Inferior	
-Ignimbrita Tetlapayac	59
-Ignimbrita Las Pailas	60
-Domos e ignimbritas dacítico-riolíticas	62
4.1.2 Unidad Volcánica Superior	
-Basaltos y andesitas-basálticas	64
-Traquiandesitas-basálticas	67
4.2 Geoquímica de elementos mayores y traza	
4.2.1 Elementos mayores	72
-Diagramas de TAS	72
-Diagramas SiO <sub>2</sub> vs. K <sub>2</sub> O y triangular AFM	73
-Calculo de la norma CIPW	77
-Diagramas de Harker	78
4.2.2 Elementos Traza	82
-Diagramas de multielementos en rocas ígneas	83
-Resultados de elementos traza	84
-Tierras Raras	88
-Resultado de REE para las unidades volcánicas del área de estudio	89
4.3 Isotopía de Sr y Nd	93
- CHUR y εNd	95
-Resultados isotópicos del CVST-SCT	97
<b>Capítulo V. Discusión y Conclusiones</b>	
5.1 Discusión	102
5.2 Conclusiones	112
-Recomendaciones	114
<b>Referencias Bibliográficas</b>	115

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. a) Ubicación de la zona de estudio dentro de las porciones centro-oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (modificado de Gómez-Tuena et al., 2005). b) Modelo digital de elevación en el que se presenta la ubicación del área de estudio y estructuras que la rodean, como el sistema de fallas NE-SW Apan-Tlálloc y la Caldera de Acozulco en la FVTM.
- Figura 1.2. Localización del área de estudio, mostrando las principales vías de acceso y sus poblaciones. Se indican también los números de cartas topográficas del INEGI que cubren el área. Las principales vías de acceso al área de estudio se representan en rojo, con el número de las carreteras.
- Figura 2.1. Mortero de anillos marca Rockwell.
- Figura 2.2. Cuarteo de muestras: (a) material utilizado: báscula, hojas blancas, espátulas, frascos limpios y bolsas de papel encerado; (b) cuarteo de la muestra con la espátula; (c) vaciado y pesado de la muestra.
- Figura 2.3. Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X SIEMENS SRS 3000 del LUGIS del Instituto de Geología de la UNAM.
- Figura 2.4. Preparación de perlas para el análisis de elementos mayores: (a) Horno donde se calcina la muestra; (b) Pesado de la muestra con la mezcla fundente; (c) vaciado de la muestra en el crisol de Pt/Au y (d) Perlas terminadas y etiquetadas.
- Figura 2.5. Procedimiento de la preparación de tabletas para el análisis de elementos traza en FRX: (a) Equipo utilizado para prensar la muestra. (b) cilindro y pistones utilizados para el prensado de la muestra, (c) muestra prensada.
- Figura 2.6. Fotografías del trabajo en el LUGIS para la digestión de rocas y separación de los elementos químicos (Sr y Nd) en la sala de química ultra pura: (a) Digestión de las muestras en las parrillas de calentamiento. (b) Soluciones recuperadas con los respectivos elementos, las cuales se secan bajo la luz infrarroja. (c) Columnas de intercambio iónico para la separación de Sr. (d) Secado de las muestras bajo luz infrarroja, para posteriormente ser cargadas en el espectrómetro de masas.
- Figura 2.7. (a) Diagrama esquemático de las partes y funcionamiento del espectrómetro de masas. (b) Espectrómetro de masa Finnigan MAT-262 utilizado para la determinación de las relaciones isotópicas en el LUGIS. (c) Procedimiento de carga de una muestra de Nd en un filamento de renio del espectrómetro de masas.
- Figura 3.1. Ubicación y división de la FVTM en tres sectores. La subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera por debajo de la placa de Norte América, sugieren su relación con la FVTM (Gómez-Tuena et al., 2005). En el recuadro se señala la ubicación de la zona de estudio (mapa modificado de Gómez-Tuena et al., 2005)
- Figura 3.2. Mapa de la FVTM (modificado de Gómez-Tuena et al., 2005). Principales volcanes: Ceboruco (Ce), Colima (Co), Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), Complejo Volcánico Valle de Bravo-Zitácuaro (CV-VB-Z), Nevado de Toluca (NT), Campo Volcánico Chichinautzin (CVC), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón, Tlálloc (P,I,T,T), Malinche (M), Pico de Orizaba (PO), Campo Volcánico Palma Sola (PS), Complejo Volcánico Palo Huérfano-La Joya-

Zamorano (PH-LJ-Z). Las curvas indican igual profundidad de la placa en subducción (tomado de Pardo y Suárez, 1995). En rojo: arco del Mioceno Medio – Tardío; verde: Episodio máfico del Mioceno Tardío; la línea de contorno azul muestra el límite del arco Pleistoceno - Cuaternario. También, se indican los posibles límites del basamento existente bajo la FVTM en colores (Sedlock et al., 1993). El CVST-SCT se muestra en el polígono negro-azul.

Figura 3.3. Mapa geológico de la región de Apan tomado de García-Palomo et al. (2002).

