

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LA ZONA
DE XONOTLA-SAN MIGUEL TENANGO,
MUNICIPIO DE ZACATLÁN, PUEBLA.**

TESIS

FRANCISCO PONCE ABAD



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.

A mis padres quienes siempre me han apoyado incondicionalmente y me han encaminado mediante consejos y ejemplo a ser una mejor persona.

A mis hermanas con todo cariño

A mis amigos que hicieron mi estancia en la facultad mas agradable.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por su importante apoyo en este proyecto con el número IN 118403 a cargo del Dr. Zoltán DE Cserna, ya que gracias a este apoyo se pudo realizar este trabajo.

Le doy gracias a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la formación profesional transmitida por mis profesores.

Mi más sincero agradecimiento al Ing. Arturo Gómez Caballero y a la M. en C. Guadalupe Villaseñor, por su voluntad y paciencia para guiarme en la elaboración de esta tesis.

Al M. en C. Enrique González Torres por sus valiosos comentarios para la elaboración de la tesis.

A los Ingenieros Germán Arriaga y Alfredo Victoria por su asesoría en el análisis petrográfico del material así como sus comentarios sobre la tesis.

Al Ingeniero Leovigildo Cepeda Dávila por sus valiosos comentarios.

Al Instituto de Geología, Instituto de Geofísica y Facultad de Ingeniería por el soporte técnico y apoyo:

Al Químico Rufino Lozano Santa Cruz por su ayuda en el análisis de fluorescencia de rayos X

A la Química Patricia Girón por la ayuda en la difracción de rayos X

Al Ing. Carlos Linares y a la Dra. Margarita Reyes por su ayuda en el uso del microscopio electrónico de barrido y microsonda electrónica.

Al Ing Teodoro Hernández por la ayuda en la preparación de muestras para el análisis de laboratorio.

Al Ing. Juan Carlos Cruz Ocampo y Sr. Juan José Ramírez por su ayuda en el procesamiento de las imágenes, realizadas a partir del microscopio óptico

A la Sra. Magdalena Alcalde y a las M. En C. Leticia Alba y Sonia Ángeles por sus valiosos comentarios

Geología y geoquímica de la zona de Xonotla-San Miguel Tenango municipio de Zacatlán, Puebla

INDICE

I. Introducción.

Generalidades

Justificación.

Objetivos

Método de trabajo.

II. Geografía.

Localización.

Fisiografía.

Orografía y hidrografía.

Clima.

Vegetación.

Infraestructura.

III. Marco geológico regional.

Estratigrafía regional

Evolución geológica.

Interpretación de imágenes de satélite

Mapa geológico regional

IV. Estratigrafía local.

Rocas sedimentarias.

Rocas ígneas.

Petrografía de las rocas ígneas.

Descripción en el Microscopio óptico

Microscopio electrónico de barrido y microsonda electrónica

Análisis de difracción de rayos X

V. Geología estructural

Fotointerpretación

Unidad sedimentaria

Mesa de Zacatlán

Unidad de estructuras volcánicas

Mapa geológico de la zona de San Miguel Tenango-Xonotla

VI. Geoquímica

Trabajo de laboratorio

Diagramas geoquímicos

Resultados

VII. Geología económica.

Zona de San Antonio

Zona de San Miguel Tenango

Zona de Xonotla

VIII. Resultados y discusión.

IX. Conclusiones.

Bibliografía

Introducción

Generalidades

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación “Geología y metalogenia de los depósitos auroargentíferos del domo riolítico de San Miguel Tenango, Municipio de Zacatlán, Sierra Norte de Puebla”, cuyos recursos económicos provienen de la Dirección de asuntos del Personal Académico (DGAPA) en el Instituto de Geología de la UNAM, con el número IN 118403, a cargo del Dr. Zoltan De Cserna y el M. en C. Jerjes Pantoja Alor.

Justificación

En el área de San Miguel Tenango-Xonotla, estado de Puebla, afloran rocas félsicas con mineralización de oro-plata. El estudio de esta área permitirá obtener datos para complementar el conocimiento en mayor detalle de la estructura geológica regional mencionada, que debe corresponder con una estructura ancestral de la Faja Volcánica Transmexicana.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es caracterizar geológicamente la zona de San Miguel Tenango-Xonotla.

Los objetivos particulares de la investigación son los siguientes:

- ❖ Caracterizar las unidades ígneas y las estructuras geológicas del área de San Miguel Tenango- Xonotla.
- ❖ Realizar la cartografía geológica del área.
- ❖ Determinar las características petrográficas y geoquímicas de las rocas ígneas de la zona de San Miguel Tenango-Xonotla.
- ❖ Reconocer las características geológicas generales de las zonas mineralizadas.

Método de trabajo

El método de trabajo nos permite organizar las tareas por realizar para el presente trabajo de tesis, las cuales son descritas a continuación:

❖ **Trabajo de gabinete**

Se realizó una recopilación bibliográfica de los trabajos previos sobre la geología regional de Puebla-Veracruz, la geología local de la zona San Miguel Tenango- Xonotla y la información geológica-minera de los depósitos de plata y manganeso. Para ello, se consultaron cartas topográficas y geológicas, fotografías aéreas e imágenes de satélite, libros, tesis, artículos científicos, informes técnicos, boletines e información de Internet. Se analizó la carta topográfica a escala 1:50,000: Zacatlán, cuya clasificación es E14B14 elaborada por el INEGI, así como la carta geológica 1:250,000 elaborada por la SSP y fotografías aéreas a escala 1:75,000: Con el material obtenido de este análisis se elaboró un mapa preliminar para la planeación de la visita de campo.

❖ **Trabajo de campo**

Con el mapa geológico preliminar, fueron planeadas las rutas para la descripción, delimitación y caracterización de las unidades geológicas presentes. Fueron tomados datos estructurales y muestras de las distintas rocas, con énfasis en las rocas ígneas y algunas estructuras mineralizadas. Con esta información y con ayuda de las fotografías aéreas, se elaboró el mapa geológico y secciones esquemáticas del área.

