



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTRATIGRAFÍA Y PETROLOGÍA DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS
DEL FLANCO OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE HUAUTLA,
REGIÓN DE VALLE DE VÁZQUEZ–TEOCALTZINGO,
ESTADOS DE MORELOS Y GUERRERO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA

OCTAVIO CHÁVEZ GONZÁLEZ



DIRECTOR: DR. DANTE JAIME MORÁN ZENTENO

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE DE 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Geología, instituciones fundamentales en mi desarrollo profesional y personal.

A mis profesores

Al Dr. Dante Jaime Morán Zenteno por el tiempo y el esfuerzo invertidos en mi formación académica y en el desarrollo de este trabajo, por todos sus consejos y su apoyo.

Al M. en C. Enrique Alejandro González Torres por sus enseñanzas en el aula y por su apoyo durante mi estancia en el Instituto de Geología.

Al Ing. Alfredo Victoria Morales por la cátedra recibida, por su camaradería y por su ayuda en la Facultad de Ingeniería.

Al Ing. Emiliano Campos Madrigal por su contribución a mi formación de Ingeniero y por los momentos gratos en la facultad.

Al M. en C. Gilberto Silva Romo por las valiosas lecciones impartidas en campo y por sus observaciones para el mejoramiento de este trabajo.

A mis amigos y compañeros

Al Ing. Moisés Mejía Jiménez por su amistad y su valiosa contribución en campo al desarrollo de este trabajo, por sus consejos y por los momentos gratos dentro y fuera de la facultad.

Al Quím. Rufino Lozano Santa Cruz, a la Quím. Patricia Girón García y al Sr. Santiago Alavés Puntos por los análisis químicos realizados en el LUGIS del Instituto de Geología de la UNAM.

A la M. en C. Leticia A. Alba Aldave y a la M. en C. Bárbara Martiny Kramer por su ayuda durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIAS

A mis padres, Mauricio Chávez Rojas y Yolanda Martha González Ávalos, por brindarme su apoyo en todo momento y prepararme para enfrentar la vida, sus ejemplos y sus enseñanzas siempre guiarán mis pasos. ¡Los llevo en mi corazón!. ¡Mil gracias por todo!

A mis abuelos, Elisa Ávalos Reséndiz y Gustavo Pedro González Ballesteros†, por ser parte fundamental de mi vida, siempre tendré presentes sus consejos y sus lecciones. ¡Muchas gracias por todo su apoyo!.

A mi novia, Judith Varillas Velázquez, por enriquecer mi vida entrando a ella en el momento exacto, por ser mi inspiración y por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo. A ti, Mi Amor Eterno, te dedico este logro, uno de los primeros de nuestra vida como pareja. ¡Gracias por todo Preciosa!.

A todos mis familiares, porque nunca terminaré de agradecerles por sus consejos, su apoyo, su cariño, su ejemplo y su orientación, por contribuir a mi desarrollo personal.

CONTENIDO

	Página
<i>Lista de figuras</i>	<i>i</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>ii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iii</i>
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
I. 1. Antecedentes	1
I. 2. Planteamiento del problema	3
I. 3. Objetivos	5
I. 4. Metas	6
I. 5. Enfoque	7
I. 6. Metodología	7
I. 7. Generalidades	8
CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	11
II. 1. Provincias geológicas	12
II. 1. 1. Plataforma Guerrero-Morelos	13
II. 1. 2. Provincia magmática cenozoica de la Sierra Madre del Sur	13
II. 1. 2. 1. Rocas volcánicas de la porción norte-central de la SMS	14
II. 1. 3. Faja Volcánica Transmexicana	15
II. 2. Estratigrafía regional del Cretácico-Terciario	16
II. 3. Rasgos tectónicos regionales	17
II. 4. Migración del magmatismo	19
CAPÍTULO III. ESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA	21
III. 1. Basamento y unidades pre-cretácicas	21

	Página
III. 2. Unidades cretácicas	23
III. 2. 1. Formación Morelos	23
III. 2. 2. Formación Mezcala	25
III. 3. Unidades cenozoicas	28
III. 3. 1. Grupo Balsas	28
III. 3. 2. Intrusivo El Chautle	30
III. 3. 3. Ignimbrita Tilzapotla	32
III. 3. 4. Conglomerado Coaxitlán	35
III. 3. 5. Complejo Volcánico Huautla	36
III. 3. 6. Dacita Agua Fría	39
III. 3. 7. Formación Quilamula	42
III. 3. 8. Toba Chinameca	43
III. 3. 9. Andesita Chimalacatlán	47
III. 3. 10. Formación Cerro Frío	50
III. 3. 11. Depósitos de flujos de escombros	52
III. 4. Caracterización geoquímica	55
III. 4. 1. Análisis cuantitativos de elementos mayores	55
III. 4. 2. Análisis cuantitativos de elementos traza	56
 CAPÍTULO IV. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	 60
IV. 1. Pliegues en la secuencia cretácica	60
IV. 2. Fallas en las unidades cretácicas	61
IV. 3. Estructuras cenozoicas	62
 CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	 66
 BIBLIOGRAFÍA	 71
 <i>Anexo 1. Análisis cuantitativos de elementos mayores</i>	 <i>iv</i>

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localización del área de estudio y vías de acceso	9
Figura 2. (A) Mapa esquemático de la porción norte-central de la Sierra Madre del Sur mostrando la distribución de rocas volcánicas terciarias y la ubicación del área de estudio. (B) Distribución de las rocas ignimbríticas asociadas a la Caldera de Tilzapotla. Al poniente, noreste y oriente del área de estudio, el área de tesis de Monter-Ramírez (2004), Díaz-Bravo (2005) y Ramírez Pérez-Amaya (2005), respectivamente. Modificado de Morán-Zenteno et al. (2004). SMO: Sierra Madre Occidental, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana, SMS: Sierra Madre del Sur	12
Figura 3. Mapa geológico a semidetalle del área de estudio	22
Figura 4. Columna estratigráfica del área de Valle de Vázquez, Estado de Morelos	27
Figura 5. Columna estratigráfica del área de San Juan Teocaltzingo, Estado de Guerrero	31
Figura 6. Sección geológica del transecto A-A'	34
Figura 7. Sección geológica del transecto B-B'	41
Figura 8. Caracterización geoquímica de 13 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio	56
Figura 9. Diagramas de variación química elaborados a partir del análisis cuantitativo de elementos traza mediante la técnica de ICP MS de 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio. (a) Concentración normalizada de Tierras Raras respecto al MORB, de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995). (b) Concentración normalizada de diversos elementos traza con respecto al MORB, de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995)	59
Figura 10. Estereodiagrama de la falla normal 'Las Minas', área de San Juan Teocaltzingo-Chimalacatlán	64
Figura 11. Estereodiagrama de la falla lateral 'Los Hornos', área de Chimalacatlán-Valle de Vázquez	64
Figura 12. Estereodiagrama de las fallas laterales del sistema este-oeste, área de Quilamula-Valle de Vázquez	65

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Análisis cuantitativos de elementos mayores por Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizados en 13 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (las cifras indican el porcentaje en peso de cada compuesto)	55
Tabla 2. Análisis cuantitativos de elementos traza por ICP MS y Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizados en 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (cifras en partes por millón [<i>ppm</i>] de cada elemento)	57
Tabla 3. Análisis cuantitativos de Tierras Raras por ICP MS realizados en 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (cifras en partes por millón [<i>ppm</i>] de cada elemento, normalizadas respecto al MORB de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S., 1995)	58

RESUMEN

El presente trabajo está basado en el estudio de la estratigrafía, geología estructural y geoquímica de las unidades que conforman el registro estratigráfico expuesto en la porción occidental del Campo Volcánico de Huautla, región de Valle de Vázquez-San Juan Teocaltzingo, estados de Morelos y Guerrero. El estudio tuvo el propósito de ampliar la base de información geológica del área, interpretar la evolución sedimentaria y volcánica regional, analizar los episodios de deformación y desarrollo de las estructuras volcánicas y hacer inferencias sobre las relaciones que las rocas del área guardan con las grandes zonas volcánicas que se extienden por el norte de la Sierra Madre del Sur.

El registro estratigráfico expuesto en el área de estudio incluye al menos siete grandes unidades volcánicas cenozoicas que yacen sobre secuencias sedimentarias marinas y continentales deformadas del Cretácico y secuencias sedimentarias continentales de edad terciaria. Las unidades que coronan el registro litológico están representadas por depósitos de flujos de escombros del Pleistoceno-Holoceno y depósitos aluviales del Reciente.

La base de la secuencia volcánica cenozoica está constituida por diferentes miembros ignimbríticos que integran a la Toba Chinameca. El Complejo Volcánico Huautla es una unidad parcialmente contemporánea a la Toba Chinameca, está compuesto por rocas lávicas e hipabisales de composición andesítica-riolítica que subyacen a los derrames de lava de composición intermedia-silícica de la Dacita Agua Fría. Esta unidad se encuentra cubierta por los depósitos de flujos de escombros de la Formación Quilamula, y esta, a su vez, por lavas andesíticas de la Andesita Chimalacatlán. La Formación Cerro Frío, integrada por rocas lávicas de composición dacítica, es la unidad que corona la secuencia volcánica del Cenozoico expuesta en el área de estudio.

Las edades preliminares que se han obtenido de algunas de estas unidades (Oligoceno temprano), dentro y fuera del área de estudio, indican que el volcanismo en esta región fue relativamente más reciente que en áreas vecinas como Tilzapotla y Taxco, donde se han reportado edades del Eoceno tardío.

Las relaciones entre las abundancias de sílice y álcalis en las unidades volcánicas expuestas en el área de estudio las ubica dentro de la serie subalcalina, con composición intermedia-silícica. La presencia de anomalías de Nb y Ta sugiere que se trata de magmas de tipo de arco y la correlación de Tierras Raras con el SiO_2 indica que el enriquecimiento se dio principalmente por cristalización fraccionada.

Los rasgos estructurales que caracterizan a las unidades cenozoicas del área de estudio consisten de fallas laterales y normales que presentan dos tendencias principales, una con orientación preferencial este-oeste y otra orientada de norte a sur. El fallamiento lateral del área de estudio parece ser ulterior a las unidades volcánicas y no se tiene información sobre su edad, el fallamiento normal parece ser anterior al evento andesítico que dio origen a las rocas de la Andesita Chimalacatlán. Este patrón estructural no es típico de esta porción de la Sierra Madre del Sur si se le compara con áreas vecinas como Tilzapotla y Oaxaca, lo que indica cierta heterogeneidad en la dinámica de la deformación en esta región.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación del Instituto de Geología de la UNAM que se titula “*Investigaciones sobre la estratigrafía, la petrología y la evolución del Centro Volcánico de Huautla, estados de Morelos, Puebla y Guerrero*”, auspiciado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

Las actividades de investigación relacionadas con la presente tesis se enfocaron a los aspectos estratigráficos, petrológicos y a la deformación tectónica del registro geológico del Cretácico al Pleistoceno en la porción occidental de la Sierra de Huautla, dando énfasis al análisis de las rocas volcánicas terciarias que afloran extensamente en esta sierra.

El área de estudio se sitúa en la porción sur-central del Estado de Morelos, incluyendo el límite con el Estado de Guerrero (definido por el río Amacuzac) y una pequeña parte de dicho estado. La zona se centra en la parte occidental de la Sierra de Huautla, la cual se caracteriza por vastas exposiciones de rocas volcánicas y sedimentarias del Terciario que se encuentran cubriendo a secuencias marinas y continentales deformadas del Cretácico.

I. 1. Antecedentes

Las rocas sedimentarias cretácicas deformadas y las rocas volcánicas terciarias de la porción norte de la Sierra Madre del Sur (SMS) han sido descritas por numerosos autores en estudios tanto clásicos como modernos. Durante el siglo pasado, Fries (1960) realizó una descripción general de la estratigrafía de la SMS y la Plataforma Guerrero-Morelos (PGM) en algunas partes de los estados de México, Morelos y Guerrero. La descripción estratigráfica de Fries (1960) le permitió establecer los límites temporales de la secuencia de rocas magmáticas terciarias de la región, asignando una edad del Oligoceno temprano a la más antigua (Riolita Tilzapotla) e identificando que la mayor parte de ellas corresponden al Mioceno.

Los estudios de la geología regional realizados por Fries (1960) incluyen la cartografía de la mayor

parte de las unidades de la PGM. En 1966, Fries publica la Hoja Cuernavaca, clave 14Q-h(8), de escala 1:100,000. En estas obras, Fries introduce todos los nombres de formaciones y grupos que hasta la fecha están en uso. Años después, De Cserna y Fries (1981) cartografiaron la Hoja Taxco, clave 14Q-h(7), de escala 1:100,000, que cubre la mayor parte de la porción occidental del Estado de Morelos.

En un estudio más enfocado a las rocas magmáticas terciarias, Morán-Zenteno et al. (1998) realizaron estudios en la región de Taxco-Quetzalapa relativos al significado tectónico de las secuencias volcánicas terciarias, refiriéndolas espacialmente a tres áreas principales: Taxco, Buenavista-Quetzalapa y Huautla.

Dentro de los trabajos enfocados a las rocas mesozoicas de la PGM, destacan los llevados a cabo por Hernández-Romano et al. (1997) y Hernández-Romano (1999), quienes describen en detalle la estratigrafía de la parte oriental de la Plataforma Guerrero-Morelos para el intervalo Albiano-Maestrichtiano, estableciendo modelos diagenéticos y sedimentarios con los que explican los cambios de facies de estas rocas.

Dentro de los trabajos cartográficos, destacan como importantes antecedentes los elaborados por el Consejo de Recursos Minerales (2000), complementados con una evaluación geológico-minera en la región de Huautla, valorando los yacimientos minerales de la localidad y efectuando la descripción de las unidades que afloran en el área.

Entre la cartografía del Consejo de Recursos Minerales (CRM) se encuentra la Carta Cuernavaca (Rivera-Carranza et al., 1998), clave E14-5, de escala 1:250,000, que abarca por completo el área de estudio. Se trata de una carta litoestratigráfica que incluye los principales rasgos estructurales de la región, así como la localización de los yacimientos minerales conocidos.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) cuenta con cartografía topográfica y geológica más abundante. La Hoja Cuernavaca (1983, 1984, 2002), clave E14-5, de escala 1:250,000, es una carta cronoestratigráfica con indicación de litologías generales en la que se reconocen algunas estructuras geológicas regionales. Las cartas Jojutla de Juárez (1980) y Tilzapotla (1980), claves E14-A69 y E14-A79, respectivamente, ambas de escala 1:50,000, y que en conjunto

abarcan por completo el área de estudio, son cartas que incluyen las unidades litológicas y las estructuras principales.

En estudios más recientes de las rocas magmáticas terciarias, Morán-Zenteno et al. (2004) reportan una estructura caldérica del Terciario en el Campo Volcánico de Tilzapotla (CVT), ubicado a pocos kilómetros al occidente de la zona de tesis y al sur de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

En el Campo Volcánico de Huautla (CVH), Fries (1966) y Morán-Zenteno et al. (1998) reconocen una secuencia de flujos de lava y depósitos piroclásticos que sobreyacen a depósitos volcánicos similares a aquellos de la región Tilzapotla-Buenavista.

En el área de estudio se presentan rocas volcánicas que afloran de forma discontinua y que fueron identificadas en primera instancia por Morán-Zenteno et al. (1998) como pertenecientes a la facies de extra-caldera de la Caldera de Tilzapotla, asociándolas a los afloramientos distantes que se extienden al este y sur de la caldera, alcanzando distancias hasta de 36 km más allá de su margen.

I. 2. Planteamiento del problema

El área de estudio se encuentra dentro de una región caracterizada por grandes extensiones de rocas volcánicas del Terciario. En la parte norte-central de la Sierra Madre del Sur (SMS) destaca la presencia de un cinturón discontinuo de rocas volcánicas silíceas del Eoceno-Oligoceno que se extiende desde el oriente de Michoacán hasta el norte de Oaxaca. Esta franja guarda una posición intermedia entre la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), del Mioceno medio-Reciente (15 Ma al presente), y el Cinturón de Plutones Terciarios (CPT), del Eoceno-Oligoceno.

Dentro de la misma franja de rocas volcánicas silíceas de la SMS están incluidos otros campos volcánicos erosionados de gran extensión con ignimbritas (Nachititla, La Goleta, Sultepec, Taxco y Tilzapotla), los cuales están asociados a lineamientos tectónicos de dirección NW-SE, paralelos a la orientación general de la franja mencionada.

En un estudio de reconocimiento regional de la estratigrafía y la petrología de las rocas volcánicas del área comprendida entre Taxco y Huautla, Morán-Zenteno et al. (1998) identificaron tres diferentes

centros volcánicos (Taxco, Tilzapotla-Buenavista y Huautla) y advirtieron que estos centros presentan algunas diferencias reconocibles en su composición y variabilidad geoquímica, así como en su estratigrafía y estilos eruptivos.

Al sur de Valle de Vázquez, en dirección a Chimalacatlán, el grupo de investigación responsable de este proyecto elaboró, en reconocimientos previos, una columna estratigráfica representativa de depósitos volcánicos de la facies distal de extra-caldera de la Caldera de Tilzapotla, constituida por tres unidades de ignimbritas ligeramente soldadas con una intercalación de depósitos de caída.

Adicionalmente, durante sus reconocimientos previos, el grupo de investigación responsable de este proyecto realizó estudios estratigráficos de las porciones centro-occidental y sureste del Campo Volcánico de Huautla (CVH) y colectaron muestras para fechamientos isotópicos. Los resultados de dichos análisis se mencionan en este trabajo.

La secuencia volcánica de la Sierra de Huautla ha sido considerada en trabajos previos de otros autores como un centro volcánico principalmente andesítico (Fries, 1966, Rivera-Carranza et al., 1998). Sin embargo, como parte del planteamiento de este proyecto, se ha propuesto la hipótesis de que el CVH podría constituir una caldera volcánica de colapso que probablemente experimentó un periodo de resurgencia caracterizado por el emplazamiento voluminoso de lavas y cuerpos subvolcánicos que cubren y cortan una secuencia de ignimbritas muy extendida y que alcanza espesores reconocibles de algunos cientos de metros, con características petrológicas muy similares a las ignimbritas del colapso de la Caldera de Tilzapotla.

A la fecha no se ha podido definir si la secuencia volcánica expuesta en la región de Huautla es parte de un proceso continuo de evolución de una caldera y, si este es el caso, si se trata de un centro contemporáneo al de Tilzapotla y si está controlado de la misma manera por las fallas laterales regionales de orientación NW-SE que parecen haber controlado las estructuras de colapso de Tilzapotla (Morán-Zenteno et al., 2004).

El espesor de las ignimbritas de la Sierra de Huautla sugiere que dichas unidades se originaron a partir de una caldera; además, las características y la distribución de los depósitos piroclásticos y la presencia de derrames lávicos y rocas hipabisales sugieren posibles eventos de resurgencia, sin embargo, hasta la

fecha no ha sido identificada dicha estructura de colapso.

Las aparentes relaciones estratigráficas de la facies de extra-caldera de la Ignimbrita Tilzapotla con las unidades volcánicas que la sobreyacen en el sector occidental de la Sierra de Huautla (Valle de Vázquez-Teocaltzingo) sugieren la presencia de un centro volcánico más joven, localizado al oriente de la Caldera de Tilzapotla, tal como fue reconocido por Fries (1960). Sin embargo, a la fecha no existe información que permita definir el alcance geocronológico de las secuencias volcánicas del Centro Volcánico de Huautla (CVH).

Se conoce todavía poco de los detalles del marco geológico en el que evolucionó el CVH, además de que los datos sobre su geocronología y su geoquímica son todavía escasos. Por tanto, la interpretación sobre su evolución y su marco tectónico requiere de estudios estratigráficos, geoquímicos y estructurales más detallados en áreas claves que permitan ubicar este centro en el contexto de la evolución de la franja silícica de la porción norte de la SMS.

Por tratarse de un centro volcánico de gran extensión localizado en la franja norte de la Sierra Madre del Sur (SMS) y colindante con la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), el establecimiento de los procesos del desarrollo volcánico del CVH y su ubicación temporal resulta de gran importancia en la determinación de los procesos de evolución entre el volcanismo de la SMS y de la FVTM.

I. 3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la realización de estudios estratigráficos, petrológicos y geoquímicos generales que permitan definir la evolución geológica de la región, haciendo énfasis en los aspectos volcánicos y tectónicos, además de hacer inferencias sobre las relaciones que las rocas del área guardan con las grandes zonas volcánicas que se ubican en la franja norte de la Sierra Madre del Sur (SMS).

Definir el tipo de estructura o estructuras volcánicas que dieron origen a la secuencia terciaria de la Sierra de Huautla y su posible relación con los rasgos tectónicos mayores de la región.

Hacer una reconstrucción general de la evolución del Campo Volcánico de Huautla (CVH) y

determinar si la secuencia volcánica expuesta forma parte de una evolución continua o se encuentran sobrepuestos diferentes centros volcánicos.