Figura 3.4. Mapa Geológico del Campo Volcánico Santiago Tetlapayac-Santa Cruz-El Tepozán.

Figura 3.5. Afloramiento de la Ignimbrita Tetlapayac al este de los conos monogenéticos San Antonio. Se observa el bandeamiento de un bloque de color gris claro. Los bloques sueltos de este depósito piroclástico pueden alcanzar hasta 2 metros de largo.

Figura 3.6. Detalles de los afloramientos de la Ignimbrita las Pailas presente en diferentes cerros: (a) Afloramiento en el cerro El Presidio donde se observa diaclasamiento sub-horizontal. (b) Existen otros afloramientos en el cerro Las Águilas donde los depósitos son masivos con diaclasamiento vertical, formando peñascos.

Figura 3.7. (a) Aspecto morfológico de los depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, formando peñascos, que coronan el paisaje. (b) Detalle del depósito masivo de bloques y ceniza compuesto por bloques de roca riolítica en una matriz fina muy consolidada. (c) Bloque de riolita con fenocristales de plagioclasa y cuarzo recristalizado.

Figura 3.8. Afloramiento en la ladera SE del Cerro Blanco en el que se presentan grandes bloques de lava de composición dacítica bandeada de textura porfídica.

Figura 3.9. Cerro La Defensa donde se presenta un domo de dacitas-riolitas en bloques. La parte superior del domo está fuertemente alterada, con algunos horizontes de suelo y minerales arcillosos.

Figura 3.10. Vista panorámica de la Peña los Órganos, la cual presenta una composición riolítica y diaclasamiento por enfriamiento vertical.

Figura 3.11. Panorámica de las mesetas formadas por la Ignimbrita No-diferenciada en el camino que va al poblado Profesor Graciano Sánchez.

Figura 3.12. Detalles del Cono Cantera 1, donde se observa la estratificación intercalada de materiales de tamaño grava a ceniza de color rojo, donde se pudo contabilizar cerca de 20 pulsos eruptivos. Las bombas volcánicas en esta estructura son escasas y se presentan fallas normales locales que desplazan ligeramente la estratificación.

Figura 3.13. Panorámica de NE a SW de los Cerros La Coronilla, Balconcillo y Tecajete. Observe el cráter abierto hacia el norte en la cima del cono La Coronilla.

Figura 3.14. Panorámica del Grupo de conos volcánicos San Antonio. El volcán más antiguo se localiza al norte (Cono San Antonio 3) y el más reciente hacia el Sur (Cono San Antonio 1).

Figura 3.15. Imagen tomada de Google-Earth donde se aprecia la distribución de los conos San Antonio y el flujo de lava asociado al cono 1. Las líneas blancas muestran la distribución de afloramientos de la Ignimbrita Tetlapayac que subyace a las lavas y depósitos de escoria.

Figura 3.16. Frente de lava basáltica masiva proveniente del Cono San Antonio 1 y que presenta diaclasamiento horizontal por enfriamiento.

Figura 3.17. Imagen del Google Earth en la cual se puede identificar el cono cinerítico San José Coliuca y las coladas de lavas asociadas. La distancia máxima que alcanzaron las lavas es de 2.82 km.

Figura 3.18. Panorámica del cono San José Coliuca del SW al NE. En el banco de material se observa escoria de color rojizo a negro y en el primer plano se ve parte del frente de lava que lo rodea.

Figura 3.19. Panorámica del Volcán Escudo El Coyote. En primer plano se presentan las lavas de la etapa efusiva, cubiertas por materiales piroclásticos y suelo reciente (tierras de cultivo), y en segundo plano el cono cinerítico que corona al cerro. Observe el cráter orientado hacia el SW y del cual surge una segunda colada de lava.

Figura 3.20. Imagen satelital (Google Earth), donde se representa con F1 al primer episodio eruptivo del volcán Coyote, se puede observar la forma radial de las lavas y con F2 la segunda colada más reciente del aparato.

Figura 4.1. 1) Fotomicrografía en LN de la Ignimbrita Tetlapayac (TTC-25), donde se observan esferulitas color pardo y un fenocristal de plagioclasa fracturado. Las fotografías en LP 2, 3 y 4 forman parte de la Ignimbrita Las Pailas; 2) micro-fenocristal de cuarzo con bordes engolfados, macro-fenocristales de plagioclasa con bordes de reacción, dentro de una matriz vítrea con un pequeño porcentaje de microlitos; 3) macro-fenocristal de biotita en LP donde se observa un plegamiento de esta mica debido a la mecánica de emplazamiento de la roca. Junto a ella se observan macro-fenocristales de plagioclasa maclados; 4) aglomerado de macro-fenocristales de plagioclasa. Fotografías 5 y 6 constituyen los Domos e Ignimbritas dacítico-riolíticas; 5) la lamina TTC-34 muestra dos fenocristales de hornblenda con una matriz porfídica-microcristalina; 6) macro-fenocristal de plagioclasa con borde de reacción y maclas, dentro de una matriz vítrea. \* LN=Luz Natural; LP=Luz Polarizada.