Por último, fueron seleccionadas muestras para su estudio petrográfico y geoquímico.

❖ **Petrografía**

Fueron elaboradas 12 láminas delgadas a partir de las muestras de rocas recolectadas en campo, para su estudio mediante microscopía óptica de polarización. El estudio se realizó con un microscopio Zeiss modelo Axiolab de la Facultad de Ingeniería. El procesamiento de las imágenes se realizó por medio de un Analizador de imágenes Carl Zeiss Axiocam Emulation. Este análisis fue complementado con un estudio en la microsonda electrónica marca Jeol, modelo JXA, serie 8800/8900, de los institutos de Geofísica y Geología de la UNAM. Este equipo puede ser usado en el modo de microscopio electrónico de barrido MEB y de microsonda electrónica de barrido. En el modo MEB, permite obtener imágenes de electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE) y análisis cualitativos con EDS (espectrómetro de energía dispersiva), mientras que

en el modo de microsonda electrónica se puede realizar análisis cuantitativos con WDS (espectrómetro de longitud de onda). El estudio se enfocó a las fases y texturas que por su tamaño de grano no pudieron ser identificadas por medio del microscopio petrográfico.

También se realizaron análisis por difracción de Rayos X de seis muestras. El proceso se llevó a cabo en la Facultad de Química-UNAM en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI).

❖ **Geoquímica de elementos mayores y traza**

Una fracción de las muestras fue preparada para realizar estudios de elementos mayores y algunos traza por fluorescencia de Rayos X y plasma. Previamente las rocas fueron preparadas utilizando una trituradora de quijada y un pulverizador en el taller de molienda del Departamento de Geoquímica Isotópica del Instituto de Geofísica. El análisis de elementos mayores fue realizado con un espectrómetro secuencial de fluorescencia de Rayos X, marca Siemens SRS 3000 del Instituto de Geología. Una parte de las muestras fue analizada por el método ICP por elementos mayores y trazas, en los laboratorios comerciales Act Lab de Ancaster Canadá.

I. Geografía.

Localización y Acceso

El área de estudio se encuentra dentro de la carta Zacatlán (E14-B14) escala 1:50,000 del INEGI (Fig. I.1), en la parte nororiental del estado de Puebla, a 5 km en línea recta de la ciudad de Zacatlán y comprende un área aproximada de 6 km². Los poblados que se encuentran dentro de esta zona son los siguientes: San Miguel Tenango, San Antonio y El barrio de Xonotla, pertenecientes al municipio de Zacatlán.



Fig. I.1 Localización de área de estudio Xonotla-San Miguel Tenango.

❖ Acceso.

El acceso al área de estudio es a través de las carreteras que provienen de las ciudades de Tulancingo, Poza Rica y Apizaco a la ciudad de Zacatlán (Fig. I.2).

En Zacatlán se toma la desviación por un camino de terracería a San Miguel Tenango, que se encuentra después del puente de la Marimba de la carretera Zacatlán-Apizaco. En San Miguel Tenango existen las desviaciones hacia los poblados de Xonotla, Yehuala y San Miguel Tenango.

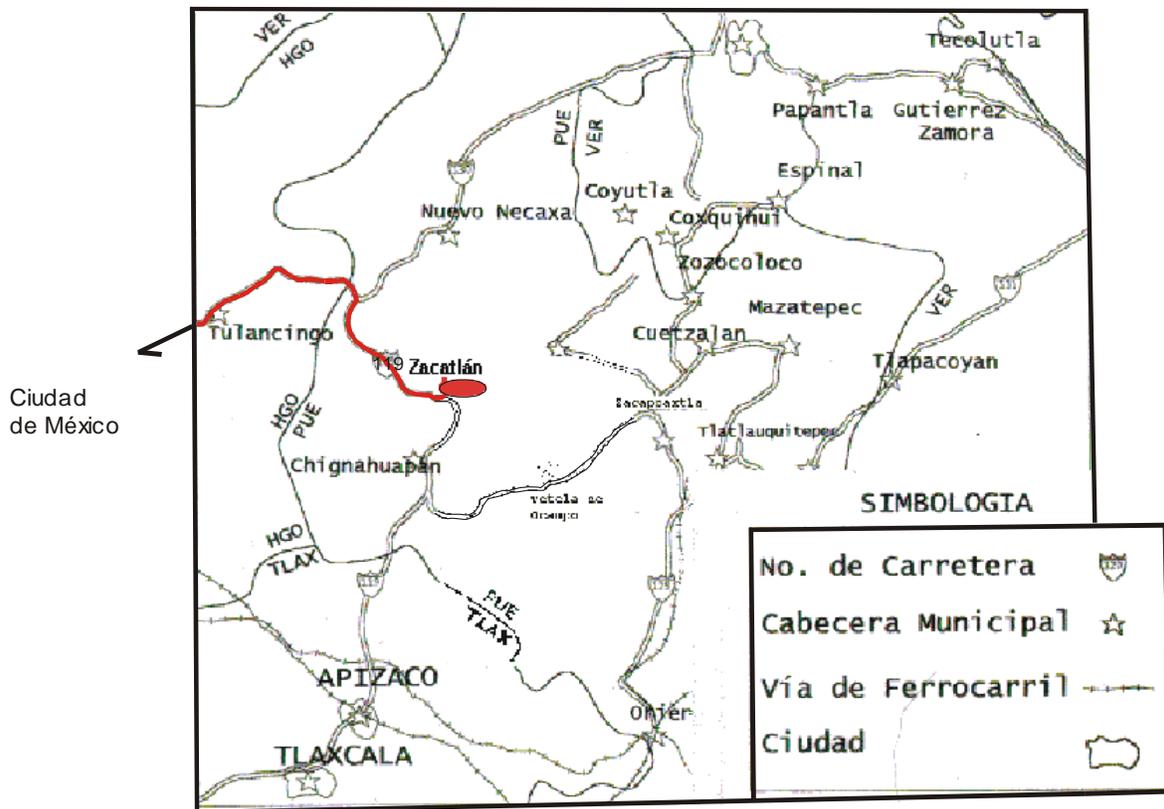


Fig I.2 Vías de acceso.