Realizar inferencias sobre la petrogénesis de las principales unidades volcánicas, ubicar el modelo de evolución volcánico en el contexto tectónico y geocronológico de la región, y reconocer las implicaciones de la edad de la secuencia volcánica de esta área en los patrones de migración magmática y su posible relación con los eventos tectónicos mayores del sur de México.

Ampliar el cuadro de información estratigráfica y geocronológica que permita documentar de manera más precisa el tiempo de la extinción del volcanismo terciario en esta región, previa al desarrollo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

Finalmente, una mayor información sobre la cronología, petrología y estructuras asociadas al volcanismo terciario en esta región puede ser de alta relevancia en los estudios sobre la distribución y características de los yacimientos minerales hidrotermales que han sido documentados en esta zona, especialmente del Distrito Minero de Huautla.

I. 4. Metas

Con el propósito de cumplir con los objetivos de este trabajo, se plantearon las siguientes metas:

- i. Elaborar un mapa geológico del área de estudio a semidetalle.
- ii. Construir columnas estratigráficas locales, indicando las principales características de las rocas cretácicas-terciarias.
- iii. Elaborar secciones geológicas esquemáticas de las relaciones estratigráficas y estructurales de las unidades del Cretácico-Terciario.
- iv. Colectar datos estructurales sobre la geometría y cinemática de las estructuras tectónicas más notables, principalmente en la porción norte-occidental de la Sierra de Huautla.
- v. Formar un cuadro de datos geoquímicos que permitan hacer inferencias sobre el origen de las rocas volcánicas del área.

I. 5. Enfoque

La elaboración del presente trabajo de investigación obedece a la necesidad de ampliar los conocimientos relativos a la evolución de la más extensa zona volcánica expuesta en la parte norte-central de la Sierra Madre del Sur.

Se pretende que los estudios realizados sirvan como base a futuros trabajos de investigación más detallados, dada la necesidad actual de información de carácter local de una región tan estudiada a gran escala con poca información detallada.

I. 6. Metodología

Para la elaboración del presente trabajo se realizaron las siguientes actividades:

Se llevó a cabo una investigación bibliográfica que permitiera conocer los antecedentes del área de estudio y los trabajos realizados en ella, así como las relaciones estratigráficas y estructurales regionales, con el propósito de identificar los elementos y los procesos involucrados en el desarrollo de la historia geológica de la región.

Como base cartográfica se utilizaron las cartas topográficas y geológicas Jojutla de Juárez y Tilzapotla, claves E14-A69 y E14-A79, respectivamente, ambas de escala 1:50,000 y editadas por el INEGI. Además, se consultaron las dos versiones existentes de la Carta Cuernavaca, escala 1:100,000, publicada por Fries (1965) y aquellas de escala 1:250,000, editadas por el INEGI y por el CRM.

Se realizó la interpretación de las fotografías aéreas de la zona, con la intención de identificar las diversas unidades de roca presentes y establecer, preliminarmente, sus relaciones espaciales y temporales, señalando los rasgos estructurales observables a la escala de las fotografías aéreas (1:25,000).

El trabajo de campo se llevó a cabo en 6 visitas, que implicaron 18 días de labores en el área de estudio, durante los cuales se realizaron los levantamientos geológicos de las unidades de roca que se

identificaron previamente en las fotografías aéreas, realizando su análisis macroscópico y verificando las relaciones espaciales entre ellas, con la finalidad de elaborar el mapa geológico a semidetalle. Además, durante estas visitas se tomaron los datos de los rasgos estructurales más importantes y se colectaron muestras representativas de las diversas unidades de roca que permitieran realizar los análisis petrográficos y geoquímicos necesarios.

Durante el trabajo de campo se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con el propósito de ubicar y trazar con precisión los puntos de observación y los trayectos realizados, empleando coordenadas UTM y geográficas con base en el DATUM NAD 27.

A partir de las observaciones de campo, se elaboraron dos columnas estratigráficas que esquematizan la posición estratigráfica de las rocas que afloran en el área de estudio, y a partir del mapa geológico y de dichas columnas estratigráficas, se construyeron dos secciones geológicas representativas de las relaciones espacio-temporales de dichas unidades de roca.

El trabajo de gabinete consistió en procesar la información estratigráfica y estructural obtenida en campo e integrarla a las fotografías aéreas, con el propósito de confirmar o rechazar las hipótesis surgidas de la fotointerpretación. Además, en esta etapa se realizaron los análisis petrográficos y geoquímicos de las muestras colectadas, representativas de las diversas unidades de roca presentes en el área de tesis.

Los estudios petrográficos fueron realizados a 26 muestras de rocas volcánicas y subvolcánicas, mientras que los análisis geoquímicos se practicaron a 14 distintas rocas extrusivas.

Los análisis de Fluorescencia de Rayos X para elementos mayores y de ICP MS (espectrometría de plasma inductivamente acoplada) para elementos traza se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM.

I. 7. Generalidades

El área de estudio se ubica en la porción sur-central del Estado de Morelos, e incluye el límite de este

último con el Estado de Guerrero, definido por el río Amacuzac, abarcando una pequeña parte de dicho estado; además, se encuentra próxima al límite con el Estado de Puebla, situado al oriente. Las coordenadas geográficas 99°00' a 99°12' de longitud oeste y 18°21' a 18°33' de latitud norte la abarcan en su totalidad, siendo su extensión aproximada de 400 km² (Figura 1).

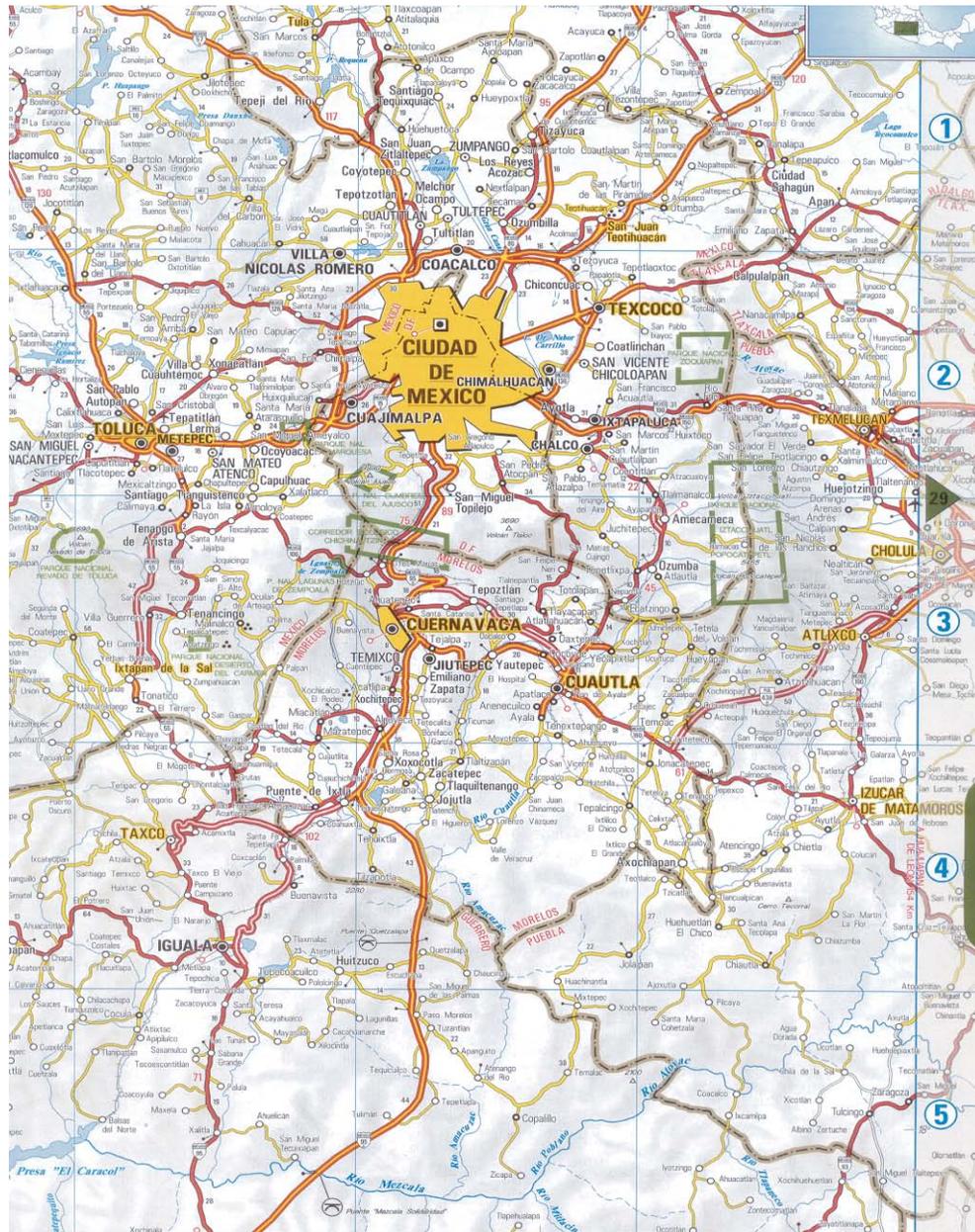


Figura 1. Localización del área de estudio y vías de acceso

En el área de estudio se encuentran incluidas las poblaciones de Xicatlacotla, Nexpa, Los Elotes, Valle de Vázquez, Quilamula, Huixastla y Chimalacatlán, pertenecientes al Estado de Morelos, así como

Coaxitlán, Rancho Frío, Cuahuilotla, Tlalchichila y San Juan Teocaltzingo, en el Estado de Guerrero. El acceso al área desde la Ciudad de México se logra a través de la Autopista México-Acapulco, desviándose en la caseta de cobro de Alpuyeca en dirección a la ciudad de Jojutla de Juárez y, finalmente, arribando por la carretera federal Jojutla-Valle de Vázquez. También se puede acceder, saliendo de Jojutla, en dirección a Nexpa, y de ahí a Huixastla, o bien, al salir de Jojutla pasar por los poblados de Higuieron, Xicatlacotla y Coaxitlán para arribar a Rancho Frío o a San Juan Teocaltzingo. A la porción este del área se puede ingresar desde Valle de Vázquez, pasando por Quilamula.

De acuerdo a la división fisiográfica de los estados de Morelos y Guerrero, realizada por el INEGI, el área de estudio está incluida en las subprovincias Sierras y Valles Guerrerenses y Sur de Puebla, correspondientes a las Provincias de la Sierra Madre del Sur y del Eje Neovolcánico, respectivamente.

El área de tesis está incluida en la Región Hidrológica Río Balsas (RH-18), dentro de la cuenca Río Grande de Amacuzac, y es atravesada desde el noroeste hacia el sur por el río Amacuzac, incluyendo la confluencia de este último con el río Cuautla. En su trayecto, estos ríos surcan afloramientos de rocas sedimentarias mesozoicas y volcánicas terciarias, siendo una característica peculiar en la zona la presencia de depósitos de flujos de escombros provenientes del volcán Popocatepetl, de la Sierra Nevada y de la zona volcánica de Zempoala, emplazados de forma aislada en los costados de los ríos, principalmente.

El área también coincide con la parte noreste de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, que constituye una de las nueve áreas naturales protegidas en el Estado de Morelos y que se localiza en la cuenca del río Balsas. Declarada recientemente (1999) como reserva de la biosfera, cubre una superficie de 59,030.9 hectáreas al sur de Morelos y sus límites con Guerrero y Puebla. Destaca en esta zona de reserva de la biosfera, la presencia del distrito minero polimetálico de Huautla.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

De acuerdo a la clasificación de provincias geológicas de México (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), el área de estudio se ubica dentro de la Provincia de la Plataforma de Morelos, denominación que se refiere al elemento paleogeográfico cretácico característico de esta región. En la literatura existen diferentes nombres para los terrenos que conforman el territorio mexicano y aún están en discusión sus extensiones y sus límites. Para la división de terrenos tectonoestratigráficos de Sedlock et al. (1993), el área de estudio se ubica dentro del Terreno Náhuatl, el cual corresponde a la porción sureste del Terreno Guerrero de Campa y Coney (1983). Sedlock et al. (1993) consideran que el límite del Terreno Guerrero con el Terreno Mixteco, ubicado al oriente, corresponde a la Cabalgadura de Papalutla (De Cserna et al., 1980), mientras que Campa y Coney ubican el límite de los terrenos Guerrero y Mixteco en la Cabalgadura de Teloloapan, en el borde occidental de la Plataforma Guerrero-Morelos. A través de la Cabalgadura de Papalutla, con una orientación NE-SW y vergencia al NW, el Complejo Acatlán cabalga a la Formación Morelos, y marca un cambio abrupto en edad y litología entre la PGM, del Cretácico, y el Complejo Acatlán, del Paleozoico.

Desde la perspectiva de las rocas cenozoicas de la región, el área de estudio se sitúa en la porción norte-central de la Sierra Madre del Sur (SMS), a pocos kilómetros al sur de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Figura 2).

Las rocas más antiguas que afloran en la zona constituyen secuencias sedimentarias cretácicas que se extienden ampliamente en los estados de México, Morelos y Guerrero. El basamento metamórfico sobre el que se acumularon las secuencias sedimentarias cretácicas del área no aflora, pero según las inferencias de Campa y Coney (1983) se trata del Complejo Acatlán, del Paleozoico. Sin embargo, a la fecha existe incertidumbre acerca del basamento que subyace a las secuencias sedimentarias cretácicas.

Las rocas sedimentarias mesozoicas están cubiertas en discordancia angular por un voluminoso paquete de rocas volcánicas del Cenozoico, que constituyen el objeto principal de este estudio. Coronando la secuencia se encuentran los depósitos del Cuaternario, derivados de la actividad volcánica del Popocatepetl, de la Sierra Nevada y de la zona volcánica de Zempoala, así como de la acumulación de depósitos aluviales.

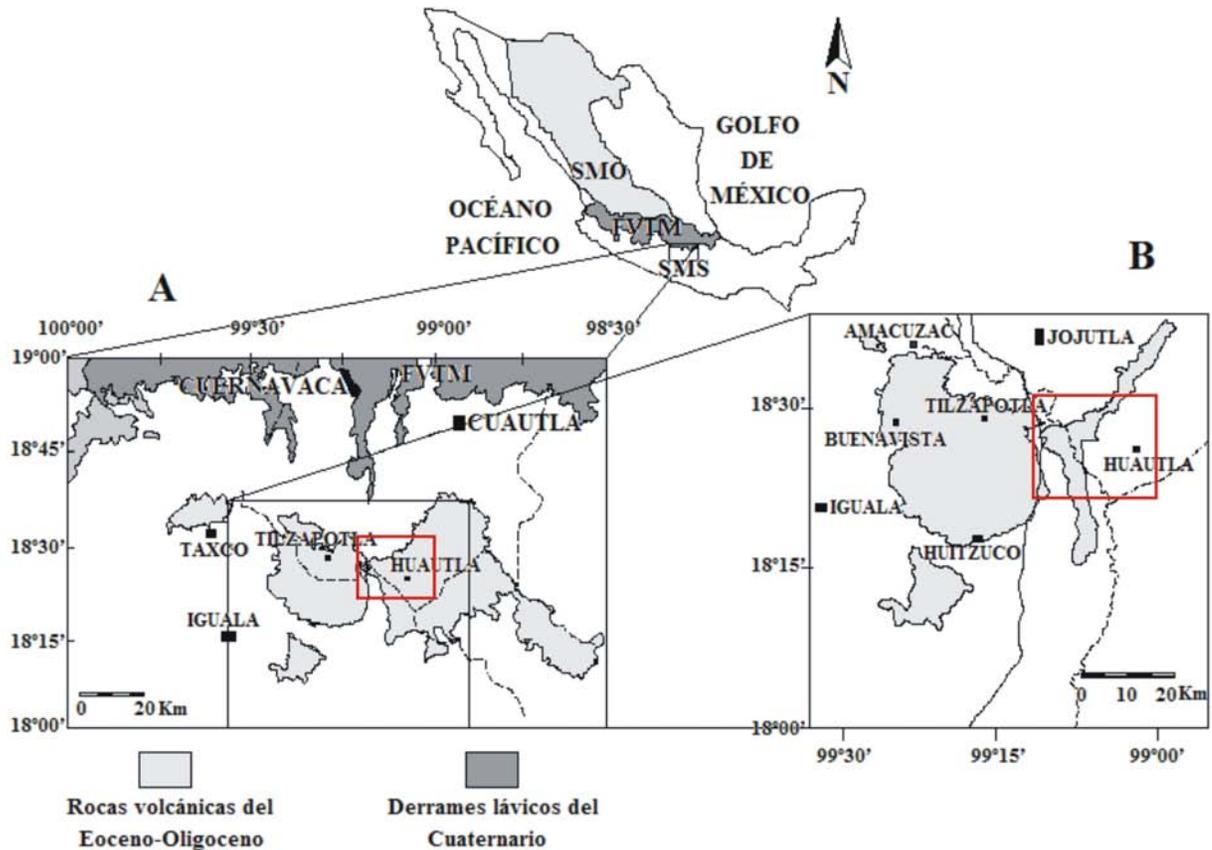


Figura 2. (A) Mapa esquemático de la porción norte-central de la Sierra Madre del Sur mostrando la distribución de rocas volcánicas terciarias y la ubicación del área de estudio. (B) Distribución de las rocas ignimbríticas asociadas a la Caldera de Tilzapotla. Al poniente, noreste y oriente del área de estudio, el área de tesis de Monter-Ramírez (2004), Díaz-Bravo (2005) y Ramírez Pérez-Amaya (2005), respectivamente. Modificado de Morán-Zenteno et al. (2004). SMO: Sierra Madre Occidental, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana, SMS: Sierra Madre del Sur.

II. 1. Provincias geológicas

En la región que incluye al área de estudio se reconocen tres elementos geológicos diferenciados por características estratigráficas, geocronológicas y de deformación muy distintivas. El primero lo constituye la Plataforma Guerrero-Morelos (PGM), conformada por depósitos marinos cretácicos de carácter carbonatado con una cobertura continental terciaria. La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), del Cenozoico tardío, de carácter exclusivamente continental y primordialmente ígneo

extrusivo, representa el segundo de esos elementos. Por último, la provincia magmática de la Sierra Madre del Sur (SMS), una de las provincias cenozoicas más complejas y menos conocidas en el país.

II. 1. 1. Plataforma Guerrero-Morelos

La provincia geológica de la Plataforma Guerrero-Morelos (PGM) se caracteriza por una amplia secuencia de rocas carbonatadas de un ambiente de plataforma marina depositadas durante el Cretácico (Fries, 1960, Hernández-Romano, 1999, Cerca-Martínez, 2004). Se ubica en la porción centro-sur de México, extendiéndose por los estados de Guerrero, Morelos, Puebla y México. De norte a sur, la PGM se distribuye desde Cuernavaca (Morelos) hasta Chilpancingo (Guerrero). De poniente a oriente, se extiende desde la Cabalgadura de Teloloapan (Campa-Uranga et al., 1976) hasta la Cabalgadura de Papalutla (De Cserna et al., 1980). Las estructuras de acortamiento tectónico en las secuencias de la PGM se desarrollaron durante el Cretácico tardío-Terciario temprano (Orogenia Laramide).

II. 1. 2. Provincia magmática cenozoica de la Sierra Madre del Sur

La provincia de la Sierra Madre del Sur (SMS), del Paleoceno-Mioceno temprano, es una provincia magmática constituida por rocas volcánicas y plutónicas que anteceden a las unidades de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). De poniente a oriente, se extiende desde el occidente de Michoacán hasta el Istmo de Tehuantepec, y de norte a sur, desde la FVTM hasta los límites de la margen continental del Pacífico. Se trata de un elemento cenozoico cuya parte norte-central traslapa a la Plataforma Guerrero-Morelos.

La SMS está conformada por dos franjas principales semiparalelas, con una orientación aproximada NW-SE. La primera se compone de una serie discontinua de campos volcánicos con derrames andesíticos-riolíticos y materiales epiclásticos y piroclásticos a los cuales pertenece la Sierra de Huautla. La segunda, denominada Cinturón de Plutones Terciarios (CPT) por Morán-Zenteno et al. (1999), es una franja más continua con orientación al NW que se encuentra distribuida a lo largo de la margen suroeste de México, y está constituida por rocas intrusivas félsicas.

El área de estudio se localiza en la porción norte-central de la SMS, cerca de su límite con la FVTM, y en ella se presentan, ocupando grandes extensiones, algunas de las rocas volcánicas características de la SMS.