Figura 4.2. Fotomicrografías 7 y 8 corresponden a los Domos e Ignimbritas dacítico-riolíticas; 7) fenocristales de plagioclasa en LP, con textura de tamiz y maclado, en una matriz hialopíltica; 8) macro-fenocristal de cuarzo con bordes engolfados. Fotomicrografías 9 y 10 correspondiente a los basaltos; 9) Textura porfídica-afanítica con un fenocristal de olivino y un fenocristal de clinopiroxeno; 10) aglomerado de fenocristales de piroxeno en una matriz microlítica; 11) Traquiandesítica-basáltica, fotografía tomada en LP, se observa una matriz microlítica de plagioclasa y ferromagnesianos con fenocristales de olivino y clinopiroxeno; 12) enclave encontrado en el Cerro Blanco, matriz microlítica con fenocristales de piroxeno tomada en LP. \* LP= Luz Polarizada.

Figura 4.3. Diagrama de TAS (Le Bas et al., 1986) utilizado en la clasificación de las rocas volcánicas del CVST-SCT. La curva roja separa los campos de las series alcalina de la subalcalina (Irvine y Baragar, 1971).

Figura 4.4. División de las rocas subalcalinas, utilizando el diagrama K<sub>2</sub>O vs sílice de Peccerillo y Taylor (1976). La simbología es la misma que la utilizada en la Figura 4.3.

Figura 4.5. Diagrama AFM: A= álcalis (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O): F= (FeO total) y MgO (% en peso) de Irvine y Baragar (1971) en el que se observa que todas las muestras siguen un comportamiento Calcoalcalino. La simbología es la misma que la utilizada en la Figura 4.3.

Figura 4.6. Diagramas de Harker que muestran las variaciones de los contenidos de elementos mayores con respecto a sílice (% en peso) del CVST-SCT (la simbología es la misma que la Figura 4.3.).

Figura 4.7. Patrones de elementos traza para los domos e ignimbritas de composición dacita-riolita y la Ignimbrita Las Pailas normalizados con respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), note las anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti, y positivas de Rb, Ba, K y Pb.

Figura 4.8. Patrones de elementos traza para las rocas basálticas, andesita-basálticas y traquiandesita-basálticas normalizados con respecto al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). Puede observarse que los basaltos no presentan anomalías negativas de Nb y Ta con respecto a los elementos LILE.

Figura 4.9. Patrones de elementos de Tierras Raras para la Unidad Volcánica Inferior del CVST-SCT. Concentraciones normalizadas con respecto a valores de condrita de Nakamura (1974).

Figura 4.10. Patrones de elementos de Tierras Raras para la Unidad Volcánica Superior del CVST-SCT. Concentraciones normalizadas con respecto a valores de condrita de Nakamura (1974).

Figura 4.11. a) Diagramas de evolución de las relaciones isotópicas de Sr y b) diagrama de evolución del Nd con respecto al tiempo geológico (Faure, 1986).

Figura 4.12. Diagrama de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs  $\epsilon\text{Nd}$  iniciales de rocas de la corteza y el manto para las muestras del CVST-SCT, en el que se observa una afinidad general en todas las muestras con el arreglo del manto. Se puede ver que las rocas de la unidad Volcánica Superior (basaltos – andesitas basálticas) son los más radiogénicos indicando una mayor influencia cortical, en comparación con las rocas félsicas de la Unidad Superior. Las muestras del CVST-SCT se comparan con datos del Nevado de Toluca (Martínez-Serrano, 2004), Popocatepetl (Shaaf et. al, 2005) y del Complejo Volcánico Telapón (García-Tovar, 2009).

Figura 5.1. Esquema del vulcanismo Pachuca-Apan-El Peñon (Tomado de 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.

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.

Figura 5.5. Diagrama de  $\text{SiO}_2$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 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).

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 2.1. Procedimiento para la separación de Sr y Tierras Raras (REE).

Tabla 2.2. Procedimiento de separación de Nd en columnas de Intercambio Iónico.

Tabla 4.1. Abundancia modal de la mineralogía de las rocas del CVST-SCT. Los porcentajes fueron determinados con base en un conteo de entre 800 y 900 puntos por lámina delgada.

Tabla 4.2. Concentraciones de elementos mayores (% en peso) para las rocas del CVST-SCT, agrupadas por sub-unidad.

Tabla 4.3 Resultados del cálculo de la norma CIPW para las rocas del Campo Volcánico Santiago Tetlapayac-Santa Cruz-El Tepozán.

Tabla 4.4. Concentración en ppm (partes por millón) de elementos traza de las rocas del área de estudio.

Tabla 4.5. Concentraciones (ppm) de Tierras Raras (REE) de las rocas volcánicas del el área de estudio.

Tabla 4.6. Relaciones isotópicas de Sr y Nd de las rocas volcánicas del CVST-SCT. Datos medidos en el espectrómetro de masas Finnigan MAT-262.

Tabla 4.7. Relaciones isotópicas iniciales de Sr y Nd de las rocas del Campo Volcánico Santiago-Tetlapayac-San Cruz-El Tepozán.