Fisiografía

El área de estudio se localiza dentro de la Provincia Sierra Madre Oriental (SMOr), cerca del límite con la provincia Eje Neovolcánico (Fig I.3).

El término Sierra Madre Oriental se refiere a un rasgo orográfico formado por un macizo montañoso rugoso, angosto y alargado, situado en el oriente de la República Mexicana, que se extiende paralelamente a la costa del Golfo de México, desde la frontera norte del país hasta su límite con el Eje Neovolcánico. Las sierras están formadas por rocas sedimentarias intensamente plegadas del Jurásico y Cretácico, entre las que predominan las calizas, aunque existen afloramientos importantes de rocas terrígenas, representadas por areniscas y lutitas. Los afloramientos de rocas ígneas volcánicas son menos extensos y cubren discordantemente a las rocas mesozoicas plegadas; además, dentro de esta provincia existen rocas ígneas intrusivas de composición granítica, que afectan a la secuencia mesozoica.

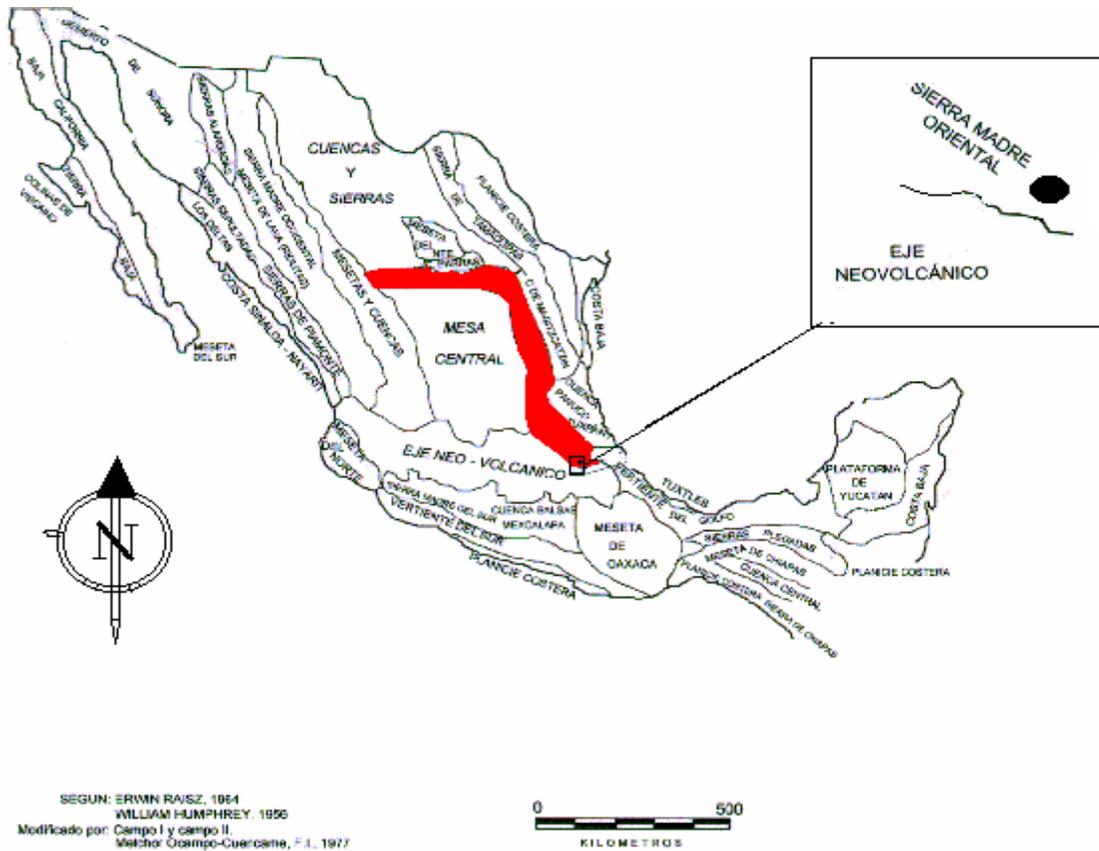


Fig. I.3 Provincias fisiográficas y ubicación del área de estudio (E. Raisz, 1964; W. Humphrey, 1956).

El término Eje Neovolcánico actualmente está en desuso, por lo que en este trabajo se utilizó el término Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) para definir al arco volcánico que se desarrolló sobre la margen sudoccidental de la placa de Norteamérica, como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco (Luca-Ferrari, 2000). Este arco tiene una orientación general W-E, que atraviesa la parte central del país y en su extremo occidental se traslapa con la provincia Sierra Madre Occidental. La FVTM se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental las cuales presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química. La región de estudio se encuentra en el sector oriental, en donde la mayor parte del volcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica, alineados a lo largo de estructuras corticales, mientras que los volcanes monogénicos de composición basáltica representan sólo una pequeña fracción del volumen de magma emplazado. En este sector, el

arco volcánico se emplaza sobre una corteza de edad precámbrica, presumiblemente de tipo cratónico (Ortega-Gutiérrez,1996).

Orografía e hidrografía.

La región en estudio está constituida geomorfológicamente por una serie de sierras, cuyas cumbres sobrepasan los 2,500 m y se encuentran separadas por profundas barrancas.

La mayor parte del drenaje es del tipo recto y paralelo, controlado por un sistema general de fracturas y fallas.