II. 1. 2. 1. Rocas volcánicas de la porción norte-central de la SMS

Incluidas en la SMS se encuentran numerosas zonas volcánicas sobresalientes, siendo Tilzapotla, Taxco y Buenavista-Quetzalapa las más cercanas al área objeto de este estudio. Además, en los vecinos estados de México, Guerrero, Puebla y Oaxaca, resaltan otras zonas de volcanismo cenozoico como Nachititla, La Goleta, Sultepec, Temascaltepec, Huitzuco, Tehuitzingo, Huajuapán-Tamazulapán-Yanhuitlán, Tlaxiaco, Tlacolulá-Mitla y Nejapa (Morán-Zenteno et al., 1999). La zona más extensa de rocas volcánicas silíceas del Cenozoico es el Campo Volcánico de Huautla (CVH), cuya porción occidental abarca el área objeto de este estudio.

Campo Volcánico de la Sierra de Huautla

El área de estudio se extiende a lo largo del flanco occidental de la Sierra de Huautla, la cual constituye la mayor extensión de rocas volcánicas terciarias de la parte norte-central de la SMS. Las secuencias volcánicas que la componen están representadas por ignimbritas con biotita euhedral y un grado de piroconsolidación moderada a fuerte, por derrames de composición dacítica y andesítica, y por cuerpos subvolcánicos de traquita de cuarzo que yacen sobre las secuencias del Cretácico-Paleógeno. Por las características estratigráficas, estructurales y litológicas se ha inferido en esta zona un posible centro volcánico con probable evolución similar al de Tilzapotla (González-Torres et al., 2004).

Caldera de Tilzapotla

Identificada recientemente por Morán-Zenteno et al. (2004), la Caldera de Tilzapotla constituye una de las mayores estructuras volcánicas de colapso reportadas en México, con una geometría semi-elíptica de 33 km × 24 km. Esta estructura del Terciario se ubica a pocos kilómetros al occidente

del área objeto de este estudio, formando parte de la porción norte-central de la SMS.

Las secuencia volcánica asociada a esta estructura está conformada por una ignimbrita silícica con biotita euhedral, con edad variable entre 34 y 35 Ma (Ignimbrita Tilzapotla), sobre la cual descansan, una ignimbrita vitroclástica con fragmentos de pómez y fenocristales de biotita (Ignimbrita Rodarte), conglomerados estratificados y depósitos de derrames lávicos (Formación Las Mesas), ignimbritas reomórficas, vitrófidos y derrames dacíticos (Formación Gallego), y derrames de lava de composición dacítica-andesítica, con edades variables entre 34 y 32 Ma (Formación El Salto). Además, se encuentran rocas hipabisales en forma de diques andesíticos-riolíticos y el intrusivo granodiorítico Coxcatlán.

Campo Volcánico de Taxco

En esta zona afloran secuencias volcánicas con espesores superiores a los 800 metros, que yacen sobre rocas sedimentarias y metamórficas mesozoicas (Alaniz-Álvarez et al., 2002). La secuencia volcánica está constituida, de la base a la cima, por ignimbritas, brechas ignimbríticas e intercalaciones de vitrófidos con edad variable entre 35 y 38 Ma (Formación Acamixtla), lavas riolíticas, ignimbritas con un grado de piroconsolidación moderado e intercalaciones de vitrófidos (Formación Tenería), ignimbritas con un grado de consolidación moderado (Formación Huizteco) y vitrófidos en la cima. La edad para las dos últimas formaciones varía entre 31 y 32 Ma.

II. 1. 3. Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), del Mioceno medio-Reciente (Ferrari-Pedraglio et al., 1999), es una cadena montañosa de origen volcánico que se extiende sobre la parte central de la República Mexicana con una dirección general E-W, a lo largo de más de 1,000 km, del Océano Pacífico al Golfo de México. Esta cadena montañosa, compuesta por grandes estratovolcanes andesíticos, campos de volcanes monogenéticos basálticos y andesíticos y centros volcánicos silícicos, es uno de los elementos más característicos de la tectónica de México y evidencia de la compleja evolución geodinámica del territorio nacional.

La FVTM constituye un arco volcánico que figura entre los más complejos y variados de la región circum-Pacífica (Ferrari-Pedraglio, 2000). Su génesis y evolución geológico-tectónica han sido temas controversiales desde el siglo pasado debido a la variabilidad en el estilo volcánico y la composición química del arco. La mayor parte de los autores consideran a esta provincia volcánica como un arco volcánico asociado a la subducción de la Placa de Cocos (Ferrari-Pedraglio et al., 1999). En otros trabajos se ha considerado la posibilidad de que la FVTM se haya originado por el ascenso de una pluma del manto y los procesos de rifting continental asociados (Verma, S. P., 2002). Sin embargo, a pesar de las contribuciones de los estudios realizados durante los últimos años, no se ha aclarado completamente el origen y la evolución de la FVTM.

II. 2. Estratigrafía regional del Cretácico-Terciario

El registro cretácico en esta región está compuesto por secuencias sedimentarias marinas plegadas y secuencias continentales que han sido previamente estudiadas por diversos autores en diferentes localidades.

La base de la secuencia mesozoica expuesta en la zona está representada por afloramientos aislados de extensión variable de la Formación Morelos, constituida por sucesiones de calizas y dolomías de un ambiente de plataforma marina somera de edad Albiano-Cenomaniano (Fries, 1960, Ruiz-Violante et al., 1994, Hernández-Romano, 1999), y por una secuencia de anhidritas denominada como Anhidrita Huitzucó (De Cserna et al., 1980), la cual forma estructuras diapíricas que la ponen en contacto con las unidades superiores. Esta secuencia de anhidritas se ha ubicado en la base de la secuencia de calizas (Fries, 1960, De Cserna et al., 1980), sin embargo, las relaciones estratigráficas con las calizas no son claras.

Descansando sobre la Formación Morelos se encuentra la Formación Cuautla (Fries, 1960, De Cserna y Fries, 1981), de edad Cenomaniano tardío-Turoniano (Fries, 1960, De Cserna et al., 1980), compuesta por una sucesión de calizas con un conglomerado basal. De Cserna et al. (1980) consideran que el contacto de la Formación Cuautla con la Formación Morelos es discordante, sin embargo, en trabajos posteriores (Hernández-Romano et al., 1997) se ha planteado que la Formación Cuautla corresponde al cambio gradual de sedimentación carbonatada a siliciclástica y, por tanto, su contacto

con la Formación Morelos subyacente es de carácter transicional. Este cambio en la sedimentación ha sido estudiado en detalle en su bioestratigrafía por Hernández-Romano et al. (1997) y ubicado aproximadamente en la frontera Cenomaniano-Turoniano.

Las rocas que coronan la secuencia mesozoica corresponden a la Formación Mezcala, conformada por una sucesión de capas de arenisca, limolita y lutita con intercalaciones calcáreas, con menor proporción de calizas arcillosas, margas, calcarenitas y conglomerados de grano fino, cuyas exposiciones en el área son de las más extensas, sólo superadas por las secuencias de rocas magmáticas del Terciario que afloran a nivel regional. Esta formación, definida como una secuencia de ambiente marino, en contacto transicional sobre la Formación Cuautla, varía en edad entre el Coniaciano-Maestrichtiano (Fries, 1960, De Cserna et al., 1980, Hernández-Romano, 1999).

Las rocas terciarias más antiguas depositadas sobre las formaciones cretácicas con una discordancia pronunciada son las pertenecientes al Grupo Balsas (Fries, 1960, 1966), constituido por una variedad de rocas sedimentarias continentales del Paleoceno-Oligoceno o del Eoceno-Oligoceno, entre las que figuran conglomerados con interstratificaciones de arcosa, arenisca, limolita, lutita, brechas y tobas volcánicas, derrames lávicos, caliza lacustre y/o yeso, las cuales se extienden de forma aislada en el área de estudio en afloramientos de poca extensión.

Sobreyaciendo al Grupo Balsas se encuentra un grueso paquete de rocas volcánicas terciarias de distintos centros volcánicos que incluye ignimbritas, riolitas, andesitas, dacitas, basaltos, depósitos de flujos de escombros y depósitos de caída (Morán-Zenteno et al., 2000). En conjunto, esta secuencia de rocas magmáticas es la de mayor extensión en el área, siendo las ignimbritas y las andesitas-dacitas las más abundantes.

II. 3. Rasgos tectónicos regionales

Los rasgos tectónicos más notables que afectan a las secuencias cretácicas de la región corresponden a eventos tectónicos que ocurrieron al final del Cretácico y durante el Paleógeno. La Orogenia Laramide del Cretácico tardío, afectó principalmente a las rocas cretácicas produciendo un acortamiento con dirección ENE-WSW. El resultado del acortamiento se manifiesta en un amplio cinturón de pliegues y

cabalgaduras de bajo ángulo con orientación norte-sur y vergencia principal hacia el oriente (Fries, 1960, Campa y Ramírez, 1979, De Cserna y Fries, 1981, Salinas-Prieto, 1994, Cerca-Martínez, 2004). Salinas-Prieto (1994) interpreta, además, una trayectoria de la deformación de poniente a oriente, producida por la acreción del Terreno Guerrero al continente (Terreno Mixteco).

A nivel regional se reconoce a la Cabalgadura de Teloloapan (Campa-Uranga et al., 1976), con una orientación NNW-SSE y vergencia al ENE, considerada como el límite occidental de la Plataforma Guerrero-Morelos (PGM), y a la Cabalgadura de Papalutla (De Cserna et al., 1980), con una orientación preferencial NE-SW y vergencia al NW, considerada como el límite oriental de la PGM (Sedlock et al, 1993).

En la región también se presenta la Cabalgadura de Zitlala (Cerca-Martínez, 2004), con vergencia al oeste, el anticlinorio de Huixtla-Tuzantlán (De Cserna et al., 1980), con una orientación norte-sur, el anticlinal Floreado (Campa-Uranga, 1998, Fitz-Díaz, 2001, Cerca-Martínez, 2004), con vergencia al SW, el sinclinorio de Zacango (Fitz-Díaz, 2001), con orientación preferencial NE-SW, y la Cabalgadura de Ticumán, con vergencia al oeste.

Entre las estructuras más importantes, posteriores a los pliegues laramídicos, figuran algunas fallas con orientación preferencial norte-sur que parecen tener una historia cinemática compleja, cuya disposición coincide con la de la franja silícica del norte de la SMS (González-Torres et al., 2004). También existen lineamientos de orientación NW-SE que han sido reconocidos en gran parte del sur y centro de la Sierra Madre del Sur (SMS), los cuales corresponden a fallas de tipo lateral izquierdo, activas en el Eoceno tardío (Alaniz-Álvarez et al., 2002, Morán-Zenteno et al., 2003). Estos lineamientos son bastante notables en la porción sureste del Estado de México, norte de Guerrero y sur de Morelos y han sido reportados tanto en la cartografía del Consejo de Recursos Minerales (CRM) como en los estudios realizados por Alaniz-Álvarez et al. (2002) y Morán-Zenteno et al. (2004).

Al sur de Tilzapotla, Morán-Zenteno et al. (2004) reportaron una estructura volcánica de colapso, con bordes limitados por lineamientos tectónicos NE-SW, coincidentes con fallas terciarias de desplazamiento lateral izquierdo que estuvieron activas en el Eoceno tardío.

En la región de Taxco, Morán-Zenteno et al. (1999) indicaron la presencia de un sistema de fallas de desplazamiento lateral izquierdo cortando secuencias de ignimbritas con edades del Eoceno-Oligoceno.

Alaníz-Álvarez et al. (2002) asociaron este sistema de fallas laterales a una extensión en dirección NNW en una primera fase y otra extensión en dirección NE en una fase posterior, las cuales originaron la reactivación de estructuras preexistentes y desarrollaron cuencas sedimentarias en respuesta al desplazamiento a lo largo de las fallas mayores.

Según la carta geológica Cuernavaca (CRM, 1998), a nivel regional existen también notables lineamientos con una orientación NE-SW.

II. 4. Migración del magmatismo

Las rocas magmáticas terciarias del sur de México forman parte del volcanismo que cubre una extensa porción del occidente y centro-sur de México, asociado a un arco volcánico que ha cambiado su orientación a través del tiempo, relacionándose en un principio con la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMO), adoptando una tendencia NNW, y posteriormente, vinculándose con la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Ferrari-Pedraglio et al., 1999), alineándose aproximadamente de occidente a oriente.

Adicionalmente, la extinción del magmatismo de arco en un amplio sector del sur de México precedió al desarrollo del volcanismo en la actual FVTM (Ferrari-Pedraglio et al., 1999, 2002, Morán-Zenteno et al., 2000). El cambio del volcanismo de la SMS al magmatismo de la FVTM, registrado en el Mioceno, es una de las evidencias de la evolución tectónica en esta parte del suroeste de México durante la reconfiguración de las placas tectónicas y el truncamiento de la margen continental del suroeste de México (Morán-Zenteno et al., 1999).

Por su distribución general, se ha considerado que el magmatismo terciario del sur de México representa la extensión meridional de la provincia volcánica de la SMO (Ferrari-Pedraglio et al., 1999, 2002). Sin embargo, existen marcados contrastes entre la deformación de la Sierra Madre del Sur (SMS), caracterizada por una tectónica de fallamiento lateral, y la deformación registrada de la SMO, cuyos rasgos tectónicos dominantes son la extensión regional coaxial E-W y el fallamiento asociado N-S. De igual forma, existen algunas variaciones en la cronología de los principales episodios magmáticos correspondientes a cada provincia.

En años recientes se han realizado diversos estudios que cubren diferentes aspectos de este periodo de transición entre el magmatismo terciario de la SMS y la FVTM, lo que ha permitido definir mejor los patrones de migración del magmatismo (Schaaf et al., 1995, Morán-Zenteno et al., 1999, 2000, Ferrari-Pedraglio et al., 1999, Cerca-Martínez, 2004), los rasgos de deformación tectónica terciaria asociados al magmatismo (Centeno-García, 1988, Tolson, 1998, Alaniz-Álvarez et al., 2002, Nieto-Samaniego et al., 1995, Silva-Romo et al., 2001, Martiny-Kramer et al., 2002, Cerca-Martínez, 2004) y la estratigrafía de zonas volcánicas terciarias del norte y del occidente de la SMS (De Cserna y Fries, 1981, De Cserna, 1982, Morán-Zenteno et al., 1998, 2004, Martiny-Kramer et al., 2002, Ferrusquía-Villafranca, 1999, 2001, Alaniz-Álvarez et al., 2002).

CAPÍTULO III

ESTRATIGRAFÍA Y PETROGRAFÍA

En el área de estudio afloran cuatro paquetes principales de rocas. El primero está constituido por secuencias sedimentarias marinas y continentales del Cretácico que se encuentran plegadas y afalladas, las cuales están cubiertas en discordancia angular por rocas clásticas del Paleógeno. Sobre estas unidades yace una voluminosa secuencia volcánica terciaria constituida por rocas extrusivas asociadas a cuerpos subvolcánicos con características muy diversas. Por último, se encuentran depósitos del Cuaternario derivados de la actividad volcánica del Popocatepetl, de la Sierra Nevada y de la zona volcánica de Zempoala, así como de la acumulación de depósitos aluviales (Figura 3).

A nivel regional, el registro litoestratigráfico cretácico, de acuerdo a la nomenclatura introducida por Fries (1960, 1965), está representado por las rocas químicas y clásticas de las formaciones Morelos y Mezcala, respectivamente. El Paleógeno está integrado por el Grupo Balsas, diversas unidades de rocas volcánicas del Grupo Buenavista, la Riolita Tilzapotla, las rocas de las formaciones Cuernavaca y Tlaica, así como las unidades que integran a los grupos Ixtlilco y Tepexco. Por último, las unidades que componen el registro litológico del Cuaternario están representadas por derrames basálticos (Grupo Chichinautzin), depósitos de flujos de escombros (Formación Tepoztlán), derivados de la actividad volcánica de la Sierra de Zempoala y del Popocatepetl, respectivamente, y por acumulaciones de depósitos aluviales.

III. 1. Basamento y unidades pre-cretácicas

El basamento regional consiste de un conjunto de rocas metamórficas cristalinas del Paleozoico temprano que integran al denominado Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978). Este basamento aflora fuera del área de estudio, al oriente y al sureste, en los estados de Puebla, Oaxaca y Guerrero.

El Complejo Acatlán está compuesto por un conjunto de rocas metamórficas entre las que figuran migmatitas, eclogitas, anfibolitas, cuarcitas, gneises, esquistos, filitas, metasedimentos y, en menor proporción, unidades metamórficas cuyos protolitos son rocas máficas y ultramáficas, que afloran en la parte norte-occidental del Estado de Puebla (Ortega-Gutiérrez, 1981).

Figura 3. Mapa geológico a semidetalle del área de estudio

A nivel regional, este basamento metamórfico se encuentra cubierto en discordancia angular o por contacto tectónico por sedimentos siliciclásticos del Pérmico (Formación Olinalá), y más extensamente por secuencias sedimentarias del Jurásico medio (Conglomerado Cualac y Grupo Tecocoyunca) y del Cretácico (Formación Zicapa). Todas estas secuencias afloran hacia el sur del área de estudio, en el Estado de Guerrero (Erben, 1956, Sedlock et al., 1993, Ortega-Gutiérrez et al., 1999).

III. 2. Unidades cretácicas

La estratigrafía del Mesozoico, y especialmente del Cretácico, ha sido estudiada ampliamente a nivel regional y sobresalen entre muchos otros los trabajos de Fries (1960) y De Cserna et al. (1980). En las décadas de los ochentas y los noventas se llevaron a cabo diferentes trabajos sobre la estratigrafía del Cretácico en esta región. Todos ellos fueron ampliados, discutidos y sintetizados en los trabajos de Hernández-Romano et al. (1997) y Hernández-Romano (1999), estableciendo las relaciones estratigráficas y cambios de facies entre las cuatro unidades más importantes de este período, las formaciones Zicapa, Morelos, Cuautla y Mezcala.

El registro cretácico expuesto en el área objeto de este estudio está conformado por secuencias sedimentarias marinas y continentales intensamente deformadas, integradas por rocas evaporíticas y carbonatadas de edad Albiano-Cenomaniano de la Formación Morelos y por sedimentos siliciclásticos continentales del Turoniano-Maestrichtiano de la Formación Mezcala.

III. 2. 1. Formación Morelos

La Formación Morelos constituye la secuencia expuesta más antigua en el área de estudio. Fue cartografiada y definida originalmente por Fries (1960). Está constituida por sucesiones de calizas y dolomías de un ambiente de plataforma marina somera con un cuerpo de anhidrita en la base, que en conjunto poseen una edad del Albiano-Cenomaniano (Fries, 1960, Hernández-Romano, 1999).

Litología y espesor

En el área de estudio, las calizas de la Formación Morelos presentan un color variable entre gris claro y gris oscuro al fresco, con coloraciones variables entre pardo grisáceo y pardo rojizo a la intemperie. Su textura varía, de la base a la cima de la secuencia observada, entre mudstone y packstone, exhiben estratificación delgada a masiva, predominando la estratificación gruesa. Contienen bioclastos de gasterópodos y foraminíferos. El espesor máximo expuesto de la Formación Morelos en el área de estudio, observado al occidente de San Juan Teocaltzingo, es de 150 m.

Distribución

La Formación Morelos aflora de forma aislada y discontinua desde la porción centro-norte del área de estudio hasta la parte suroeste de la misma. La mayoría de sus exposiciones constituye sierras no mayores de 600 m de altura que presentan orientaciones preferenciales al noroeste, norte y noreste. Entre las sierras con orientación norte-sur figuran la situada al norte de Nexpa, la que se encuentra al oeste de Valle de Vázquez y la ubicada a unos 5 km al noroeste de San Juan Teocaltzingo, la cual constituye el afloramiento más extenso de esta formación en el área de estudio. Adicionalmente, las sierras con orientación noreste-suroeste se presentan a unos 3 km al noreste de Huixastla y a un par de kilómetros al este de Coaxitlán. Por último, afloramientos de esta formación sin una tendencia definida se encuentran al norte de Coaxitlán, bordeando la Autopista del Sol y al suroeste del Centro Recreativo Las Huertas.

La secuencia de anhidrita de esta formación aflora en los alrededores de Coaxitlán y San Juan Teocaltzingo, donde la mayor parte de la anhidrita presenta estructuras de deformación intensa, aunque en zonas aisladas se encuentra poco deformada. En estas localidades la anhidrita se observa intercalada dentro de la caliza, por ello, en este trabajo se considera a la secuencia de anhidrita como parte de la Formación Morelos.

Relaciones estratigráficas

La Formación Morelos guarda una relación de contacto transicional con la Formación Mezcala suprayacente, presentando exposiciones de este contacto al norte de Nexpa y al poniente de Valle de Vázquez. Al suroeste de dicha población, esta unidad se encuentra en discordancia bajo algunos de los flujos piroclásticos que constituyen a la Toba Chinameca, situación que se repite en los alrededores de San Juan Teocaltzingo. Además, en las inmediaciones de este último poblado, la Formación Morelos se encuentra intrusionada por una diorita denominada informalmente en este trabajo como Intrusivo El Chautle. Al noreste de Coaxitlán, la Formación Morelos también guarda una relación de contacto discordante bajo el Conglomerado Coaxitlán y la Ignimbrita Tilzapotla. En el camino Los Elotes-Huixastla se observa a las rocas de la Formación Morelos en contacto por falla inversa bajo las unidades de la Formación Mezcala. Al occidente de Valle de Vázquez, la Formación Morelos se

encuentra en contacto por falla lateral bajo el conglomerado de clastos de caliza del Grupo Balsas.