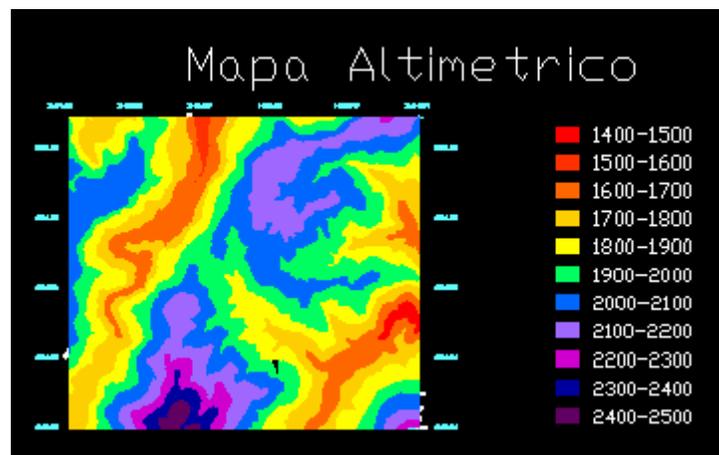


Fig. I.4 Mapa altimétrico elaborado de la región Xonotla-San Miguel Tenango.

En el mapa altimétrico (Fig. I.4) de la región, se puede observar las diferencias de alturas hasta de 1000 m entre las barrancas y las cimas de las montañas. También nos permite determinar las orientaciones generales de los ríos y el parteaguas.

Los ríos principales presentan una orientación general SW-NE, mientras que los ríos que los alimentan tienen una dirección SE-NW. El parteaguas principal tiene una orientación 35° NE.

Las formas de carácter erosional son cañones profundos que se originaron por las corrientes fluviales, los cuales acarrean material en las épocas de avenidas por las pendientes abruptas, acumulando los sedimentos en zonas donde la pendiente se suaviza, formando depósitos de pie de monte y abanicos aluviales (Fig. I.5).

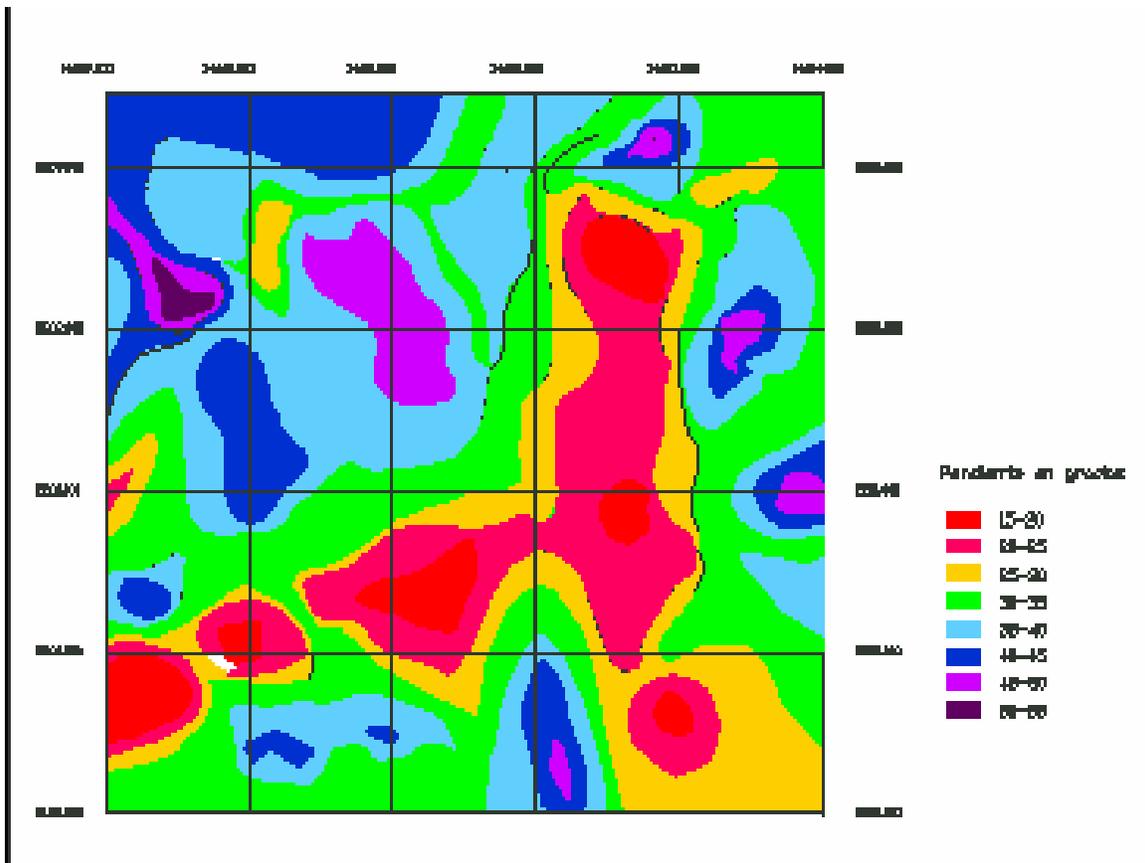


Fig. I.5 Mapa de pendientes elaborado del área Xonotla-San Miguel Tenango

En el área predominan pendientes abruptas (Fig I.5) que, además del clima y litología, es un factor que produce deslizamientos y derrumbes.

Las sierras están formadas por un conjunto de montañas de laderas convexas a rectas.

Clima.

El clima en el área, de acuerdo con la clasificación de Köppen, es templado, con una temperatura media anual entre 12° y 18° C; su régimen de humedad es:

C (M). Templado con lluvias en verano y con una precipitación hasta de 570 mm en el mes más lluvioso.

(A) E. Este clima corresponde al más cálido de los templados, con temperatura media anual mayor a 18° C, con una precipitación hasta de 470 mm en el mes más lluvioso.

Vegetación

La vegetación está formada por coníferas, como el pino, oyamel, ciprés, etc.; también se observa árboles frutales como el manzano, ciruelo, durazno y peral. En las laderas se observa grandes cultivos de cafetales y en las partes bajas la vegetación está constituida por arbustos; los productos cultivables son el maíz, chile, frijol, manzana, ciruela, etc.

Infraestructura

La región cuenta con los servicios indispensables como son agua, luz y caminos. Los caminos que comunican a las poblaciones del área de estudio son brechas de terracería, los cuales son transitables en vehículo; se dificulta el acceso en épocas de lluvias.

II. Marco geológico regional.

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia geológica del Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas cerca de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) en su sector oriental. (Ortega-Gutiérrez, 1992).

El registro geológico abarca desde el Pérmico hasta el Cenozoico. Las rocas más antiguas afloran dentro del macizo de Teziutlán constituido por rocas ígneas y metamórficas abarcando desde el Pérmico hasta el Triásico (Ruiz Sainz en Ángeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002).

El Mesozoico está representado por las rocas sedimentarias formadas durante los eventos transgresivos y regresivos. Estas rocas sufrieron un plegamiento provocado por el evento compresivo, en la orogenia Larámide. El Cenozoico está representado por rocas volcánicas de la FVTM y sedimentarias de origen continental (aluvión). La intensa actividad volcánica dio origen a distintas estructuras volcánicas, como calderas (Los Humeros y Acucolco) y Volcanes (La Malinche, Cofre de Perote, etc.).

La geodinámica de la zona es compleja, ya que existen diversos eventos tectónicos ocasionando plegamiento-fallamiento y actividad volcánica..

Estratigrafía regional

Las rocas más antiguas de la región están constituidas por rocas ígneas y metamórficas. Las rocas metamórficas están formadas por dos complejos miloníticos: La Soledad, que está constituido principalmente por gneises cuarzofeldespáticos intercalados con pequeños paquetes de esquistos de biotita, epidota y cuarzo; y el complejo milonítico Xucayuca, que se encuentra estructuralmente arriba del complejo La Soledad; este complejo está constituido por esquistos miloníticos de clorita+muscovita-albita+cuarzo y por esquistos cuarzo + muscovita + feldespato potásico+ epidota. Los análisis químicos de estos complejos tienen una afinidad con el ambiente tectónico de arcos continentales (Angeles-Moreno y Sánchez-Martínez, 2002).

Ruiz Sainz (1978) en fechó algunos esquistos de muscovita y cuarzo obteniendo una edad de 207 ± 17 Ma, que corresponde al Triásico Tardío. También fechó una granodiorita de biotita-hornblenda con edad de 246 ± 7 Ma que corresponde al Pérmico.

Sobreyaciendo discordantemente al basamento se tiene la Formación Huizachal constituida por sedimentos continentales del Triásico. Por encima de esta unidad, se encuentran los sedimentos marinos del Jurásico Temprano de la Formación Huayacocotla, así como los sedimentos del Jurásico Medio de la Formación Cahuwasas. En discordancia litológica, se tienen las rocas marinas del Jurásico Medio a Superior de las Formaciones Tepéxic, Santiago y Tamán; cubriendo a estas rocas, se encuentra la Formación Pimienta de edad titoniana, sobreyaciendo a esta secuencia tenemos, las rocas del Cretácico de las Formaciones Tamaulipas Inferior, Otates, Tamaulipas Superior, Agua Nueva, San Felipe y Méndez (Fig II.1).

El espesor de la columna sedimentaria presente en el área abarca poco más de los 5,000 m (Tapia-Crespo, 2001), la edad de la columna sedimentaria se encuentra en el intervalo del Triásico al Cretácico superior.

ERA	SIS-TEMA	PERÍODO	EDAD m.a	CUENCA DE LIBRES ORIENTAL	Río Lexaxalpa y Plan de Arroyos		
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	82	Formación Méndez	Formación Mexcala	Formación Méndez	
				Formación San Felipe	Formación Maltrata		Formación Guzmantla
				Formación Agua Nueva			
		INFERIOR	110 135	Formación Tamaulipas Superior	Formación Orizaba	Formación Tamaulipas Superior	
				Formación Tamaulipas Inferior		Formación Tamaulipas Inf.	
		JURÁSICO	SUPERIOR		Formación Pimienta	Formación Pimienta	
	Formación Tamán				Formación Tamán		
	MEDIO		166	Formación Cahuasas	Formación Cahuasas		
	INFERIOR		181	Formación Huayacocotla	Formación Huayacocotla		
	TRIÁSICO	SUPERIOR		Formación Huizachal	Formación Huizachal		
MEDIO							
INFERIOR							
PALEOZOICO			220 330	Rocas ígneas intrusivas y metamórficas (Granito, granodiorita y esquistos) (Macizo de Teziutlán)	Rocas ígneas intrusivas de composición granítica y rocas metamórficas		

Fig. II.1 Columna estratigráfica regional (Yáñez, 1982)

Descripción de las formaciones.

Formación Huizachal.

Son depósitos aluviales o fluviales del Triásico tardío. La formación muestra un aumento en el tamaño de grano que va desde una serie de arenisca a conglomerado grueso.

Formación Huayacocotla

Es una secuencia detrítica marina de lutitas y areniscas en estratos delgados y en forma masiva del Jurásico Inferior. La fauna consiste principalmente de bivalvos y cefalópodos. Esta unidad aflora principalmente en la región de Huauchinango y Pahuatlán, formando sierras alargadas, sobreyace discordantemente a los depósitos continentales del Triásico.

Es secuencia clástica con incremento gradual del tamaño de grano hacia la cima, se puede interpretar como una secuencia de regresión.

Formación Cahuwasas.

Son depósitos aluviales o fluviales, del Toarciano al Batoniano, cuyo espesor varía entre 450 y 650 m. (Carrillo-Bravo en Suter,1990). Esta serie detrítica fue depositada en un ambiente continental y está constituida por conglomerados, grauvacas, areniscas, limonita y lutita oxidada de color rojo. Afloran al norte del estado, en Huahuaxtla y Xicotepec de Juárez. Sobreyace discordantemente a la formación Huayacocotla del Jurásico Inferior, su morfología corresponde a sierras alargadas orientadas en dirección NW-SE (Castro-Mora, 1995).