El miembro de anhidrita de esta formación se caracteriza por formar estructuras de deformación diapírica que lo ponen en contacto con las rocas calcáreas superiores. En el área de estudio, esta relación se observa en los alrededores de los poblados de Coaxitlán y San Juan Teocaltzingo, donde también se observan intercalaciones de evaporitas y calizas.

Edad

En el área de estudio no se encontraron fósiles índice o asociaciones faunísticas que permitieran ubicar con precisión el alcance estratigráfico de esta unidad. Fries (1960) asignó una edad del Albiano-Cenomaniano a la Formación Morelos basándose en su contenido faunístico, misma edad a la establecida por Hernández-Romano (1999). Por su parte, Sabanero-Sosa (1990) determina a nivel regional una edad variable entre el Aptiano-Albiano hasta el Cenomaniano tardío-Turoniano temprano, sin establecer límites de edad definidos para la Formación Morelos. Posteriormente, Aguilera-Franco (2003) fija una edad del Cenomaniano tardío a la cima de esta formación.

Interpretación genética

Las características litológicas y paleontológicas de las rocas de la Formación Morelos indican un depósito en un ambiente de plataforma marina somera, sin aporte de terrígenos, con mares abiertos de aguas cálidas y transparentes.

III. 2. 2. Formación Mezcala

Las rocas más jóvenes del registro mesozoico expuesto en el área de estudio corresponden a la Formación Mezcala, descrita como una secuencia de ambiente marino compuesta principalmente por areniscas, limolitas y lutitas calcáreas con intercalaciones de conglomerados y estratos de caliza (Cerca-Martínez, 2004), con edades que varían desde el Turoniano hasta el Maestrichtiano (Fries, 1960, De Cserna et al., 1980, Hernández-Romano, 1999).

Litología y espesor

En el área de tesis, las rocas de esta formación presentan un color gris oscuro con tonalidades púrpuras, rojizas y verdosas al fresco, y una coloración variable entre pardo claro y oscuro a la intemperie. La estratificación de las capas clásticas varía en espesor desde unos pocos milímetros, para las rocas de grano más fino, hasta más de un metro para la arenisca. Sobre los planos de estratificación de la arenisca abundan las rizaduras y grietas de desecación.

La arenisca de grano fino de esta formación está constituida principalmente por granos clásticos detríticos de cuarzo, feldespatos alcalinos y minerales máficos completamente alterados, mientras que las capas conglomeráticas superiores contienen cantidades mucho mayores de granos de cuarzo y de otros minerales de origen ígneo.

En el área de tesis, la Formación Mezcala presenta un espesor máximo de 250 m, observado en el área Los Elotes-Valle de Vázquez.

Distribución

Las rocas de la Formación Mezcala se encuentran expuestas principalmente en las porciones noroeste y norte-centro del área de estudio. Se encuentran cubiertas por rocas lávicas y piroclásticas del Cenozoico en la mayor parte del resto del área. Después de las rocas volcánicas, las de la Formación Mezcala son las que ocupan una mayor extensión en el área y, en general, se presentan con una deformación intensa, por lo que la presencia de estratos inclinados y/o plegados es la regla general.

Relaciones estratigráficas

La Formación Mezcala se presenta en contacto transicional con la Formación Morelos subyacente, relación que se encuentra expuesta en el camino Jojutla-Valle de Vázquez. Su contacto superior es de carácter discordante con las unidades del Grupo Balsas, relación que se observa en el límite norte del área de estudio, entre los poblados de Xicatlacotla y Nexpa. Por otra parte, su contacto es discordante debajo de las rocas terciarias de la Toba Chinameca y la Ignimbrita Tilzapotla, relación que se observa claramente al noreste de Huixtla y al norte de Coaxitlán, respectivamente. Al norte de Huixtla, la

Formación Mezcala se presenta en contacto por falla inversa con la Formación Morelos.

Figura 4. Columna estratigráfica del área de Valle de Vázquez, Estado de Morelos

Edad

A escala regional, el alcance estratigráfico de la Formación Mezcala parece tener límites variables. Leyva-Arias (1990) determinó una edad del Cenomaniano tardío-Coniaciano a partir de fauna pelágica y planctónica de la porción inferior de esta formación. Salinas-Prieto (1994) considera una edad del Turoniano temprano-Paleoceno temprano. Adicionalmente, Perilliat et al. (2000), establecen una edad del Maestrichtiano Inferior a la parte superior de la Formación Mezcala en la zona de Temalac, Guerrero.

Interpretación genética

En un trabajo de investigación de la Plataforma Guerrero-Morelos, Cerca-Martínez (2004) describe a las rocas de la Formación Mezcala como pertenecientes a una zona contigua a un arco magmático ubicado en la margen occidental del actual continente mexicano, o cerca de éste, que a finales del Cretácico estaba en proceso de deformación, levantamiento sobre el nivel del mar y erosión. En su análisis, Cerca-Martínez (2004) establece que una parte del material clástico de esta unidad provino de la erosión de las rocas carbonatadas que afloraban a finales del Mesozoico, pero la mayor parte fue derivada de rocas metamórficas e ígneas, entre ellas, rocas volcánicas de composición intermedia expuestas en aquel entonces.

III. 3. Unidades cenozoicas

III. 3. 1. Grupo Balsas

Las rocas terciarias más antiguas depositadas sobre las formaciones cretácicas son las pertenecientes al Grupo Balsas, al que se le han atribuido edades que varían entre el Paleoceno y el Oligoceno (Fries, 1960, 1966, Cerca-Martínez, 2004).

Litología y espesor

El Grupo Balsas fue definido por Fries (1960) como una secuencia de depósitos continentales, entre los que figuran conglomerados, areniscas y limolitas, distribuidos ampliamente en la cuenca del río Mezcala-Balsas. Posteriormente, De Cserna et al. (1980) lo describieron como secuencias de conglomerados de caliza, arcosas, areniscas y limolitas.

En el área de estudio, el Grupo Balsas está conformado por un conglomerado de clastos de caliza (mudstone, packstone y/o wackestone) soportados por una matriz calcárea-arenosa de color pardo rojizo, presentando también facies de conglomerado clasto-soportado. El tamaño de los clastos varía desde las gravas hasta los fragmentos de un metro de diámetro y su forma es variable entre

subangulosa y redondeada. Entre las estructuras sedimentarias primarias presentes se identifican una pseudoestratificación y bancos de arena de más de un metro de espesor.

El espesor máximo de las secuencias expuestas del Grupo Balsas en el área de estudio, observado al occidente de Valle de Vázquez, es de 50 m.

Distribución

En el área de estudio, el conglomerado de calizas del Grupo Balsas presenta exposiciones de poca extensión, ubicadas en los límites norte y suroeste de la misma. El único afloramiento cartografiable de esta unidad a la escala del mapa geológico del área de estudio se ubica al noroeste de Valle de Vázquez. Esta unidad continúa expuesta al noreste del área de tesis, donde Díaz-Bravo (2005) reporta afloramientos de mayor extensión.

Relaciones estratigráficas

A nivel regional, el Grupo Balsas descansa en discordancia encima de todas las rocas más antiguas, y subyace en discordancia a las rocas volcánicas del Cenozoico.

En el área de estudio, el Grupo Balsas presenta exposiciones de su contacto discordante sobre la Formación Morelos al sureste de Coaxitlán, y también sobreyace discordantemente a las rocas de la Formación Mezcala en el límite norte del área de estudio, entre los poblados de Xicatlacotla y Nexpa. Al noroeste de Valle de Vázquez, el Grupo Balsas se presenta en contacto por falla con las rocas calcáreas de la Formación Morelos.

A nivel regional, el Grupo Balsas se encuentra bajo un paquete de rocas volcánicas terciarias de distintos centros volcánicos que incluye ignimbritas, riolitas, andesitas, dacitas, depósitos de lahares y depósitos de caída (Morán-Zenteno et al., 2000). En el área de estudio no se observó claramente esta relación, sin embargo, Díaz-Bravo (2005) reporta el contacto discordante del conglomerado calcáreo del Grupo Balsas bajo una secuencia de ignimbritas a 3 km al noreste del área de estudio.

Edad

La edad de esta formación y su alcance estratigráfico no se pueden definir claramente. En el área de estudio, la edad de las capas asignadas al Grupo Balsas se puede ubicar en algún intervalo entre el Maestrichtiano y el inicio del Oligoceno, por su relación de discordancia angular sobre las rocas deformadas del Cretácico y su posición bajo rocas volcánicas que en este trabajo son consideradas genéricamente como del Oligoceno temprano.

Interpretación genética

El Grupo Balsas, definido por Fries (1960) como una secuencia de depósitos continentales con una amplia diversidad en edad y litología, guarda en sus secuencias el registro de episodios de sedimentación continental y de eventos volcánicos que acontecieron desde finales del Cretácico hasta el Terciario, y conforma la primera sucesión sedimentaria continental terciaria que se acumuló después de una larga historia marina en la región. La presencia de conglomerados matriz soportados y mal clasificados sugiere el depósito por flujos de gravedad en un ambiente de abanico aluvial.

III. 3. 2. Intrusivo El Chautle

Esta unidad, constituida por un cuerpo plutónico de composición diorítica, ha sido definida de manera informal en este trabajo como Intrusivo El Chautle, y toma su nombre del cerro homónimo donde se encuentra expuesta, ubicado al sureste de Coaxitlán.

Litología

La diorita que constituye este cuerpo plutónico, compuesta principalmente por plagioclasa de composición intermedia y ferromagnesianos, muestra un color gris oscuro al fresco y pardo grisáceo a la intemperie, textura fanerítica de grano medio y estructura masiva. A nivel microscópico, presenta ortopiroxeno y minerales opacos como accesorios, además de óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios, exhibe una textura inequigranular y en algunas partes hipidiomórfica-granular.

Figura 5. Columna estratigráfica del área de San Juan Teocaltzingo, Estado de Guerrero

Distribución

El Intrusivo El Chautle está expuesto en la porción suroeste del área de estudio, en la ladera del cerro del mismo nombre, donde presenta afloramientos discontinuos de poca extensión.

Relaciones estratigráficas

En el camino Coaxitlán-San Juan Teocaltzingo se observa a las rocas de este cuerpo plutónico intrusionando a las calizas de la Formación Morelos, siendo esta la única relación de contacto que se observó con claridad en el área de estudio.

Edad

La edad absoluta de este cuerpo plutónico se desconoce debido a la falta de un fechamiento isotópico del mismo. Sin embargo, a través del análisis de las relaciones de corte y contacto con las unidades cretácicas y terciarias del área de estudio, se estima que el Intrusivo El Chautle puede tener una edad posterior al Cretácico medio y anterior al Eoceno tardío. En el área de estudio se presenta sin rasgos de deformación, por lo que se infiere que su emplazamiento fue posterior a los eventos tectónicos relacionados con la Orogenia Laramide, lo que restringe aún más su edad entre el Paleoceno y el Eoceno tardío.

III. 3. 3. Ignimbrita Tilzapotla

La Ignimbrita Tilzapotla fue descrita recientemente por Morán-Zenteno et al. (2004) como una secuencia de ignimbritas de composición dacítica que incluye numerosos flujos piroclásticos con características petrográficas similares, con una edad aproximada entre 34 y 35 Ma (Eoceno tardío). Fries (1960) se refirió originalmente a esta unidad como la Riolita Tilzapotla, pero como este mismo autor indica, está constituida principalmente por depósitos piroclásticos. Por esta razón no es conveniente que se use la denominación de Riolita.

Litología y espesor

Morán-Zenteno et al. (2004) describen esta unidad en términos de dos facies, la intra-caldera y la extra-caldera. La facies intra-caldera está constituida por varios flujos piroclásticos de composición dacítica, moderadamente a fuertemente soldados, que presentan contactos difusos entre ellos y que integran una secuencia masiva con un espesor estimado mayor a los 600 m. Por otra parte, la facies extra-caldera está integrada por varias ignimbritas vitrocristalinas de composición intermedia-silícica con características petrológicas distintivas y que en conjunto poseen un espesor máximo de 50 m.

En el área de tesis, la Ignimbrita Tilzapotla está representada por una ignimbrita vitrocristalina de color pardo rosado constituida principalmente por fenocristales de cuarzo y plagioclasa de composición intermedia-sódica, con sanidino y biotita euhedral en menor proporción, inmersos en una matriz microcristalina-vítrea compuesta por cuarzo, plagioclasa intermedia-sódica, óxidos de hierro y circón, con fragmentos líticos de caliza y anhidrita principalmente, y de rocas lávicas y subvolcánicas

en menor proporción. En el área de estudio sólo aflora la facies de extra-caldera y su espesor máximo, observado en el área de Coaxitlán-Rancho Frío, es de 50 m.

Distribución

La Ignimbrita Tilzapotla se distribuye a lo largo del límite occidental del área de estudio, desde las inmediaciones de Coaxitlán hasta el borde austral de la misma. Exposiciones de esta unidad se presentan a lo largo del camino Coaxitlán-Rancho Frío, al suroeste del Centro Recreativo Las Huertas y en los alrededores del poblado denominado Ojo de Agua.

Relaciones estratigráficas

Esta unidad yace en discordancia sobre las calizas de la Formación Morelos y de la misma forma sobre las rocas siliciclásticas de la Formación Mezcala. En el primer caso, es posible observar con claridad el contacto de la Ignimbrita Tilzapotla sobre la Formación Morelos a lo largo del borde occidental del cerro El Chautle. Por otra parte, el contacto discordante de la Ignimbrita Tilzapotla sobre la Formación Mezcala se observa claramente al suroeste del Centro Recreativo Las Huertas, en afloramientos que forman los cortes de la Autopista México-Acapulco. En las inmediaciones de Coaxitlán, la Ignimbrita Tilzapotla se encuentra en discordancia bajo la Toba Chinameca y el Conglomerado Coaxitlán.

Edad

Dentro de su trabajo de investigación sobre la Caldera de Tilzapotla, Morán-Zenteno et al. (2004) determinan edades de K-Ar y Ar-Ar en sanidino y biotita comprendidas entre 34 y 35 Ma (Eoceno tardío) para los eventos ignimbríticos más intensos.

Interpretación genética

Morán-Zenteno et al. (2004) establecen la existencia de una caldera de colapso de dimensiones kilométricas como la estructura volcánica que dio origen a la Ignimbrita Tilzapotla.

Figura 6. Sección geológica del transecto A-A'

III. 3. 4. Conglomerado Coaxitlán

El Conglomerado Coaxitlán es una unidad informal descrita recientemente por Morán-Zenteno et al. (2004). Se trata de un depósito compuesto por conglomerados, flujos de escombros de origen volcánico y algunos horizontes alterados de tobas de caída de poco espesor.

Litología y espesor

En el área de tesis, el Conglomerado Coaxitlán está integrado por depósitos de flujos de escombros y capas de conglomerado de fragmentos volcánicos.

Los depósitos de flujos de escombros que constituyen esta unidad están compuestos por brechas y conglomerados matriz soportados. La fracción lítica predominante en estos depósitos está integrada por clastos de ignimbrita, pero también incluye algunos fragmentos de andesita y dacita. La matriz está constituida por fragmentos de tamaño variable hasta 2 mm de diámetro, pobremente seleccionados.

Sobre estos depósitos, yacen en discordancia capas de conglomerado compuestas por clastos subredondeados de andesita y dacita, con fragmentos de ignimbrita subordinados, pobremente seleccionados, hasta de 50 cm de diámetro.

El espesor máximo de esta unidad en el área de estudio, observado al noreste de Coaxitlán, es de 80 m.

Distribución

Dentro del área de estudio, esta unidad se encuentra expuesta al noreste de Coaxitlán, donde sus afloramientos se observan en los cortes de la Autopista del Sol.

Relaciones estratigráficas

El Conglomerado Coaxitlán yace en discordancia sobre las unidades cretácicas expuestas en el área de estudio y sobre la Ignimbrita Tilzapotla.

Edad

Dado que el Conglomerado Coaxitlán sobreyace a la Ignimbrita Tilzapotla, cuya edad se ubica entre 34 y 35 Ma (Eoceno tardío), y tomando en cuenta que la secuencia incluye intercalaciones de tobas de caída silíceas aparentemente relacionadas con la actividad de la Caldera de Tilzapotla o el Centro Volcánico de Huautla, lo más probable es que la edad de este conglomerado se ubique entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano (Morán-Zenteno et al., 2004).

Interpretación genética

La acumulación del Conglomerado Coaxitlán convivió en parte con el volcanismo silíceo que parece corresponder a la actividad volcánica posterior al colapso de la Caldera de Tilzapotla. Si se consideran los fragmentos de andesita que contiene y la alta energía del depósito, se puede también inferir que su acumulación persistió aún cuando se inició la resurgencia de la Caldera de Tilzapotla.

III. 3. 5. Complejo Volcánico Huautla

Esta unidad está conformada por rocas volcánicas e hipabisales de composición intermedia-silíceo en las que es común la presencia de alteraciones hidrotermales y que en conjunto han sido agrupadas en este trabajo informalmente bajo la denominación de Complejo Volcánico Huautla.

Litología y espesor

El Complejo Volcánico Huautla está constituido, principalmente, por diversos derrames y brechas volcánicas de composición andesítica-riolítica, incluyendo vitrófidos y rocas hipabisales de la misma composición en menor proporción. En gran parte de esta unidad es común encontrar evidencias de alteración hidrotermal, como oxidación y silicificación.

Los diversos derrames que integran la mayor parte del Complejo Volcánico Huautla presentan una coloración variable entre gris parduzco y pardo rojizo, textura porfídica en la mayoría de ellos y afanítica en algunos, estructuras de flujo y lajeada, con rocas masivas menos abundantes. A nivel microscópico, están constituidos principalmente por plagioclasa intermedia-sódica, con ortopiroxeno,

minerales opacos y vidrio en menor proporción. Presentan textura glomeroporfídica ocasional. La matriz puede ser pilotaxítica, con microlitos de plagioclasa orientados en el caso de las rocas con estructura fluidal, o bien, microcristalina-vítrea en el caso de las rocas masivas o en lajas. Presentan óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios, vetillas de cuarzo criptocristalino y rasgos de oxidación y silicificación.

Las brechas volcánicas que separan los diversos derrames de esta unidad presentan fragmentos subangulosos de andesita o dacita de tamaño variable hasta 40 cm de diámetro, incluidos en una matriz de lava microcristalina de color pardo rojizo y composición intermedia. Al igual que los derrames de esta unidad, estas brechas volcánicas presentan un alto grado de intemperismo y las mismas evidencias de alteración hidrotermal.

Integrando esta unidad también se encuentran algunos vitrificados de composición riolítica, estructura masiva, color negro al fresco y gris parduzco a la intemperie. A escala microscópica, están compuestos por una pasta vítrea con pequeños cristales de plagioclasa sódica, biotita y minerales opacos constituyendo menos del 5% de la roca.

Como parte del Complejo Volcánico Huautla también se encuentran diversas rocas hipabisales de composición predominantemente andesítica-dacítica, color variable entre gris parduzco y pardo oscuro, textura porfídica y estructura masiva, constituidas a escala microscópica por plagioclasa de composición intermedia-sódica principalmente, con ortopiroxeno, biotita y minerales opacos en menor proporción.

En esta unidad existen zonas de alteración hidrotermal donde se alojaron minerales polimetálicos, que han sido explotados a nivel regional desde el siglo XVIII y evaluados recientemente por el Consejo de Recursos Minerales (2000). El área en donde se han realizado los trabajos de explotación y la cual fue estudiada por el Consejo de Recursos Minerales (2000) está al oriente del área del presente estudio, en los alrededores de la localidad de Huautla. En el área de estudio, la mineralización se refleja en la presencia de vetas de cuarzo lechoso hasta de 3 m de espesor y de extensas zonas de alteración (oxidación y silicificación) desarrolladas principalmente en los derrames y brechas volcánicas de esta unidad. Entre los minerales reportados por el Consejo de Recursos Minerales en estos yacimientos se encuentran diversos sulfuros de plata y cobre, malaquita, azurita, barita, cuarzo y calcita (CRM,

2000).

El espesor máximo de esta secuencia en el área de estudio, observado al norte de San Juan Teocaltzingo, es de 300 m.

Distribución

Las rocas del Complejo Volcánico Huautla se distribuyen desde la porción central del área de tesis hasta los límites austral y oriental de la misma. Exposiciones de poca extensión de esta unidad se ubican al sureste de Huixastla. Afloramientos más extensos se encuentran en las inmediaciones de San Juan Teocaltzingo y Cuahuilotla. En los alrededores de estas localidades, el Complejo Volcánico Huautla se encuentra bajo rocas lávicas de la Andesita Chimalacatlán. Fuera del área del presente estudio, en los alrededores de Huautla, las rocas volcánicas y subvolcánicas de esta unidad se encuentran bajo las miembros que integran a la Andesita Chimalacatlán.