Jurásico Superior

El Jurásico Superior está representado por una alternancia de calizas, lutitas y margas depositadas en ambiente marino de facies de plataforma, así como calizas microcristalinas en ocasiones de tipo de textura *grainstone* de la formaciones Tamán y Pimienta. Estas unidades yacen cubriendo concordantemente a las unidades del Jurásico Medio, representadas por las Formaciones Santiago, Tepéxic y Tenexcate (Castro-Mora, 1995).

Formación Tepéxic

La formación Tepéxic es un depósito litoral que inició una transgresión marina (Aguayo-Camargo en Suter, 1990), que consta de calcoarenita marina del Calloviano, con un espesor aproximado de 200m. Muestra una discordancia angular con las formaciones clásticas que la subyacen, Huayacocotla y Cahuwasas, y un contacto concordante con la Formación Santiago que la sobreyace (Erben en Suter M., 1990).

Formación Santiago

La formación está constituida por lutitas y limonitas de color gris azulado que varía a café negruzco, caliza arcillosa y caliza negra de estratificación delgada con textura *mudstone-wackestone* y microfauna pelágica El espesor varía de 200 a 300 m (Cantú-Chapa, 1998). Muestra contactos concordantes con las formaciones que la sub y sobreyacen, Tepéxic y

Tamán, respectivamente. Su edad abarca, con base en amonites del Calloviano medio al Oxfordiano tardío.

Formación Tamán

Consiste litológicamente en caliza negra, bien estratificada, de textura *mudstone*, con intercalaciones delgadas de lutita negra, y contiene microfauna pelágica y amonite del Kimberidgiano temprano al Titoniano temprano. La formación yace concordantemente bajo la formación Pimienta y concordantemente sobre la formación Santiago (Tapia-Crespo, 2000).

Formación Pimienta

Está constituida por intercalaciones de caliza negra con estratificación delgada, lutita de color café-rojizo y verdusco. Presenta bandas y nódulos de pedernal. El ambiente de depósito fue reductor, relativamente profundo con aporte de material terrígeno y materia orgánica (Tapia-Crespo, 2000).

Cretácico Inferior (Ki)

El Cretácico Inferior está constituido fundamentalmente por una secuencia carbonatada con algunos horizontes terrígenos (lutitas y areniscas) hacia la base, ya que la transición del Jurásico Superior y el Cretácico Inferior es gradual. El ambiente de depósito de las rocas que constituyen este periodo es de tipo de plataforma.

Formación Tamaulipas Inferior

Son depósitos marinos de facies de plataforma externa y cuenca, del Berriasiano al Valanginiano. La formación consiste en calizas que presentan variaciones en su textura y espesor de los estratos (Tapia-Crespo, 2000):

Packstone con bioclastos, peletoides y oolitas que yacen sobre un *mudstone* a *wackestone* con intercalaciones de *grainstone* y algunos horizontes bentoníticos, presentando nódulos de pedernal.

Wackestone-packstone en estratos gruesos de color gris que se intemperiza en gris claro, con oolitas, diseminaciones de hematita y fracturas rellenas de calcita.

Mudstone-wackestone en estratos medianos y gruesos de color crema que intemperiza en color gris claro con lentes de pedernal de color pardo oscuro.

Formación Otates

Es una secuencia de calizas arcillosas del Aptiano de color gris, gris oscuro y negro con estratos que varían en espesor desde unos cuantos hasta 50 cm, que se depositaron en un ambiente de cuenca. Presenta intercalaciones de lutitas laminares del mismo color y ocasionalmente pedernal negro. Los contactos son concordantes con las formaciones que la sub y sobreyacen, Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior, respectivamente.

Formación Tamaulipas Superior.

Está constituida por una secuencia del Albiano al Cenomaniano de caliza con texturas *wackestone* y *packstone*, el espesor de los estratos varían de delgados a gruesos, el color varía de claro a oscuro y presenta concreciones de pedernal. El depósito se efectuó en un ambiente de plataforma externa de mar abierto.

Formación Agua Nueva

La litología consiste en caliza marina del Cenomaniano al Huroniano, de color gris azulado con estratificación delgada (10-40 cm) y paralela (en ocasiones ondulada), de textura *mudstone-wackestone*, con nódulos de pedernal negro e intercalaciones de pedernal negro y limonita (5-10 cm), de color verde con abundante glauconita.

Formación San Felipe

Litológicamente, consiste en caliza bien estratificada en capas de 10 a 30 cm de color gris verdoso con textura *wackestone-packstone*, en algunas partes con nódulos de pedernal, intercalada con lutita verde de 2-5 cm de espesor y con capas de arenisca verde y grauvaca. El color de la formación se debe a la glauconita. Al parecer las rocas fueron depositadas debajo de la base de las ondas de tormenta, en un ambiente con baja velocidad máxima de flujo.

Formación Méndez

Litológicamente consiste principalmente en margas del Campaniano temprano al Maastrichtiano tardío poco estratificadas de color gris verdoso que cambia a amarillo, con intercalaciones pequeñas de areniscas hacia cima de la formación.

Cenozoico

Durante este periodo se formaron distintas formaciones volcánicas que fueron producto de la actividad dentro de la Faja Volcánica Mexicana, que yace discordantemente sobre las formaciones sedimentarias mesozoicas

El Terciario está representado por la Formación Cruz Blanca, la andesita Alseseca y la Formación Teziutlán y el Cuaternario se conforma por la Rólita Oyameles, la Ignimbrita Xaltipán y la Formación San Antonio (Yáñez-García,1982) Fig. II.2

ERA	SIS-TEMA	SERIE	EDAD m.a	LOS HUMEROS Y DERRUMBADAS		
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		Aluvión		
		PLEISTOCENO	Formación Tenamastepec		Miembro Arenas (andesitas y dacitas)	Materiales de las calderas de explosión
					Miembro El Limón (andesitas, andesitas basálticas y basaltos)	
					Lahares de las Derrumbadas	
				Pómez y tobas		
				Sedimentos Lacustres		
			Formación San Antonio		Miembro La Viola (andesitas basálticas vítreas)	Escoria y basaltos
					Miembro Orilla del Monte (andesitas Basálticas)	
				Riolilita Oyamales		
	1		Brecha de la caldera de explosión Buenavista	Ignímbrita Xáltipan		
	TERCIARIO	PLIOCENO	10	Formación Teziutlán (andesitas, andesitas basálticas y basaltos)		
		MIOCENO	SUP.		Andesitas Alseseca	
			MED.		Formación Cruz Blanca (Cg, arenas y arcillas)	
			INF.	25	Rocas ígneas intrusivas	
		OLIGOCENO	40			
		EOCENO	60			
		PALEOCENO	70			

Fig. II.2. Columna estratigráfica regional (Yáñez-García, 1982)

Formación Cruz Blanca

La unidad está constituida por una secuencia terrígena de conglomerados, arenas y arcillas, que se originaron por la erosión y el intemperismo intenso al que estuvieron expuestas las rocas sedimentarias del Mesozoico y las rocas ígneas intrusivas del basamento.

Andesita Alseseca

Es una roca de color gris oscuro y contiene principalmente fenocristales tabulares de plagioclasa, piroxenos, biotita y magnetita. El fechamiento por K-Ar se calculo de 11 Ma. (Ruiz-Sainz, 1965 y Yáñez-García, 1982) y presenta una facies de dacita fechada en 10.5 Ma (Yáñez-García, 1982).

Formación Teziutlán

La unidad está constituida principalmente por andesitas y, en menor grado, basaltos. El color de estas rocas varía de gris oscuro a negro, con textura porfídica, en donde la matriz es microlítica. La composición química varía de andesítica a andesítico-basáltica y en algunas ocasiones se encontraron rocas dacíticas (Yáñez-García, 1982). La edad calculada por K-Ar es de 3.5 Ma. cerca de Teziutlán, que representa al Plioceno tardío (Ruiz-Sainz, 1965 en Yáñez- García, 1980).

La Riolita Oyameles

La unidad está constituida por domos, derrames y tobas de composición riolítica. Los derrames presentan texturas fluidales y holohialina, algunos presentan esferulitas de feldespatos alcalinos. El domo de Oyameles está formado por una riolita porfídica que presenta plagioclasa sódica zonificada y fue fechado en 1 Ma. (Yáñez- García, 1982).

La Igiímbrita Xaltipán

La unidad está constituida por una serie de derrames ignimbríticos, los cuales presentan distintos estados de consolidación (densa, media y sin consolidación) . Se encuentra depositada sobre la andesita Alseseca y se considera que abarca un intervalo correspondiente al Plioceno superior-Pleistoceno inferior. La emisión de gran cantidad de material ignimbrítico causó grandes vacíos en la cámara magmática, por lo que el techo sufrió un colapso que dio lugar a que se formara la Caldera de Los Humeros.

La Formación San Antonio

La unidad está formada por una serie de derrames de composición andesítico-basáltica. La unidad se divide en dos miembros: Orilla del Monte y La Viola. El primero está compuesto por derrames de andesitas y basaltos con textura porfídica. En la parte superior del

miembro, las rocas cambian gradualmente a derrames escoriáceos y abundantes conos de escoria. El miembro La Viola está conformado por rocas de composición andesítico-basáltica con una textura claramente vítrea, con fenocristales de feldespatos, vidrio, augita, hornblenda y magnetita. El fechamiento radiométrico de las rocas es de 1.1 Ma, correspondiente al Plioceno tardío-Pleistoceno temprano (Yáñez-García, 1982).

Evolución geológica

Ruiz Sainz (1978) fechó algunos esquistos de muscovita y cuarzo obteniendo una edad de 207 + 17 Ma., que corresponde al Triásico tardío; también fechó una granodiorita de biotita-hornblenda de 246 + 7 Ma. que corresponde al Pérmico

Las rocas más antiguas que afloran cerca de la región de estudio son del Pérmico y Triásico tardío, y forman el Macizo de Teziutlán. Que es un complejo de rocas ígneas y metamórficas, donde los depósitos de sedimentos clásticos sufrieron un metamorfismo de bajo grado hace 207 Ma. (Ruiz-Sainz, 1978) y un metamorfismo por contacto provocando, la formación de esquistos de cuarzo y muscovita relacionados con el batolito de composición granodiorítica y granítica de 246 + 7, conocido como el macizo de Teziutlán (Yáñez- García,1982).

Los eventos tectónicos durante la historia geológica de la región son los siguientes:

Durante el Triásico, se originaron depresiones, debido a un proceso distensivo, en donde se depositaron los sedimentos continentales de las formaciones Huizachal y Huayacocotla.

Durante el Jurásico Temprano se inició una fase de extensión, que terminó a finales del Jurásico Medio. Este evento propició la formación de pilares y fosas tectónicas que están limitadas por fallas normales de orientación NNW-SSE y N-S.

Durante el Jurásico Medio, continuó la deformación distensiva que propició la formación de nuevas fosas y pilares tectónicos. (Ochoa-Camarillo *et al*, 1992).

En el Jurásico Tardío, el área se encontraba entre la plataforma de Tamaulipas y la península de Oaxaca (Yáñez-García, 1982). Las condiciones tectónicas prevalecen, iniciándose un extenso lapso transgresivo que produce una sedimentación marina, originando las formaciones Tamán, Pimienta, Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior.