Relaciones estratigráficas

El Complejo Volcánico Huautla subyace a la Andesita Chimalacatlán. Exposiciones de este contacto se presentan en la terracería que conduce de Chimalacatlán al río Amacuzac. En la porción noreste del área de estudio, el Complejo Volcánico Huautla se encuentra en discordancia bajo la Dacita Agua Fría. Este contacto se presenta al suroeste de Quilamula. La relación temporal entre el Complejo Volcánico Huautla y la Toba Chinameca es incierta. De igual forma, su relación de contacto con la Formación Quilamula no se conoce con claridad.

Edad

En el área de estudio, las rocas que integran al Complejo Volcánico Huautla no cuentan con un fechamiento isotópico que permita establecer su edad. Sin embargo, por su relación de contacto con la Dacita Agua Fría suprayacente, unidad expuesta en el área de estudio cuya edad ha sido fechada, se considera al Complejo Volcánico Huautla con una edad comprendida entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano.

Interpretación genética

La presencia de derrames y cuerpos hipabisales abundantes revela la existencia de una serie de conductos volcánicos distribuidos en un área relativamente extendida. Es probable que estos cuerpos se hayan emplazado a través de varios centros volcánicos discretos o de una estructura mayor tipo caldera. Esta última posibilidad requiere ser valorada cuidadosamente, ya que hasta ahora no se ha confirmado que existan cuerpos mayores de ignimbrita asociados que hubieran sido emitidos de la misma región. A pesar de que existen cuerpos voluminosos de ignimbrita en los alrededores de este complejo [Toba Chinameca (Díaz-Bravo, 2005), Ignimbrita Maravillas (Ramírez Pérez-Amaya, 2005)], no se ha confirmado la relación cronológica o genética de estos con las rocas del Complejo Volcánico Huautla.

III. 3. 6. Dacita Agua Fría

La Dacita Agua Fría (Díaz-Bravo, 2005) está constituida por diversos derrames y brechas volcánicas de composición intermedia-silícica, con algunos depósitos piroclásticos intercalados.

Litología y espesor

En el área de estudio, las rocas silícicas de esta unidad son de color pardo grisáceo al fresco y pardo rojizo a la intemperie y muestran estructura fluidal. A nivel microscópico, presentan textura porfídica y están constituidas principalmente por plagioclasa sódica, con ortopiroxeno, minerales opacos y vidrio en menor proporción, en una matriz pilotaxítica de microlitos orientados, con óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios.

Los derrames de composición intermedia de esta unidad en el área de tesis presentan un color gris verdoso al fresco y pardo oscuro a la intemperie, estructura fluidal en algunas partes y lajeada en otras. A escala microscópica, muestran textura porfídica y están constituidos esencialmente por plagioclasa de composición intermedia, con augita, ortopiroxeno, minerales opacos y vidrio en menor proporción, en una matriz pilotaxítica, con óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios.

Entre estos derrames se encuentran diversas brechas volcánicas constituidas por fragmentos angulosos de rocas volcánicas de composición silícica-intermedia de tamaño variable hasta 30 cm de diámetro, incluidas en una matriz lávica microcristalina de color pardo rojizo.

El espesor máximo de esta unidad en el área de estudio, observado en los alrededores de Quilamula, es de 200 m.

Distribución

La Dacita Agua Fría se distribuye a lo largo del límite noreste del área de estudio, desde el borde septentrional de la misma hasta las inmediaciones de Quilamula. Sus afloramientos se presentan a lo largo de los caminos que conducen de Quilamula a Huautla y a San José de Pala, poblaciones ubicadas fuera del área de estudio, al sur y al norte, respectivamente.

Relaciones estratigráficas

Esta unidad se encuentra en discordancia bajo las rocas volcánicas de la Andesita Chimalacatlán y bajo los flujos de escombros que integran a la Formación Quilamula. En cambio, yace sobre las rocas volcánicas que integran al Complejo Volcánico Huautla.

Edad

La edad de la Dacita Agua Fría ha sido determinada por el grupo responsable de este proyecto en una localidad situada en la porción noreste del área de estudio, donde un fechamiento de K-Ar en una dacita de hornblenda arrojó una edad de 30.9 ± 0.6 Ma (Oligoceno temprano).

Interpretación genética

Las emisiones lávicas que dieron origen a esta unidad se generaron principalmente en el borde de una estructura caldérica (Caldera del Tepehuaje) ubicada aproximadamente a 3 km al noreste del área de estudio (Díaz-Bravo, 2005). La presencia de este tipo de derrames dentro de la esquina noreste del área estudiada indican que su emplazamiento no se restringió estrictamente al área de la Caldera del

Tepehuaje.

Figura 7. Sección geológica del transecto B-B'

III. 3. 7. Formación Quilamula

En este trabajo se nombra de manera informal como Formación Quilamula a una unidad integrada por diversos depósitos de flujos de escombros constituidos por fragmentos de rocas volcánicas.

Litología y espesor

Esta unidad está constituida por diversos depósitos de flujos de escombros de color pardo oscuro, constituidos por fragmentos de rocas volcánicas que varían de subangulosos a subredondeados, de tamaño variable que alcanza hasta 40 cm de diámetro, soportados por una matriz lodosa de color pardo negruzco. El espesor máximo de esta unidad en el área de estudio, observado al oriente de Quilamula, es de 100 m.

Distribución

Esta secuencia está expuesta en la porción noreste del área de estudio. Sus afloramientos se observan a lo largo de la carretera Quilamula-Huautla.

Relaciones estratigráficas

La Formación Quilamula yace en discordancia sobre la Dacita Agua Fría, relación que se observa al oriente de Quilamula. De acuerdo a la distribución de sus afloramientos, la Formación Quilamula parece sobreyacer al Complejo Volcánico Huautla, aunque el contacto no se observó con claridad. Por otra parte, la Formación Quilamula se encuentra en discordancia bajo la Andesita Chimalacatlán, relación de contacto que se observa en las estribaciones de Quilamula.

Edad

La edad máxima estimada de esta secuencia a través del análisis de sus relaciones estratigráficas con otras unidades expuestas en el área de estudio se infiere como del Oligoceno temprano, específicamente, por su relación de contacto con la Dacita Agua Fría subyacente, para la cual se

obtuvo una edad de K-Ar de 30.9 ± 0.6 Ma (Oligoceno temprano) en la porción noreste del área de estudio por el grupo responsable de este proyecto.

Interpretación genética

Los depósitos de flujos de escombros que integran a esta unidad están relacionados con la actividad volcánica que dio origen a las secuencias de rocas lávicas del área de estudio, o bien, de aquellas que se extienden hacia el oriente de la misma.

III. 3. 8. Toba Chinameca

Díaz-Bravo (2005) describe esta unidad informal al norte del área de estudio, en los flancos poniente y norte de la Sierra de Huautla, donde reconoce al menos tres miembros que corresponden a diferentes flujos piroclásticos. En el área de tesis, esta unidad está constituida por once miembros diferentes que corresponden a flujos piroclásticos y depósitos de caída de composición dacítica con características petrológicas diferentes.

Litología y espesor

En el área de la presente tesis, los diferentes miembros que integran a la Toba Chinameca se encuentran expuestos de forma discontinua y se acuñan lateralmente, por lo que en este trabajo se describen de acuerdo a las relaciones espaciales observadas localmente.

Miembro 1. En el área de Huixastla-Cuahuilotla, la porción basal de esta unidad está constituida por una ignimbrita vitrocristalina de color rosa formada por dos flujos diferentes, uno soldado en la base y otro superior ligeramente soldado. A nivel microscópico, el flujo inferior presenta abundantes cristales de cuarzo, plagioclasa intermedia-sódica y biotita euhedral fresca, fragmentos de rocas volcánicas y pómez en menor proporción. El flujo superior está compuesto por los mismos minerales, pero es más pumicítico y posee fragmentos de rocas volcánicas más pequeños, el cuarzo y la biotita euhedral son menos abundantes y esta última se encuentra oxidada. Ambos flujos poseen minerales opacos como accesorios, óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios.

Miembro 2. En el área de Valle de Vázquez-Huixastla, el Miembro 1 se encuentra bajo un depósito de caída no consolidado de color pardo rojizo, pseudoestratificado y con restos orgánicos en forma de carbón. A escala de muestra de mano, está constituido por cristales subredondeados de cuarzo y plagioclasa, con fragmentos de roca subangulosos y pequeños cristales de biotita en menor proporción.

Miembro 3. En la misma localidad, el Miembro 2 se encuentra bajo una ignimbrita vitrocrystalina soldada de color blanco grisáceo, constituida a nivel microscópico por cristales de plagioclasa intermedia-sódica, biotita oxidada y cuarzo, pequeños fragmentos de roca y pómez en menor proporción. Como accesorios están presentes minerales opacos, y además, óxidos de hierro como minerales secundarios.

Miembro 4. En las inmediaciones de Valle de Vázquez se encuentra una ignimbrita pumicítica de color blanco constituida por dos flujos piroclásticos ligeramente distintos, siendo el superior más vítreo que el inferior. A escala microscópica, el flujo inferior está constituido por plagioclasa intermedia-sódica principalmente, con biotita subhedral oxidada, apatito y pómez en menor proporción. A nivel microscópico, el flujo superior está constituido por los mismos minerales, pero se distingue del anterior por presentar circón y una mayor cantidad de pómez. Ambos flujos tienen minerales opacos como accesorios, además de óxidos de hierro, sericita y calcita como minerales secundarios.

Miembro 5. En la localidad antes mencionada, el Miembro 4 se encuentra bajo una ignimbrita pumicítica de color verde, compuesta por dos flujos piroclásticos diferentes, siendo el flujo inferior el más consolidado y el superior más rico en pómez. A escala microscópica, el flujo inferior está compuesto por una matriz vítrea formada de *shards* y fenocristales de plagioclasa intermedia-sódica, con una proporción menor de cuarzo, biotita oxidada y pómez. A nivel microscópico, el flujo superior está formado por los mismos minerales, pero contiene más cuarzo y pómez. Ambos flujos presentan minerales opacos como accesorios y óxidos de hierro como secundarios.

Miembro 6. En los alrededores de Cuahuilotla se presentan otros flujos piroclásticos distintos a los descritos con anterioridad. El primero de ellos, en orden estratigráficamente ascendente, está representado por una ignimbrita vitrocrystalina de color blanco grisáceo que yace sobre el Miembro 1. A escala microscópica, esta ignimbrita blanca grisácea está constituida principalmente por plagioclasa

intermedia-sódica y cuarzo, con biotita subhedral oxidada y minerales opacos en menor proporción. Presenta, además, sericita y calcita como minerales secundarios.

Miembro 7. Sobre el Miembro 6 se encuentra una ignimbrita de color pardo amarillento que a nivel microscópico presenta cristales subhedrales de cuarzo y plagioclasa intermedia-sódica predominantes, cristales oxidados de biotita, circón y minerales opacos en una matriz criptocristalina. Esta ignimbrita incluye óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios.

Miembro 8. El Miembro 7 se encuentra bajo un flujo piroclástico de grano fino de color blanco amarillento que a escala microscópica está compuesto por cuarzo y plagioclasa intermedia-sódica principalmente, con minerales opacos y biotita oxidada, sericita y óxidos de hierro como minerales secundarios.

Miembro 9. Sobre el Miembro 8 se encuentra un depósito de caída no consolidado de color pardo rojizo constituido por fragmentos de pómez hasta de 50 cm de largo, con cristales de cuarzo y plagioclasa.

Miembro 10. El Miembro 9 se encuentra bajo una ignimbrita fuertemente soldada de color pardo rojizo que a nivel microscópico presenta plagioclasa intermedia-sódica, cuarzo, biotita y minerales opacos. También presenta óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios.

Miembro 11. Sobre el Miembro 10 se encuentra una ignimbrita pumicítica constituida por dos flujos piroclásticos, uno de color pardo rojizo y otro que presenta un color pardo amarillento. A escala microscópica, estos flujos están constituidos principalmente por plagioclasa intermedia-sódica y biotita oxidada. Además, presentan minerales opacos, sericita y óxidos de hierro.

El espesor máximo de esta secuencia en el área de estudio, observado en el área Tlalchichila-Valle de Vázquez, es de 350 m.

Distribución

La Toba Chinameca se extiende a lo largo de una franja de dimensiones variables que se prolonga desde el límite norte del área de estudio hasta el extremo austral de la misma, continuando expuesta fuera del área de tesis en ambas direcciones. Un rasgo característico de esta unidad es la distribución a lo largo de toda esta franja de la ignimbrita cristalina rosa que la integra (Miembro 1), ocupando siempre la posición más inferior en la secuencia.

Esta unidad se encuentra expuesta en las estribaciones de Valle de Vázquez, donde se extiende en dirección suroeste, bordeando los afloramientos de rocas lávicas de la Andesita Chimalacatlán, registrando un cambio en su orientación hacia el poniente, en la latitud de Huixastla, donde la Toba Chinameca se encuentra ampliamente expuesta. Continúa desde Huixastla hasta las inmediaciones de San Juan Teocaltzingo, Cuahuilotla y Tlalchichila, bordeando rocas carbonatadas de la Formación Morelos y lávicas del Complejo Volcánico Huautla.

Relaciones estratigráficas

La Toba Chinameca yace en discordancia sobre las rocas cretácicas expuestas en el área de estudio. De igual forma, su contacto es discordante sobre las rocas del Grupo Balsas. En un primer caso, es posible observar exposiciones de la Toba Chinameca situada sobre la Formación Mezcala al noreste de Huixastla y al suroeste de Valle de Vázquez. Por otra parte, el contacto discordante de la Toba Chinameca sobre la Formación Morelos se observa al suroeste de Huixastla y en los alrededores de San Juan Teocaltzingo. Sobre la Toba Chinameca descansa en discordancia la Andesita Chimalacatlán. Este contacto se observa con claridad al oriente y al sur de Valle de Vázquez. La relación temporal entre la Toba Chinameca y el Complejo Volcánico Huautla no se conoce con claridad. En el área de San Juan Teocaltzingo, la Toba Chinameca se encuentra en una posición topográfica superior al Complejo Volcánico Huautla, pero el contacto entre las dos unidades no se observó.

Edad

No se cuenta con fechamientos de rocas que forman la Toba Chinameca dentro del área de estudio. Sin embargo, se cuenta con un fechamiento en una unidad similar a la ignimbrita rosa vitrocrystalina de la

base que se obtuvo por el grupo responsable de este proyecto en el flanco oriental de la Sierra de Huautla. Este fechamiento se realizó por el método de K-Ar y se obtuvo una edad de 31.8 ± 0.4 Ma (Oligoceno temprano). El miembro 1 tiene también similitudes mineralógicas con la Ignimbrita Tilzapotla pero su posible relación permanece incierta en tanto no se cuente con un fechamiento isotópico.

Interpretación genética

Es posible que parte de la Toba Chinameca, especialmente el miembro basal, provenga de la Caldera de Tilzapotla, sin embargo, los miembros superiores son en cierta medida diferentes a los flujos piroclásticos descritos por Morán Zenteno et al. (2004) en la Caldera de Tilzapotla. La presencia de grandes fragmentos de pómez en el miembro 9 sugieren una fuente cercana, probablemente diferente a la Caldera de Tilzapotla

III. 3. 9. Andesita Chimalacatlán

En el área de estudio, la Andesita Chimalacatlán está integrada por un conjunto de rocas volcánicas entre las que figuran andesitas y brechas volcánicas de composición intermedia con diversas intercalaciones de depósitos de caída y un depósito epiclástico en su porción basal.

Litología y espesor

En el área de tesis, la mayor parte de la Andesita Chimalacatlán está constituida por diversos derrames de composición andesítica que presentan algunas variaciones texturales. Estos derrames presentan una coloración que varía entre gris parduzco y pardo oscuro, textura porfídica y de un derrame a otro se identifican estructuras de flujo, lajas o rocas volcánicas masivas. A nivel microscópico, estas andesitas están constituidas por fenocristales de plagioclasa de composición intermedia como mineral esencial, con ortopiroxeno, biotita, seudomorfos de hornblenda y minerales opacos como accesorios, óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios, presentando vidrio como constituyente escaso de la matriz microcristalina.

Separando cada uno de estos derrames se encuentran diversas brechas volcánicas, constituidas por fragmentos angulosos de rocas volcánicas de composición andesítica, de tamaño variable hasta 50 cm de diámetro, inmersas en una matriz lávica microcristalina de color gris parduzco a pardo rojizo compuesta principalmente por plagioclasa de composición intermedia.

Intercalados en esta secuencia de derrames y brechas volcánicas se encuentran varios depósitos de caída no consolidados de composición andesítica de poca extensión que se acuñan lateralmente. Presentan una coloración variable entre verde amarillento y pardo rojizo y muestran pseudoestratificación. A escala de muestra de mano, están constituidos por cristales subredondeados de tamaño variable entre ceniza fina y gruesa, pobremente seleccionados, de plagioclasa, con biotita, minerales opacos, vidrio, pómez y óxidos de hierro en menor proporción, con la presencia escasa de fragmentos líticos de andesita.

La base de esta unidad está integrada por un depósito epiclástico no consolidado de color verde amarillento. A nivel de muestra de mano, está constituido por cristales subredondeados de plagioclasa y ferromagnesianos, con una menor proporción de pómez y fragmentos líticos de andesita. El tamaño de sus componentes varía entre arena fina y arena gruesa, presenta pseudoestratificación y componentes moderadamente seleccionados.

El espesor máximo de esta secuencia en el área de estudio, observado en el área Chimalacatlán-Quilamula, es de 250 m.

Distribución

Las rocas de esta unidad se encuentran ampliamente distribuidas en las porciones central y noreste del área de estudio. De poniente a oriente, esta unidad se extiende desde los alrededores de Huixtla hasta las inmediaciones de Quilamula. De norte a sur, la unidad se extiende desde el límite septentrional del área de estudio hasta los alrededores de San Juan Teocaltzingo. Esta unidad continúa expuesta al noreste y al oriente del área de estudio, donde Díaz-Bravo (2005) y Ramírez Pérez-Amaya (2005), respectivamente, reportan diferentes miembros que integran a la Andesita Chimalacatlán.

Exposiciones de esta unidad en el área de tesis se encuentran a lo largo de los caminos Valle de

Vázquez-Chimalacatlán y Valle de Vázquez-Quilamula, donde se observan diversos derrames, brechas volcánicas e intercalaciones de depósitos de caída. Otras exposiciones se presentan en los alrededores de Chimalacatlán. Al oriente de esta población se encuentra el denominado Cerro Frío, constituido por una serie de derrames andesíticos asociados a brechas volcánicas con un depósito de caída intercalado. Por otra parte, al suroeste del mismo poblado se encuentra una vereda que llega hasta el río Amacuzac, trazada sobre diversos derrames, brechas volcánicas y depósitos de caída intercalados pertenecientes a esta unidad.

Relaciones estratigráficas

En el área de estudio, la Andesita Chimalacatlán yace en discordancia sobre las rocas del Complejo Volcánico Huautla. Esta relación de contacto se observa sobre la terracería que conduce de Chimalacatlán al río Amacuzac. Otras unidades que yacen bajo la Andesita Chimalacatlán en el área de estudio son la Toba Chinameca y la Dacita Agua Fría, con una relación de contacto discordante. Exposiciones de estas relaciones se ubican sobre el camino que conduce de Valle de Vázquez a Chimalacatlán y al sureste de Quilamula, respectivamente. La Andesita Chimalacatlán se encuentra en discordancia bajo las rocas volcánicas de la Formación Cerro Frío. Esta relación de contacto se observa al oriente de Chimalacatlán.

Edad

La edad absoluta de la Andesita Chimalacatlán se desconoce debido a la falta de fechamientos de las rocas que la integran. Sin embargo, por sus relaciones estratigráficas con otras unidades expuestas en el área de estudio, en particular con la Dacita Agua Fría, de la cual se ha obtenido una edad de K-Ar de 30.9 ± 0.6 (Oligoceno temprano), puede asegurarse que la edad máxima de la Andesita Chimalacatlán es el Oligoceno temprano.

Interpretación genética

El origen de las rocas que integran esta secuencia se relaciona en este trabajo a un volcanismo de tipo fisural cuya fuente corresponde a la serranía ubicada al oriente de Chimalacatlán, denominada como Cerro Frío, asociado a la extrusión de material piroclástico que dio como resultado la intercalación de

diversos depósitos de caída dentro de esta unidad.

III. 3. 10. Formación Cerro Frío

En este trabajo se nombra de manera informal como Formación Cerro Frío a un conjunto de rocas volcánicas e hipabisales de composición dacítica expuestas a lo largo de la serranía del Cerro Frío.

Litología y espesor

En el área de tesis, la Formación Cerro Frío está integrada por diversos derrames de composición dacítica de color gris claro al fresco y pardo grisáceo a la intemperie, textura porfídica y estructura fluidal. A escala microscópica, estas rocas están constituidas por fenocristales de plagioclasa intermedia-sódica, con augita, minerales opacos y vidrio en una matriz pilotaxítica de microlitos de plagioclasa orientados. Presentan óxidos de hierro y sericita como minerales secundarios. Su expresión geomorfológica y sus características texturales y estructurales sugieren que estos derrames constituyen domos volcánicos.

Dentro de esta unidad también se reconocen diversas rocas hipabisales de composición dacítica de color pardo oscuro al fresco y pardo rojizo a la intemperie, textura porfídica y estructura masiva. A escala de muestra de mano, estas rocas están compuestas por fenocristales de plagioclasa intermedia-sódica, con ferromagnesianos en menor proporción, en una matriz afanítica de color pardo. Por su relación espacial con los derrames lávicos de esta unidad, estas rocas hipabisales parecen constituir los conductos de emisión de las lavas de la Formación Cerro Frío.

Como parte de la Formación Cerro Frío se encuentran diversas brechas volcánicas de color variable entre pardo amarillento y pardo rojizo y estructura masiva. Están constituidas por fragmentos subangulosos de dacita, de tamaño variable hasta 80 cm de diámetro, inmersos en una matriz afanítica de color amarillento.

Intercalados en esta unidad se reconocen diversos depósitos piroclásticos no consolidados de color pardo amarillento constituidos principalmente por ceniza volcánica, con pómez y fragmentos líticos de

dacita de tamaño de arena muy fina en menor proporción.

El espesor máximo de esta unidad en el área de estudio, observado al oriente de Chimalacatlán, es de 100 m.

Distribución

Las únicas exposiciones de la Formación Cerro Frío en el área de estudio se presentan a lo largo de la serranía del Cerro Frío, ubicada al oriente de Chimalacatlán, y que se extiende por aproximadamente 7 km en dirección norte-sur.

Relaciones estratigráficas

La única relación de contacto observable de esta unidad en el área de tesis se encuentra expuesta en la serranía del Cerro Frío, donde yace en discordancia sobre las rocas volcánicas que integran la Andesita Chimalacatlán.

Edad

Esta formación constituye la unidad volcánica terciaria más joven del área de estudio. Su edad absoluta no ha sido determinada, sin embargo, por su relación estratigráfica sobre la Andesita Chimalacatlán, se considera que la edad máxima de la Formación Cerro Frío es el Oligoceno temprano.

Interpretación genética

La distribución de cuerpos hipabisales de la Formación Cerro Frío a lo largo de la serranía del mismo nombre, y las características litológicas y los rasgos geomorfológicos de las rocas volcánicas que constituyen esta secuencia, sugieren que las rocas que la integran se originaron a partir de un volcanismo fisural o de conductos centrales discretos.

III. 3. 11. Depósitos de flujos de escombros

Los depósitos de flujos de escombros expuestos en el área de estudio se encuentran formando terrazas que resultaron de la disección de una antigua superficie de acumulación. Todos los depósitos reconocidos tienen, por su distribución y su relación con los cauces principales, una clara conexión con el volcán Popocatepetl, de la Sierra Nevada y con la zona volcánica de Zempoala, ubicadas a más de 60 kilómetros del área de tesis en línea recta.

Litología y espesor

En el área de tesis se reconocen diversos tipos de depósitos que integran esta unidad, entre ellos, depósitos de flujos de escombros, depósitos de corrientes hiperconcentradas y depósitos fluviales, que incluyen brechas y conglomerados matriz soportados, capas epiclásticas formadas por ceniza estratificada y conglomerados clasto-soportados, respectivamente. Los clastos más abundantes en estos depósitos son los de basalto, andesita, vidrio volcánico y pómez, con rocas carbonatadas y clásticas de las formaciones cretácicas expuestas en el área de estudio en menor proporción.

En el área de estudio, estos depósitos presentan un color pardo grisáceo a la intemperie y gris claro al fresco, con tonalidades variables debido a la presencia de una gran variedad de clastos que los componen, variantes entre subangulosos y redondeados. Estos clastos, de tamaño variable hasta 60 cm de diámetro, corresponden a rocas ígneas y sedimentarias presentes en el área de tesis y transportadas desde otros lugares por los flujos que originaron estos depósitos. La matriz arenosa-lodosa que los integra está constituida, principalmente, por ceniza de color pardo grisáceo a negro.

El espesor de estos depósitos es variable, habiéndose observado un espesor máximo de 100 m en el camino Los Elotes-La Era.

Distribución

En el área de estudio se reconocen dos fuentes volcánicas de las que se derivan estos depósitos. Una de ellas es el volcán Popocatepetl, de la Sierra Nevada, para los depósitos de Valle de Vázquez-Nexpa, y otra es la zona volcánica de Zempoala, para los depósitos del río Amacuzac.

Los depósitos ubicados en las riberas del río Amacuzac se distribuyen de forma aislada y/o discontinua

formando terrazas. Las exposiciones de mayor extensión de estos depósitos se presentan al oriente de Xicatlacotla. Los depósitos del área de Valle de Vázquez-Nexpa presentan exposiciones de gran extensión ubicadas al noreste de Nexpa, en las inmediaciones de Los Elotes y al suroeste de Valle de Vázquez.

Relaciones estratigráficas

A nivel regional, estos depósitos yacen discordantemente sobre cualquiera de las unidades más antiguas (pre-cuaternarias), situación que se conserva en el área de estudio, encontrándose principalmente en contacto con las unidades cretácicas.

Edad

Los depósitos de flujos de escombros que se encuentran en el área de estudio y a nivel regional han sido vinculados a la actividad volcánica del Popocatepetl, de la Sierra Nevada, debido a que se distribuyen a lo largo de diversos valles que se originan en las laderas de dicho volcán. Tomando en cuenta esa relación, su morfología y su asociación con rocas más antiguas, se ha estimado que la edad de los flujos volcánicos derivados del Popocatepetl varía entre el Pleistoceno y el Holoceno (Siebe et al., 1995), mientras que los derivados de la zona volcánica de Zempoala son probablemente del Mioceno tardío.

Interpretación genética

La génesis de estos depósitos está asociada a diversos fenómenos, entre los más comunes figuran la fusión del hielo y la nieve frecuentemente presentes en las laderas de los volcanes, así como la precipitación pluvial asociada a una erupción volcánica. El agua producida de esa forma puede incorporar una gran cantidad de sedimentos asociados a la erupción y/o de las laderas del volcán y los cauces de los ríos, donde esta mezcla agua-sólidos puede fluir a lo largo de muchos kilómetros.

Sin embargo, existen diferencias notables en las características de estas corrientes. En la literatura se establece que su comportamiento varía de acuerdo al tipo de flujo y a los mecanismos de depósito (Fisher et al., 1984). Por una parte, los depósitos de flujos de escombros se originan a partir de una

mezcla agua-sólidos que fluye bajo un régimen laminar. Al disminuir su velocidad, la corriente entera se detiene y acto seguido el agua se separa del material granular por percolación o evaporación, dejando un depósito masivo sin estratificación. En cambio, las corrientes hiperconcentradas fluyen bajo un régimen turbulento que al disminuir su velocidad acumula los materiales progresivamente dejando un depósito con una estratificación marcada.

Las características de los depósitos de flujos de escombros del área de estudio sugieren que estos se originaron cuando estos procesos ocurrieron en los grandes estratovolcanes de la Faja Volcánica Transmexicana, muy probablemente, a partir de las erupciones cuaternarias del volcán Popocatepetl y las miocénicas de la zona volcánica de Zempoala.

III. 4. Caracterización geoquímica

Las descripciones anteriormente citadas, correspondientes a las unidades de roca presentes en el área de estudio, fueron complementadas en este trabajo con el análisis químico por Fluorescencia de Rayos X (FRX) de muestras representativas de rocas volcánicas colectadas en el área de tesis, con el propósito de caracterizar geoquímicamente a las unidades volcánicas expuestas e interpretar la génesis y la procedencia de los magmas que las originaron.

III. 4. 1. Análisis cuantitativos de elementos mayores

Los análisis cuantitativos de elementos mayores fueron realizados en 13 muestras representativas de las unidades volcánicas más importantes expuestas en el área de estudio, mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Los análisis químicos de tales muestras se llevaron a cabo mediante el procedimiento descrito en el Anexo 1 de este trabajo. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	P × C	Suma
HU1-2005	68.14	0.50	14.69	2.90	0.05	0.32	2.83	3.53	4.79	0.09	1.98	99.82
HU2-2005	66.29	0.49	14.57	2.58	0.07	0.62	3.52	2.67	5.50	0.08	3.54	99.93
HU3-2005	64.31	0.24	12.72	2.55	0.05	0.97	6.19	0.96	2.92	0.04	9.22	100.17
HU3a-2005	68.88	0.15	12.25	2.07	0.02	0.72	3.18	0.42	3.45	0.03	8.67	99.84
HU4-2005	60.16	0.88	16.21	6.07	0.07	2.79	5.73	3.09	2.76	0.15	1.99	99.90
HU190305A	64.32	0.64	16.81	4.82	0.06	1.04	4.66	4.06	2.41	0.16	0.94	99.92
HU190305B	64.51	0.69	17.09	4.87	0.09	0.73	4.22	3.87	2.42	0.15	1.32	99.96
HU190305C	67.32	0.31	15.66	2.64	0.03	0.84	4.25	3.31	1.74	0.07	3.74	99.91
HU0204A	71.87	0.18	13.39	1.73	0.05	0.39	1.58	3.12	3.93	0.05	3.89	100.18
HU190305D-bis	59.50	0.89	17.20	6.18	0.07	2.30	6.61	3.55	1.71	0.30	1.60	99.91
HU10	60.02	0.88	17.21	6.44	0.05	2.10	6.32	3.33	1.73	0.26	1.70	100.04
HU11	60.15	0.88	17.21	6.44	0.05	2.10	6.32	3.33	1.73	0.26	1.70	100.17
HU12	58.34	0.92	16.66	6.64	0.09	2.79	6.11	3.33	2.18	0.21	1.68	98.95

Tabla 1. Análisis cuantitativos de elementos mayores por Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizados en 13 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (las cifras indican el porcentaje en peso de cada compuesto)

Los resultados obtenidos de los análisis de elementos mayores por FRX permitieron realizar la

caracterización geoquímica de las muestras seleccionadas, mediante su representación en un diagrama TAS (LeBas et al., 1986). En este diagrama de Sílice vs. Álcalis (Figura 8), las muestras se ubican en la serie subalcalina con composición intermedia-silícica. Entre las muestras de la Toba Chinameca (HU1-2005, HU2-2005, HU3-2005, HU3a-2005 y HU190305C) existe una relativa dispersión entre los grupos de la traquidacita, dacita y riolita, lo cual puede interpretarse en términos de probables removilizaciones del K y Na por fluidos que actuaron después del emplazamiento de las ignimbritas. Por otra parte, las rocas de la Andesita Chimalacatlán (HU4-2005, HU190305D-bis, HU10, HU11 y HU12) se ubican en el grupo de la andesita, la del Complejo Volcánico Huautla (HU0204A) en el grupo de la riolita y las de la Formación Cerro Frío (HU190305A y HU190305B) en el grupo de la dacita.

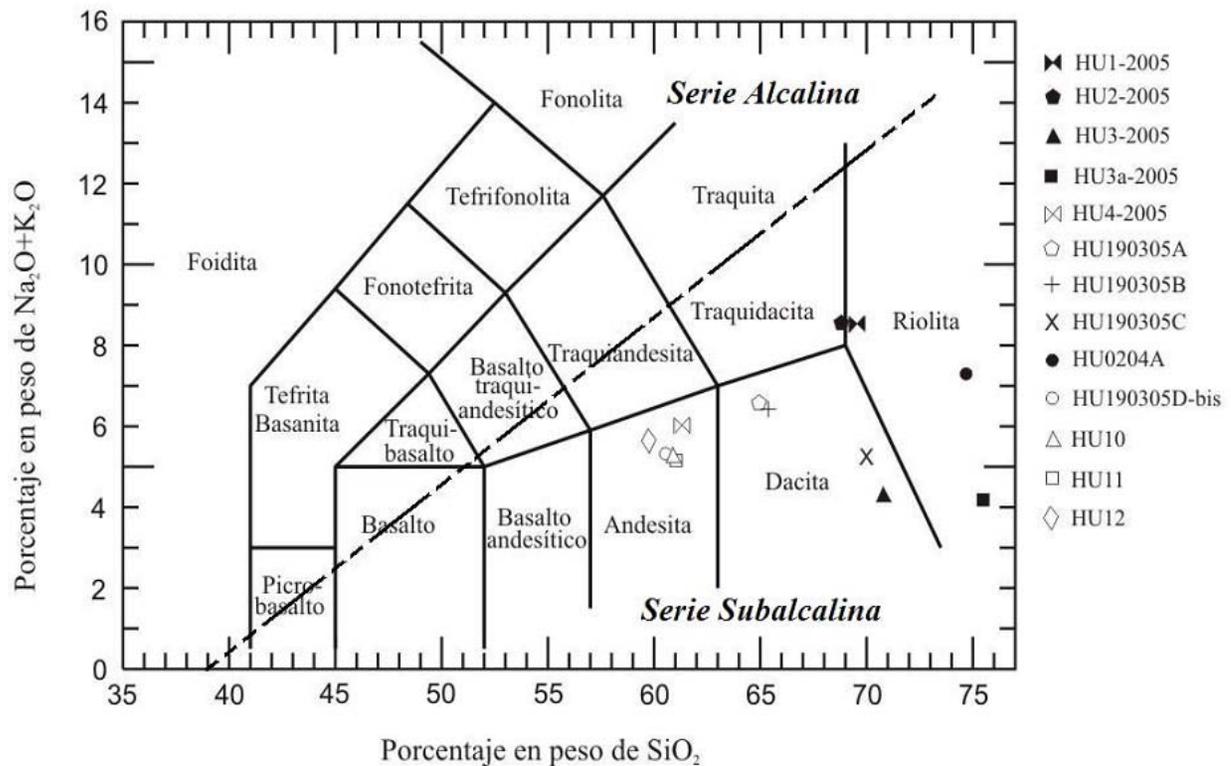


Figura 8. Caracterización geoquímica de 13 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio

III. 4. 2. Análisis cuantitativos de elementos traza

Después de realizar los estudios descritos anteriormente, se seleccionaron cuatro muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio para efectuar en ellas el análisis cuantitativo de elementos

traza mediante la técnica ICP MS (espectrometría de plasma inductivamente acoplada) y de Fluorescencia de Rayos X (FRX). La selección de estas se hizo tratando de buscar las muestras menos evolucionadas para conocer algunos detalles sobre la fuente y proceso de origen. La elaboración de estos análisis se describe más detalladamente en el Anexo 2 de este trabajo y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

	HU4-2005	HU190305A	HU190305B	HU190305D
Rb	106.29	61.74	48.87	28.19
Sr	302.83	439.85	400.90	1017.60
Ba	527.77	642.30	613.51	526.27
Y	31.38	19.05	19.21	24.31
Zr	130.00	165.00	151.00	180.00
Nb	9.36	6.09	6.67	5.50
V	136.91	95.42	40.52	94.58
Cr	35.76	38.67	23.26	26.45
Co	14.35	11.04	11.68	12.85
Ni	27.46	26.92	21.48	30.52
Cu	5.00	25.00	11.00	12.00
Zn	68.46	109.12	73.03	71.99
Th	10.87	3.87	5.06	2.48
Pb	23.11	7.85	8.82	20.94
U	3.07	1.35	1.09	0.63
Be	1.41	1.20	0.99	1.06
Sc	15.99	8.13	9.38	11.46
Ga	18.03	17.35	18.30	19.67
Mo	1.16	1.22	0.21	0.39
Sn	2.22	1.32	1.14	0.84
Cs	6.09	3.45	0.79	1.68
Lu	0.48	0.27	0.24	0.29
Hf	6.20	4.31	3.06	2.31
Ta	0.62	0.52	0.61	0.42

Tabla 2. Análisis cuantitativos de elementos traza por ICP MS y Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizados en 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (cifras en partes por millón [ppm] de cada elemento)

Este trabajo también incluye los análisis cuantitativos de Tierras Raras por ICP MS realizados a las

cuatro muestras de la serie HU-05 referidas en la tabla anterior, normalizados respecto a la abundancia de cada uno de estos elementos en el MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt), de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

	HU4-2005	HU190305A	HU190305B	HU190305D
La	109.1	85.7	89.4	113.2
Ce	88.7	64.1	72.3	84.9
Pr	69.7	52.1	56.8	73.9
Nd	56.5	43.7	47.5	62.9
Sm	37.1	28.3	30.6	38.6
Eu	22.5	20.0	21.0	30.3
Gd	27.5	19.3	21.2	25.3
Tb	24.7	16.6	17.8	20.6
Dy	19.7	12.4	13.0	15.4
Ho	18.2	10.8	11.2	13.5
Er	17.9	10.2	10.3	12.6
Tm	16.6	9.4	9.4	11.0
Yb	17.8	9.9	9.5	11.3

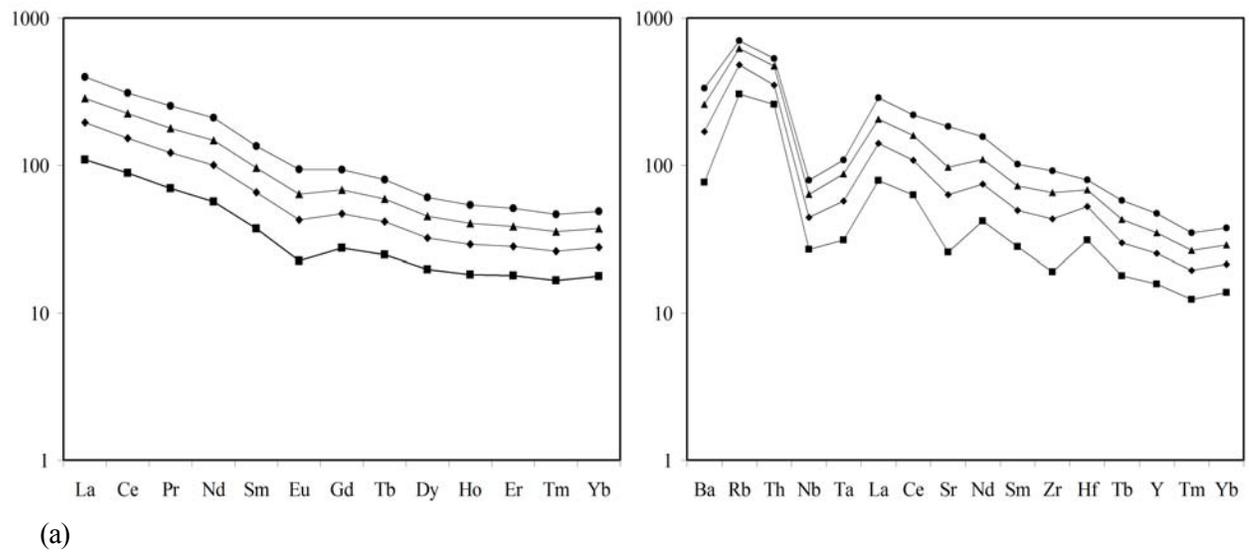
Tabla 3. Análisis cuantitativos de Tierras Raras por ICP MS realizados en 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio (cifras en partes por millón [ppm] de cada elemento, normalizadas respecto al MORB de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S., 1995)

Los resultados obtenidos se utilizaron en la elaboración de diagramas de variación química que permitieran hacer inferencias sobre la génesis y la procedencia de los magmas que dieron origen a las rocas volcánicas expuestas en el área de estudio, correspondientes a la Andesita Chimalacatlán, a partir de la comparación de la representación gráfica de dichos resultados normalizados respecto al MORB, de acuerdo a los valores de McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995).

En un primer diagrama (Figura 9a) se graficaron los valores normalizados de la concentración de Tierras Raras en las muestras seleccionadas. Las curvas de Tierras Raras indican un enriquecimiento de Tierras Raras ligeras con respecto a las pesadas, lo que es típico de este tipo de ambientes de arco. Existe una correlación entre las abundancias de Tierras Raras y de SiO₂, lo que indica que el enriquecimiento se dio principalmente por cristalización fraccionada. Se observa que estas rocas volcánicas presentan una muy ligera anomalía negativa de europio que indica el fraccionamiento de

plagioclasa o equilibrio con una fuente del manto portadora de plagioclasa. Adicionalmente, la actitud plana del patrón de Tierras Raras pesadas sugiere una fuente con poco o nada de granate.

La segunda representación gráfica (Figura 9b) muestra la concentración normalizada de diversos elementos traza respecto a los valores del MORB, de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995). La presencia de anomalías negativas de Nb y Ta sugiere que las rocas de la Andesita Chimalacatlán corresponden a un ambiente de subducción. Existe la posibilidad de que dichas anomalías sean resultado de la asimilación de corteza continental, sin embargo, el hecho de que las anomalías más pronunciadas se manifiesten dentro de las rocas de menor contenido de sílice indica que dicha posibilidad es baja.



(b)

■ HU4-2005 ◆ HU190305A ▲ HU190305B ◆ HU190305D

Figura 9. Diagramas de variación química elaborados a partir del análisis cuantitativo de elementos traza mediante la técnica de ICP MS de 4 muestras de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio.

- (a) Concentración normalizada de Tierras Raras respecto al MORB, de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995). (b) Concentración normalizada de diversos elementos traza con respecto al MORB, de acuerdo a McDonough, W. F. y Sun, S. S. (1995)

CAPÍTULO IV

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las unidades litoestratigráficas expuestas en el área de estudio despliegan contrastes en cuanto al tipo y orientación de las estructuras tectónicas que las afectan. Además de las estructuras cenozoicas, la secuencia cretácica está afectada principalmente por pliegues que varían en estilo de acuerdo al tipo de litología y también por estructuras diapíricas relacionadas con los cuerpos de anhidrita. Las estructuras cenozoicas consisten principalmente de fallas con algunas variaciones en la cinemática y orientación.

IV. 1. Pliegues en la secuencia cretácica

Las rocas cretácicas del área de estudio presentan diversas estructuras de acortamiento que han sido reportadas en trabajos cartográficos previos (INEGI, 1980, CRM, 1998) y que se identifican con claridad en las fotografías aéreas de la región. Debido a su extensión en el área de estudio y a la dificultad de acceso a algunas áreas donde están expuestas las capas deformadas, algunas de las estructuras cretácicas reportadas en este trabajo se reconocieron a través del análisis de las fotografías aéreas de la zona.

Las unidades de la secuencia cretácica del área de estudio están afectadas por una serie de anticlinales y sinclinales con orientación general NW-SE y NE-SW y amplitudes que varían de escala kilométrica a métrica. Una de las estructuras de mayor escala es un anticlinal abierto expresado en capas de la Formación Morelos y orientado al N42°W, con buzamiento en la misma dirección. Constituye una larga serranía al poniente de San Juan Teocaltzingo, denominada como cerro El Chautle. Este anticlinal ya había sido reportado en el mapa 1:250,000 del Consejo de Recursos Minerales.

Otras estructuras de acortamiento notables se ubican en la porción septentrional del área de estudio, desde los alrededores de Xicatlacotla hasta las inmediaciones de Valle de Vázquez y desde el límite norte del área de tesis hasta la latitud de Huixastla. En esta zona se presentan afloramientos discontinuos de las formaciones Morelos y Mezcala en un arreglo de anticlinales y sinclinales con una orientación general al NW.

Dentro de los antecedentes cartográficos del área de estudio (INEGI, 1980, CRM, 1998) se estableció

la existencia de un anticlinal asimétrico al NE con una orientación al NW, cuya terminación austral está incluida en el área de estudio, al norte de Nexpa. Debido a la dificultad de acceso a esta zona, en este trabajo únicamente se analizó dicha estructura en el estudio fotogeológico de ese sector.

Las rocas carbonatadas de la Formación Morelos también se encuentran deformadas por el emplazamiento de cuerpos diapíricos pertenecientes al miembro basal de esta unidad, denominado como Anhidrita Huitzucó (Fries, 1960, De Cserna et al., 1980). Donde esta situación se presenta es posible observar una gran cantidad de estructuras disarmónicas descritas como pliegues de arrastre en trabajos cartográficos previos (CRM, 1998). Esta relación se observa con claridad en las cercanías de Coaxitlán y Tlalchichila, y permanece hacia el sur fuera del área de estudio (CRM, 1998).

Entre las estructuras de escala métrica desarrolladas en las rocas carbonatadas de la Formación Morelos es común observar pliegues de arrastre y pliegues cerrados.

Las mejores exposiciones de los rasgos de deformación contráctil en la secuencia siliciclástica de la Formación Mezcala se observan con claridad a lo largo de los caminos Jojutla-Valle de Vázquez y La Era-Huixastla, donde se encuentra expuesta una amplia gama de estructuras de acortamiento de escala métrica como pliegues suaves a apretados, pliegues de arrastre, pliegues tipo chevron y algunos pliegues recumbentes.

IV. 2. Fallas en las unidades cretácicas

Las rocas que integran a la secuencia cretácica expuesta en el área de estudio también se encuentran afectadas por fallas laterales e inversas de escala kilométrica que involucran a toda la secuencia expuesta en el área de tesis, en el caso de las fallas laterales, y que ponen en contacto a las rocas cretácicas de las formaciones Morelos y Mezcala, en el caso de las fallas inversas.

Al occidente de Valle de Vázquez se encuentran una falla lateral de orientación N21°W, 90° que pone en contacto a las rocas carbonatadas de la Formación Morelos con el conglomerado de calizas del Grupo Balsas y una falla lateral de orientación N84°W, 90° desarrollada en las rocas de las formaciones Morelos y Mezcala. Presentan una zona de falla de 5 a 8 m de ancho con material

finamente molido. El sentido de desplazamiento no pudo determinarse.

Al poniente de Valle de Vázquez también se observa una falla inversa de orientación N29°W, 18° que involucra a las rocas carbonatadas de la Formación Morelos. Presenta material finamente molido con un espesor aproximado de 20 cm.

En el camino Los Elotes-Huixtla se encuentra una falla inversa de orientación N23°E, 17° que pone en contacto a la Formación Mezcala sobre la Formación Morelos. Presenta material finamente molido con un espesor aproximado de 15 cm.

IV. 3. Estructuras cenozoicas

Las unidades cenozoicas del área de estudio presentan fallas laterales y normales que muestran dos tendencias principales, una con orientación preferencial este-oeste para las unidades del Cenozoico temprano-Cenozoico medio y otra orientada de norte a sur para las unidades del Cenozoico medio. Estos sistemas de fallamiento también involucran a las unidades cretácicas expuestas en el área de tesis.

Dentro de los trabajos cartográficos precedentes (CRM, 1998) se reportan diversos lineamientos y curvilineamientos que afectan a la secuencia cenozoica expuesta en el área de estudio. La existencia de algunas de estas estructuras fue comprobada en campo y sus características estructurales se reportan en este apartado, sin embargo, otras no pudieron ser documentadas debido a la dificultad de acceso a sus exposiciones, por lo que en este trabajo se reconocieron durante el análisis de las fotografías aéreas.

En su evaluación geológica-minera del Distrito Minero de Huautla, el CRM (2000) reporta la existencia de tres periodos de fallamiento en las rocas agrupadas en este trabajo dentro del Complejo Volcánico Huautla, dos de ellos con una orientación preferencial norte-sur y otro orientado de poniente a oriente.

Una de las estructuras cenozoicas más sobresalientes del área de estudio, nombrada en este trabajo como Falla Las Minas, está ubicada aproximadamente a media distancia entre Chimalacatlán y San

Juan Teocaltzingo, y pudo ser observada tanto en las fotografías aéreas de la zona como en el campo. El lineamiento se extiende por unos cinco kilómetros con una orientación preferencial N-S (Figura 10), cortando a las rocas del Complejo Volcánico Huautla, desde el noreste de San Juan Teocaltzingo. Durante la verificación de campo se observó que esta falla afecta a las rocas del Complejo Volcánico Huautla, pero en los sectores visitados no corta a los derrames superiores de la Andesita Chimalacatlán, aunque el lineamiento parece controlar el lineamiento norte-sur en los arroyos.

Mediante el análisis de los trabajos cartográficos regionales, del mosaico de fotografías aéreas de la región y de una imagen de satélite a nivel regional, pudo inferirse la presencia de un curvilineamiento de escala regional con exposiciones discontinuas, entre las cuales se encuentra la Falla Las Minas, y que puede corresponder al límite de una estructura volcánica de dimensiones kilométricas, ubicada hacia el oriente del área de tesis, probablemente una estructura semejante a la vecina Caldera de Tilzapotla, reconocida por Morán-Zenteno et al. (2004).

Al noreste de San Juan Teocaltzingo, en la ribera oriente del río Amacuzac, se tomaron los datos estructurales de una veta de cuarzo hidrotermal de aproximadamente 3 m de espesor, emplazada en rocas volcánicas del Complejo Volcánico Huautla afalladas por la Falla Las Minas, donde además se identificaron dos obras mineras desarrolladas en dicha estructura. En la primera de ellas, nombrada en este trabajo como Mina Chica, la veta de cuarzo presenta una actitud $N13^{\circ}W$, 62° al SW, habiéndose observado la presencia de estrías con un pitch de 75° al N en planos de falla paralelos al rumbo regional de la estructura, desarrollados en rocas lávicas del Complejo Volcánico Huautla. En una obra minera de mayores dimensiones, ubicada a unos 300 metros al sur de la anterior, nombrada en este trabajo como Mina El Guano, se observó un espesor aproximado de 3 m de una veta de cuarzo que en ese lugar presenta una actitud $N22^{\circ}W$, 60° al SW, mientras que los planos de falla paralelos, desarrollados en rocas volcánicas del Complejo Volcánico Huautla, muestran estrías con un pitch de 80° al N. Al norte de estas obras mineras se tomó otro dato estructural de la Falla Las Minas, expresada en planos de falla desarrollados en rocas lávicas del Complejo Volcánico Huautla con una actitud $N04^{\circ}W$, 67° al SW, y estrías con un pitch de 81° al N.

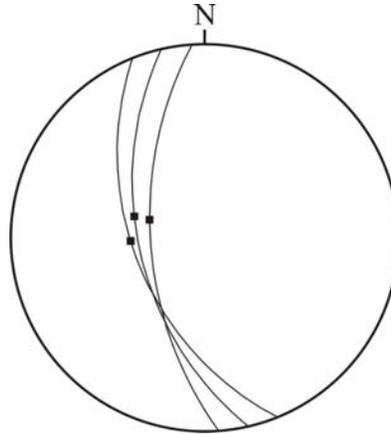


Figura 10. Estereodiagrama de la falla normal 'Las Minas',
 área de San Juan Teocaltzingo-Chimalacatlán

Otra estructura cenozoica notable se presenta a lo largo del camino Valle de Vázquez-Chimalacatlán, donde se observan numerosas exposiciones de una zona de falla de espesor variable entre 5 y 12 m, aproximadamente, con una orientación general norte-sur (Figura 11), con numerosos planos de falla paralelos de menor magnitud. Esta estructura, denominada en este trabajo con el nombre de Falla Los Hornos, se aloja en rocas de la Andesita Chimalacatlán, caracterizándose por la presencia de material finamente molido, vetas de cuarzo hidrotermal y evidencias de alteración hidrotermal, sin presentar una expresión fotogeológica clara. Esto, aunado a la discontinuidad de sus afloramientos, hace difícil trazar esta estructura de forma continua en el mapa geológico del área de estudio, por lo que la mayoría de sus características fueron inferidas a partir de los afloramientos estudiados en campo.

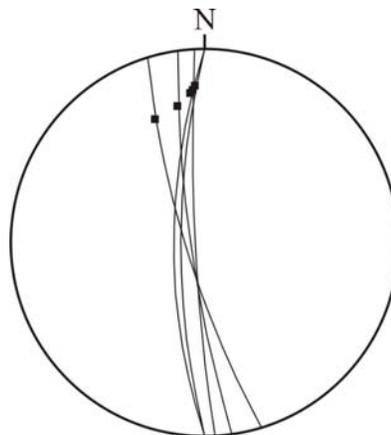


Figura 11. Estereodiagrama de la falla lateral 'Los Hornos',
 área de Chimalacatlán-Valle de Vázquez

Por otra parte, las rocas de la Dacita Agua Fría presentan un patrón de fallamiento con una orientación preferencial E-W, variable al NW y al SW. En el camino Quilamula-San José de Pala se presentan varios planos de falla discretos desarrollados en las rocas de esta unidad, en los cuales se observan estrías horizontales que no permitieron determinar el sentido del movimiento con claridad.

De igual forma, las estructuras cenozoicas que afectan a las rocas piroclásticas de la Toba Chinameca presentan una orientación preferencial E-W. La estructura más sobresaliente desarrollada en esta unidad se ubica en las inmediaciones de Valle de Vázquez, sobre el camino que lleva de ese poblado a Quilamula, donde se observa una zona de falla de aproximadamente 20 m de espesor alrededor de la cual se han desarrollado grandes planos de falla en los flujos piroclásticos que constituyen a la Toba Chinameca. Los planos desarrollados paralelamente a la zona de falla presentan una orientación preferencial E-W y una inclinación general de 80° , estrías que permitieron determinar un sentido de movimiento lateral derecho y que, en promedio, poseen un pitch de 15° al norte. Esta zona de falla no posee una expresión clara en las fotografías aéreas.

El sistema de fallamiento este-oeste que afecta a las rocas expuestas en el área de tesis no exhibe otros rasgos notables dentro del área de estudio. Sin embargo, al noreste del área de tesis, Díaz-Bravo (2005) reporta estructuras orientadas según este sistema. Algunos datos estructurales tomados en campo del sistema de fallamiento este-oeste del área de estudio se muestran en el estereodiagrama de la Figura 12.

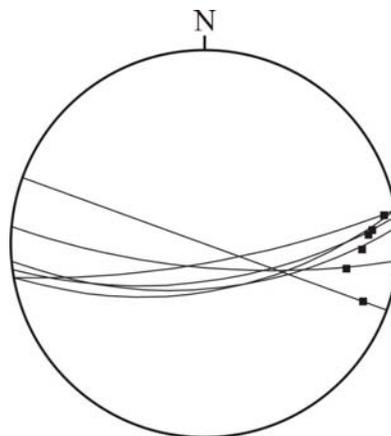


Figura 12. Estereodiagrama de las fallas laterales del sistema este-oeste, área de Quilamula-Valle de Vázquez

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El registro estratigráfico expuesto en el área de estudio representa el desarrollo de episodios de sedimentación marina ocurridos en el Cretácico y episodios de depósito y volcanismo continentales terciarios. Estos episodios concuerdan con aspectos generales de la evolución geológica de la Sierra Madre del Sur, aunque en el área de tesis se manifiestan algunas particularidades significativas, principalmente en la estratigrafía del Terciario.

La unidad más antigua del registro estratigráfico expuesto en el área de estudio está integrada por un cuerpo de anhidrita y por rocas carbonatadas que revelan una historia de depósito en una plataforma marina somera. Sin embargo, a nivel regional existe incertidumbre sobre la posición de la anhidrita dentro de esta secuencia. No obstante, en el área de estudio se observan afloramientos de esta unidad de anhidrita emplazada por diapirismo en rocas carbonatadas identificadas como parte de la Formación Morelos, razón por la cual se considera en este trabajo a la unidad de anhidrita como un cuerpo anterior o contemporáneo a la base de la Formación Morelos, y por lo tanto como parte de la denominada Anhidrita Huitzucó, descrita por Fries (1960) y De Cserna et al. (1980). En un análisis posterior de la Anhidrita Huitzucó a nivel regional, De Cserna et al. (1980) establecen que esta unidad se originó en pequeñas cuencas con alta evaporación y mencionan, además, un cambio transicional de las evaporitas a las rocas carbonatadas de la Formación Morelos durante el Cretácico medio.

Las rocas más jóvenes del registro mesozoico expuesto en el área de estudio revelan la ocurrencia de un cambio transicional de sedimentación carbonatada a siliciclástica durante el Cretácico tardío. A nivel regional, las últimas manifestaciones del depósito de estos sedimentos siliciclásticos ocurrieron de forma contemporánea con un evento orogénico que se desarrolló durante el Cretácico tardío-Paleoceno (Orogenia Laramide). Esta orogenia causó una fuerte deformación por acortamiento que involucró a toda la secuencia mesozoica expuesta en el área de tesis. Esta deformación consistió principalmente en un acortamiento cercano a la dirección este-oeste y se expresa en la presencia de una serie de anticlinales y sinclinales de escala variable, pliegues suaves a apretados, pliegues de arrastre, pliegues tipo chevron y algunos pliegues recumbentes, dependiendo de la competencia de la unidad deformada. Estas estructuras de acortamiento exhiben rasgos generales que coinciden con las características de los pliegues que se presentan en las formaciones cretácicas a nivel regional.

La unidad más antigua del registro cenozoico del área de estudio revela la ocurrencia de los primeros episodios de sedimentación continental después de una larga historia marina en la región. Este cambio en las condiciones de depósito se manifiesta en la presencia de conglomerados calcáreos del Paleógeno derivados de la erosión de las secuencias sedimentarias cretácicas del área de tesis, principalmente de la Formación Morelos, probablemente depositados en ambientes de abanico aluvial en forma de flujos de gravedad. Estos depósitos poseen rasgos generales muy similares a los que regionalmente se establecen para el Grupo Balsas, sin embargo, los depósitos de esta unidad en el área de estudio presentan algunas particularidades, como la ausencia de clastos de rocas volcánicas.

No existen indicios de un fallamiento activo durante el depósito de los conglomerados del Grupo Balsas. Las observaciones realizadas por Díaz-Bravo (2005) al noreste del área de estudio revelan la presencia de una secuencia fina limolítica que subyace transicionalmente a conglomerados gruesos generalmente matriz soportados. La presencia de intercalaciones tobáceas en la secuencia sugiere que este cambio en la energía pudo haberse producido por un evento tectonomagmático de tumescencia en la zona de la actual Sierra de Huautla más que por un fallamiento contemporáneo que produjera contrastes en el relieve. Este tipo de cambios en la energía de depósito inmediatamente anteriores al desarrollo de un gran centro volcánico silícico han sido también documentados en la zona de Amacuzac (Monter-Ramírez, 2004), aledaña a la Caldera de Tilzapotla.

En el área de tesis, las secuencias sedimentarias del Cretácico-Terciario temprano se encuentran cubiertas por una secuencia volcánica que atestigua un evento magmático en el Eoceno tardío-Oligoceno temprano. La secuencia corresponde a las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur, definidas por Morán-Zenteno et al. (1999) como un cinturón volcánico con una orientación general noroeste-sureste y una tendencia geoquímica subalcalina. En la Plataforma Guerrero-Morelos, este episodio volcánico se encuentra representado por ignimbritas, riolitas y productos de campos volcánicos distribuidos ampliamente en la región, además de algunos cuerpos intrusivos. Las rocas más representativas de esta unidad en el área de estudio son extensas secuencias de ignimbritas de color verde, blanco y rosa, moderadamente soldadas y con fenocristales de plagioclasa y biotita, escasos domos riolíticos y cuerpos hipabisales, además de abundantes derrames de composición andesítica-dacítica. Generalmente, estas rocas volcánicas se encuentran discordantemente sobre los sedimentos continentales del Grupo Balsas.

Una de las primeras manifestaciones del magmatismo terciario de la región está representada en el área de estudio por la presencia de un cuerpo intrusivo de composición diorítica emplazado en las rocas carbonatadas de la Formación Morelos, en la ladera del cerro El Chautle. En este trabajo no se hizo énfasis en el análisis de este cuerpo intrusivo, por lo que se consideran necesarios estudios más detallados de este plutón que develen su origen y las características de su emplazamiento.

La fuente de la secuencia de ignimbritas no pudo precisarse en este estudio. Sin embargo, la mayoría de los flujos piroclásticos y depósitos de caída que constituyen esta secuencia, salvo los flujos inferiores vitrocrystalinos de color rosa con biotita, se distinguen de productos volcánicos similares derivados de la Caldera de Tilzapotla y se consideran más jóvenes que la Ignimbrita Tilzapotla (Moran-Zenteno et al., 2004). En el área de Cuahuilotla existen flujos piroclásticos constituidos por pómez de tamaño muy grande, hasta 30 cm de diámetro, que sugieren una fuente cercana.

En un estudio enfocado a la estratigrafía de la región de Jolalpan-Huehuetlán (Puebla), Ramírez Pérez-Amaya (2005) reporta ignimbritas vitrocrystalinas similares a las de la base de la Toba Chinameca que presentan rasgos de reomorfismo y espesor considerable, lo que parece poco compatible con su fuente en la Caldera de Tilzapotla. Estas ignimbritas arrojaron una edad de K-Ar de 31 Ma. Al sur de la Sierra de Huautla, Campa-Uranga et al. (2002) reportaron edades de K-Ar en ignimbritas silíceas de 31 Ma y 34.2 Ma. Aunque estas edades coinciden con las obtenidas por el grupo de investigación responsable de este proyecto en la porción oriental de la Sierra de Huautla y con la Ignimbrita Tilzapotla, su fuente y sus características petrológicas se desconocen.

La intensidad de la actividad volcánica terciaria en el área de estudio también se manifiesta en la presencia de importantes secuencias de rocas lávicas y piroclásticas de composición silícea-intermedia que yacen sobre la Toba Chinameca. En estas secuencias se advierte un cambio importante en las características de los productos que las constituyen, variando de rocas lávicas silíceas para la unidad más antigua (Dacita Agua Fría), a derrames de composición intermedia para las secuencias más recientes (Andesita Chimalacatlán).

En el caso de la Dacita Agua Fría, se observó que las rocas que la integran están asociadas a la actividad de conductos volcánicos silíceos ubicados desde el límite noreste del área de estudio hacia el

noreste, fuera del área de estudio. En esta última zona, y como parte del mismo proyecto de investigación en el que se enmarca la presente tesis, Díaz-Bravo (2005) identificó una estructura circular a la cual están asociadas la mayor parte de las exposiciones de la Dacita Agua Fría.

Los cuerpos subvolcánicos y derrames lávicos del Complejo Volcánico Huautla indican la presencia de un centro volcánico de grandes dimensiones que abarca la parte oriental del área del presente estudio. A este centro volcánico estuvieron asociados procesos hidrotermales cuyas evidencias se extienden ampliamente alrededor de la localidad de Huautla y se reconocen también en el área de estudio. Por otra parte, se aprecia que las rocas que constituyen a la Andesita Chimalacatlán están asociadas a un volcanismo de tipo fisural cuya fuente principal se ubica en la serranía del Cerro Frío, al oriente de Chimalacatlán, relacionada también con los cuerpos hipabisales y domos volcánicos que se asocian a la Formación Cerro Frío.

Los resultados de los análisis cuantitativos de elementos traza realizados en muestras representativas de las unidades volcánicas más importantes expuestas en el área de estudio, indican que se derivan de magmas de un ambiente de arco en los que el enriquecimiento se dio principalmente por cristalización fraccionada. El grado de asimilación cortical no pudo ser evaluado por la falta de análisis isotópicos de estas unidades.

Entre las estructuras tectónicas desarrolladas en estas unidades cenozoicas figura como una de las más importantes la nombrada en este trabajo como Falla Las Minas, reportada por el INEGI (1980) como una falla normal con una orientación N-S y una longitud aproximada de 10 km. En el área de estudio, esta estructura posee una orientación principal N-S e indicadores cinemáticos de un desplazamiento normal, presenta una expresión clara en las rocas del Complejo Volcánico Huautla y parece afectar los derrames inferiores de la Andesita Chimalacatlán, aunque esta relación no pudo observarse en el área de tesis.

Una zona de cizalla cenozoica notable es la llamada Falla Los Hornos, que presenta una orientación preferencial N-S y está formada por numerosas zonas de falla de 5 a 12 m de espesor con alteración hidrotermal. Muestra indicios de una historia cinemática compleja, aunque el desplazamiento más evidente es lateral, probablemente activa durante el Oligoceno-Mioceno. Esta estructura no presenta antecedentes en los trabajos cartográficos previos que incluyen al área de estudio (INEGI, 1980,

CRM, 1998) y se describe por primera vez en este trabajo.

Al término del emplazamiento de estas secuencias volcánicas, establecido en este trabajo en el Oligoceno medio-Oligoceno tardío, se registra una interrupción de la actividad volcánica identificada por la ausencia de unidades del Neógeno en el área de estudio, que corresponde con los rasgos generales de la evolución geológica de esta parte del sur de México, concretamente, con la transición de la Sierra Madre del Sur (SMS) a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), establecida formalmente en el Mioceno medio (Ferrari-Pedraglio et al., 1999).

Entre las unidades más jóvenes del registro estratigráfico del área de estudio se reconocen diversos depósitos de flujos de escombros asociados a la actividad volcánica cuaternaria del volcán Popocatepetl, de la Sierra Nevada y de la zona volcánica de Zempoala, distribuidos a lo largo de las riberas del río Amacuzac y en el área de Nexpa-Valle de Vázquez. Además, existen numerosos depósitos aluviales recientes acumulados sobre superficies de erosión desarrolladas en todas las unidades expuestas en el área de tesis. En estas unidades es notable la ausencia de estructuras tectónicas.

Las características del registro estratigráfico del Terciario y los rasgos estructurales del área de estudio y a nivel regional indican que el emplazamiento de las ignimbritas de la Toba Chinameca y las rocas lávicas e hipabisales del Complejo Volcánico Huautla están asociadas a la evolución de una estructura volcánica de escala kilométrica, probablemente semejante a la Caldera de Tilzapotla (Morán-Zenteno et al., 2004), por lo que se considera necesario el desarrollo de trabajos más detallados que permitan comprender con mayor precisión la evolución volcánica terciaria de este centro volcánico.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera-Franco, N., 2003, **Cenomanian-Coniacian zonation (foraminifers and calcareous algae) in the Guerrero-Morelos basin, southern Mexico**: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 20, 3, 202-222.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L., 2002, **Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico**: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118, 1-14.
- Alba-Aldave, L. A., Reyes-Salas, M., Morán-Zenteno, D. J., Ángeles-García, S., Corona-Esquivel, R., 1996, **Geoquímica de las rocas terciarias de la región de Taxco-Huautla**: VI Congreso Nacional de Geoquímica, Actas del Instituto Nacional de Geoquímica, 2, 39-44.
- Álvarez, M. Jr., 1961, **Provincias fisiográficas de la Republica Mexicana**: Sociedad Geológica Mexicana, 24, 2, 65-67.
- Campa-Uranga, M. F., Oviedo, R., Tardy, M., 1976, **La cabalgadura laramídica del dominio volcano-sedimentario (Arco de alisitos-Teloloapan) sobre el miogeosinclinal mexicano en los límites de los estados de Guerrero y México**: III Congreso Latino-Americano de Geología, México, 23.
- Campa-Uranga, M. F., Ramírez-Espinosa, J., 1979, **La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero**: Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnica Científica 1, 100.
- Campa-Uranga, M. F., Coney, P. J., 1983, **Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico**: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1040-1051.
- Campa-Uranga, M. F., 1998, **Una orogenia miocénica en el sur de México**: En, Alaniz-Álvarez, S. A., Ferrari-Pedraglio, L., Nieto-Samaniego, A. F., Ángel-Francisco, Ortega-Rivera, Ma. Amabel Editores, Libro de resúmenes, México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, Instituto Nacional de Geoquímica, Sociedad Mexicana de Geomorfología, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, 21 al 25 de septiembre de 1998, 137.
- Campa-Uranga, M. F., Fitz-Díaz, E., Martínez-Hernández, E., 2002, **Revisión de la edad de la Formación Oapan y su significado en el graben de San Agustín Oapan y el sinclinatorio de Zacango, Estado de Guerrero**: XII Congreso Nacional de Geoquímica, Actas del Instituto Nacional de Geoquímica, 8, 165.
- Cas, R. A. F., Wright, J. V., 1988, **Volcanic successions, modern and ancient**: Chapman & Hall, 528.
- Centeno-García, E., 1988, **Evolución estructural de la Falla de Oaxaca durante el Cenozoico**: Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Cerca-Martínez, M., 2004, **Deformación y magmatismo Cretácico tardío-Terciario temprano en**

- la zona de la Plataforma Guerrero-Morelos:** Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, 175.
- Consejo de Recursos Minerales, 1998, **Mapa geológico-minero de la Hoja Cuernavaca, Escala 1:250,000 (E14-5):** Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.
- Consejo de Recursos Minerales, 1999, **Monografía geológico-minera del Estado de Guerrero:** Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.
- Consejo de Recursos Minerales, 2000, **Monografía geológico-minera del Estado de Morelos:** Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.
- Cserna, Z. De, Ortega-Gutiérrez, F., Palacios-Nieto, M., 1980, **Libro guía de la excursión geológica a la parte central de la Cuenca del Alto Río Balsas, estados de Guerrero y Puebla:** Sociedad Geológica Mexicana, 58.
- Cserna, Z. De, Fries, C. Jr., 1981, **Hoja Cuernavaca 14Q-h(5), con resumen de la Hoja Cuernavaca, estados de Guerrero, México y Morelos:** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Cserna, Z. De, Fries, C. Jr., 1981, **Hoja Taxco 14Q-h(7), con resumen de la Hoja Taxco, estados de Guerrero, México y Morelos:** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Cserna, Z. De, 1982, **Hoja Tejupilco 14Q-g(9), con resumen de la Hoja Tejupilco, estados de Guerrero, México y Michoacán:** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Díaz-Bravo, B., 2005, **Estratigrafía volcánica de la porción norte de la Sierra de Huautla:** Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Erben, H. K., 1956, **Estratigrafía a lo largo de la carretera entre México, D.F. y Tlaxiaco, Oax., con particular referencia a ciertas áreas de los estados de Puebla, Guerrero y Oaxaca:** XX Congreso Geológico Internacional, Excursión A-12, 11-36.
- Ferrari-Pedraglio, L., López-Martínez M., Aguirre-Díaz G., Carrasco-Núñez G., 1999, **Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt:** *Geology*, 27, 303-306.
- Ferrari-Pedraglio, L., 2000, **Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década:** *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 1, 84-92.
- Ferrari-Pedraglio, L., López-Martínez, M., Rosas-Elguera, J., 2002, **Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate:** *Tectonics*, 21, 4, 24.
- Fisher, R. V., Schmincke, H. U., 1984, **Pyroclastic rocks:** Springer-Verlag, 472.

- Fitz-Díaz, E., 2001, **Evolución estructural del sinclinorio de Zacango en el límite oriental de la Plataforma Guerrero-Morelos**: Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, 104.
- Fries, C. Jr., 1960, **Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México**: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 60, 236.
- Fries, C. Jr., 1965, 1966, **Hoja Cuernavaca 14Q-h(8), con resumen de la geología de la Hoja Cuernavaca, estados de Guerrero, México y Morelos**: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie de 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- González-Torres, E. A., Ramírez-Pérez, E., Morán-Zenteno, D. J., Martiny-Kramer, B., Solé-Viñas, J., 2004, **Rasgos estratigráficos principales del Campo Volcánico de Huautla, Morelos, y su significado en el contexto geológico regional**: Libro de resúmenes, IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, 31 de octubre al 5 de noviembre de 2004, Querétaro, México, 338.
- Hedberg, H. D., **Guía estratigráfica internacional**: Reverte, 205.
- Hernández-Romano, U., Aguilera-Franco, N., Martínez-Medrano, M., Barceló-Duarte, J., 1997, **Guerrero-Morelos Platform drowning in the Cenomanian-Turonian boundary, Huitziltepec area, Guerrero State, Southern Mexico**: Cretac. Res. 18, 661–668.
- Hernández-Romano, U., 1999, **Facies, stratigraphy and diagenesis of the Cenomanian-Turonian of the Guerrero-Morelos Platform, southern Mexico**: Ph. D. Thesis, University of Reading, Postgraduate Research Institute for Sedimentology, 322.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1980, **Carta geológica Jojutla de Juárez, Escala 1:50,000 (E14-A69)**: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1980, **Carta geológica Tilzapotla, Escala 1:50,000 (E14-A79)**: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1983, 1984, 2002, **Carta Cuernavaca, Escala 1:250,000 (E14-5)**: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998, **Carta topográfica Jojutla de Juárez, Escala 1:50,000 (E14-A69)**: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998, **Carta topográfica Tilzapotla, Escala 1:50,000 (E14-A79)**: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Kerr, P. F., 1977, **Optical mineralogy**: Mc-Graw Hill.

- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, **A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali–silica diagram**: *Journal of Petrology*. 77, 24–37.
- Lozano-Santa Cruz, R., Verma, S. P., Girón-García, P., Velasco, F., Morán-Zenteno, D. J., Viera, F., Chávez, G., **Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas**: *Actas del Instituto Nacional de Geoquímica*, 1, 203-208.
- Mackenzie, W. S., Donaldson, C. H., Guilford, C., **Atlas of igneous rocks and their textures**: Longman.
- Martiny-Kramer, B., Silva-Romo, G., Morán-Zenteno, D. J., 2002, **Tertiary faulting and relationship with Eocene-Oligocene volcanism in western Oaxaca, southern Mexico**: *Geological Society of America Abstracts with Programs, Cordilleran Section Meeting, Corvallis, Oregon*, A-97.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995, **The composition of the Earth**: *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253.
- Melgarejo, J. C., 1997, **Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada**: Universidad de Barcelona.
- Monter-Ramírez, A., 2004, **Estratigrafía, sedimentología y relaciones tectónicas de la Formación Balsas en la región de Amacuzac, Morelos**: Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. A., Martínez-Serrano, R. G., Reyes-Salas, M. A., Corona-Esquivel, R., Ángeles-García, S., 1998, **Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Tertiary volcanic sequences of the Taxco-Quetzalapa region, southern Mexico**: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 15, 167-180.
- Morán-Zenteno, D. J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny-Kramer, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G. N., 1999, **Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt**: *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 513-535.
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny-Kramer, B., Tolson, G., Solís-Pichardo, G., Alba-Aldave, L. A., Hernández-Bernal, M., Macías-Romo, C., Martínez-Serrano, R. G., Schaaf, P., Silva-Romo, G., 2000, **Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur**: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 1, 27-58.
- Morán-Zenteno, D. J., Martiny-Kramer, B., Alba-Aldave, L. A., González-Torres, E. A., Hernández-Treviño, T., Alaniz-Álvarez, S. A., 2003, **Tertiary magmatism and tectonic deformation along the Cuernavaca-Acapulco transect, in geologic transects across Cordilleran Mexico**: *Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico, April 4-6. México*, D.

- F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial 1, Field trip 11, 261-280.
- Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. A., Solé, J., Iriondo, A., 2004, **A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tilzapotla ignimbrite**: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 136, 97-119.
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Ortega-Gutiérrez, F., 1995, **Estructura interna de la Falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad Cenozoica**: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 12, 1-8.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978, **Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados de Puebla y Oaxaca**: Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 2, 112-131.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1981, **Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance**: Geofísica Internacional, 20, 3, 177-202.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D. J., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 1992, **Texto explicativo de la quinta edición de la Carta Geológica de la República Mexicana, Escala 1:2,000,000**: Instituto de Geología, Instituto de Geofísica, Consejo de Recursos Minerales, México.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., López, R., 1999, **Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections**: Geology, 27, 719-722.
- Perilliat, M. C., Vega-Vera, F., Corona-Esquivel, R., 2000, **Early Maastrichtian mollusca from the Mezcala Formation of the state of Guerrero, southern Mexico**: Journal of Paleontology, 74, 1, 7-24.
- Ramírez Pérez-Amaya, E. Y., 2005, **Estratigrafía cretácica-terciaria de la región de Jolalpan-Huehuetlán, estado de Puebla**: Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Rivera-Carranza, E., De la Teja-Segura, M. A., Miranda-Huerta, A., Lemus-Bustos, O., Motolinía, G. O., León-Ayala, V., Moctezuma-Salgado, M. D., 1998, **Carta geológico-minera Cuernavaca, Escala 1:250,000 (E14-5)**: Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.
- Ruiz-Violante, A., Basáñez-Loyola, M. A., 1994, **La Formación Xochicalco, unidad estratigráfica del Albiano-Cenomaniano en los estados de Morelos, Guerrero y México**: Sociedad Geológica Mexicana, XII Convención Geológica Nacional, Libro de resúmenes: Sociedad Geológica Mexicana, 161-162.

- Sabanero-Sosa, M. H., 1990, **La ruptura del extremo austral de la Plataforma Guerrero-Morelos, determinada por la acreción constructiva-transformante del Terreno Xolapa**: Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, 126.
- Salinas-Prieto, J. C., 1994, **Étude structurale du sud-ouest Mexicain (Guerrero), Analyse microtectonique des déformations dúctiles du Tertiaire Inferieur**: Tesis de Doctorado, Université d'Orléans.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D. J., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., Köhler, H., 1995, **Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: geochronological evidence**: *Tectonics* 14, 1339–1350.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., Speed, C., 1993, **Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico**: Geological Society of America, Special Paper, 278, 153.
- Siebe, C. G., Abrams, M., Macías, J. L., 1995, **Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatepetl**: Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995, Comité Científico Asesor CENAPRED-UNAM, 339.
- Silva-Romo, G., Martiny-Kramer, B., Mendoza-Rosales, C., 2001, **Formación de cuencas continentales en el sur de México y su cronología respecto al desplazamiento del bloque de Chortis**: Memoria del XI Congreso Latinoamericano de Geología, III Congreso Uruguayo de Geología, Montevideo, Uruguay, 9.
- Tolson, G., 1998, **Deformación, exhumación y neotectónica de la margen continental de Oaxaca: Datos estructurales, petrológicos y geotermobarométricos**: Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
- Verma, S. P., Lozano-Santa Cruz, R., Girón-García, P., Velasco, F., 1996, **Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos traza en rocas ígneas**: *Actas del Instituto Nacional de Geoquímica*, 2, 237-242.
- Verma, S. P., 2002, **Absence of Cocos plate subduction-related basic volcanism in southern Mexico: A unique case on Earth?**: *Geology*, 30, 12, 1095-1098.
- Wilson, B. M., 1989, **Igneous petrogenesis**: Unwin Hyman, 466.
- Código Estratigráfico Norteamericano**: Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica, Universidad Nacional Autónoma de México, Sociedad Geológica Mexicana y Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, México.

ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS CUANTITATIVOS DE ELEMENTOS MAYORES

Los análisis cuantitativos de elementos mayores presentados en este trabajo, realizados en 13 muestras representativas de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio, se llevaron a cabo en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM, con el apoyo del Quím. Rufino Lozano Santa Cruz, la Quím. Patricia Girón García y el Sr. Santiago Alavés Puntos.

En este apartado se describe la técnica utilizada para la cuantificación de elementos mayores en dichas rocas volcánicas, análisis cuyo objetivo fue la caracterización geoquímica de tales muestras.

A cada roca seleccionada para ser analizada químicamente le fue extraído un fragmento de aproximadamente 150 g, procurando que fuera un trozo de roca sana y sin alteraciones, limpiando las costras producidas por el intemperismo y evitando la contaminación de la muestra. Posteriormente, la pieza seleccionada fue lavada con agua destilada, con el propósito de eliminar los residuos que pudieran contaminar la muestra. Una vez limpia, la roca fue molida en un mortero de hierro colado, tomando todas las precauciones necesarias para evitar la contaminación del material, hasta que la mayor parte de este tuvo el tamaño de arena fina, aproximadamente. Utilizando un mortero de ágata, esta arena fina fue pulverizada hasta tener el tamaño de la arcilla.

De esa arcilla, se colectaron aproximadamente 10 g para la realización de los análisis en el LUGIS. El primer paso realizado en dicho laboratorio fue colocar la muestra en un horno eléctrico a 105 °C durante 24 horas, con el propósito de extraer el agua de la muestra. Posteriormente, se colocaron 0.5 g de material junto con 10 g de fundente ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y LiBO_2 granular, grado ultrapuro, en relación 1:1) en un recipiente pequeño de aluminio, cuyo contenido se vació posteriormente en un crisol de una aleación Pt-Au (en relación 95:5), al cual se le agregó LiBr en solución acuosa, con una concentración de 250 g/l, como un agente no mojante.

Esta preparación se fundió en un horno Fluxy a 950 °C durante 10 minutos, vaciándose posteriormente a unos recipientes de una aleación Pt-Au (en relación 95:5) para su enfriamiento, de lo cual se obtuvieron las pastillas de vidrio apropiadas para la medición de elementos mayores. Esta cuantificación se realizó en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X (FRX) de la

marca Siemens, modelo SRS 3000, propiedad del LUGIS (Instituto de Geología, UNAM).

Adicionalmente, para calcular las pérdidas por calcinación de las muestras, se introdujo 1 g de cada muestra en un crisol de porcelana, el cual fue colocado en un horno eléctrico a una temperatura de 950 °C durante una hora, obteniendo la diferencia entre las masas del crisol con la muestra antes y después del procedimiento.

ANEXO 2. ANÁLISIS CUANTITATIVOS DE ELEMENTOS TRAZA

En este trabajo se presentan los resultados de los análisis cuantitativos de elementos traza realizados en 4 muestras representativas de rocas volcánicas colectadas en el área de estudio, llevados a cabo en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM, con el apoyo del Quím. Rufino Lozano Santa Cruz, la Quím. Patricia Girón García y el Sr. Santiago Alavés Puntos. En esta sección se explica el procedimiento efectuado para la cuantificación de los elementos traza en las muestras de rocas volcánicas de interés.

Para la realización del análisis que se describe en este apartado, se aprovechó la arcilla restante de la molienda y pulverización realizada para el análisis cuantitativo por elementos mayores de las muestras de interés, cuya preparación se describe en el Anexo 1 de este trabajo.

De la arcilla resultante de la pulverización de la muestra, se colectaron aproximadamente 6 g para la realización de los análisis químicos por elementos traza en el LUGIS del Instituto de Geología. En ese laboratorio, se mezclaron los 6 g de muestra con 0.6 g de aglutinante *wax-c* (micropolvo de Hoechst) para su posterior prensado a 30 ton/cm² durante 30 segundos en una prensa automática Graseby/Specac, con dado de 4 cm de diámetro. La pastilla obtenida por este procedimiento fue utilizada para realizar las mediciones en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X (FRX), marca Siemens SRS 3000.