Un evento compresivo (orogenia Larámide) inició a fines del Cretácico, provocando una regresión marina y dando origen a las formaciones San Felipe, Agua Nueva y Méndez. Las rocas fueron plegadas, formando un complejo de pliegues y cabalgaduras llamado Anticlinorio de Huayacocotla.

La orogenia Larámide causó sistemas de fracturas y fallas en varias direcciones. Los esfuerzos de compresión de dirección NE-SW provocaron fracturas que tuvieron un rumbo

preferencial NE-SW y en menor escala fracturas con direcciones N-S y E-W. Los ejes de los pliegues se orientaron en forma casi paralela de noroeste a sureste, es decir, perpendiculares a la dirección de los esfuerzos compresivos laramídicos y de un modo general paralelos al rumbo principal de la Sierra (Yáñez-García, 1982).

En el Terciario temprano terminó el evento compresivo de la orogenia Larámide, responsable de la formación de la Sierra Madre Oriental.

Desde el Oligoceno medio hasta el Mioceno medio comenzaron a introducirse cuerpos ígneos dentro de la secuencia sedimentaria: en el Oligoceno medio una sienita y en el Mioceno medio cuerpos de granito y granodiorita. En el Mioceno tardío comenzó la actividad ígnea efusiva con derrames de composición andesítica, que sirvieron de basamento a un grupo de rocas volcánicas posteriores, representadas por andesitas, andesitas basálticas, basaltos y en ocasiones dacitas que corresponden al Plioceno medio (Yáñez-García, 1982).

Desde el Plioceno tardío hasta el Cuaternario, la actividad volcánica continuó desarrollando varios centros de emisión de material volcánico, dentro de los cuales están el Cofre de Perote, Pico de Orizaba, La Malinche, Sierra de Tlaxco, así como los sistemas volcánicos Los Humeros y Las Derrumbadas. Estos últimos se encuentran a un nivel más bajo que las rocas circundantes.

Interpretación de imágenes de satélite

Al observar las imágenes de satélite, es posible dividir la región por su morfología y ambiente tectónico en distintas unidades: unidad que forma parte de la Sierra Madre Oriental y unidad que forma parte de la FVTM

La unidad que constituye parte de la Sierra Madre Oriental

Se distingue por tener un relieve abrupto en donde se puede apreciar dos sistemas de fallas y fracturas (fig II.3), el primero con una orientación general 45° al NE-SW y el segundo con una orientación 45° al NW-SE, que se puede relacionar con las fallas de cabalgaduras causadas por los esfuerzos compresivos de la orogenia Larámide.

La unidad que constituye parte de la Faja Volcánica Mexicana

Se distingue por la presencia de estructuras volcánicas, por ejemplo la caldera Los Humeros, la caldera Acoculco, el cofre de Perote y el volcán La Malinche. Dentro de esta unidad existen fracturas y fallas concéntricas que rodean las estructuras. El ambiente tectónico en el que se desarrollaron estas estructuras es de arco volcánico continental, relacionado con la subducción de la placa de Cocos en la placa Norteamericana.

Aluvión

La unidad más reciente está constituida principalmente por aluvión y se distingue por presentar un relieve plano.

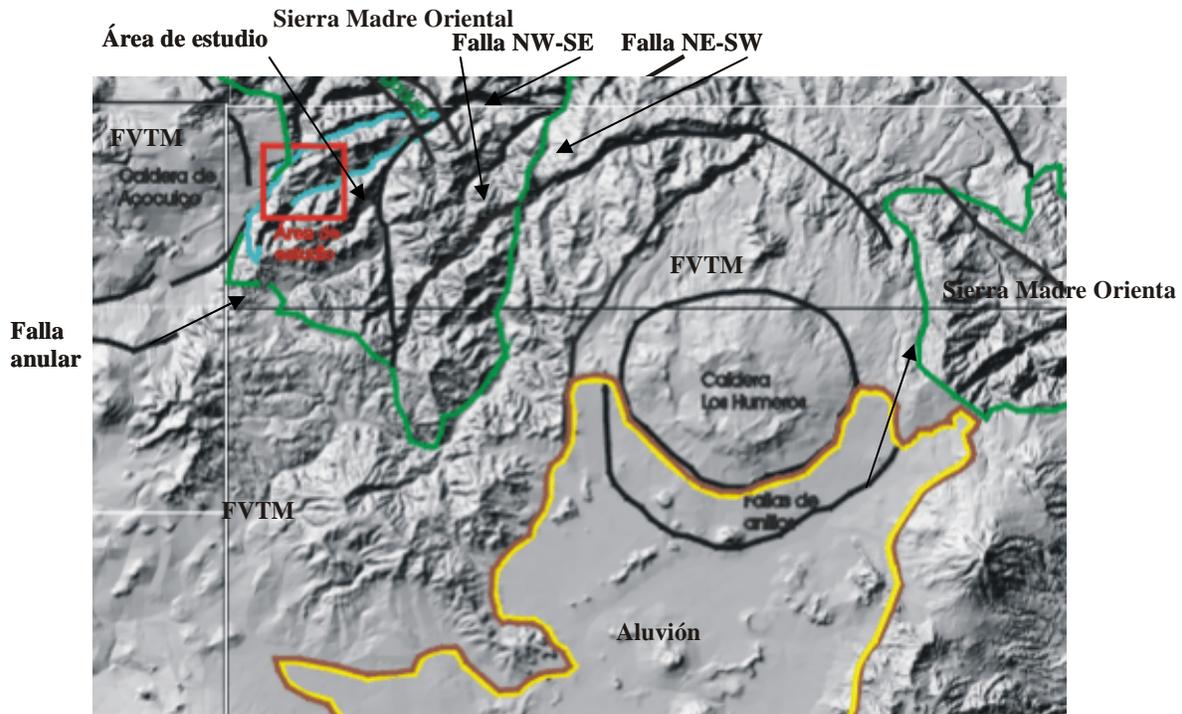
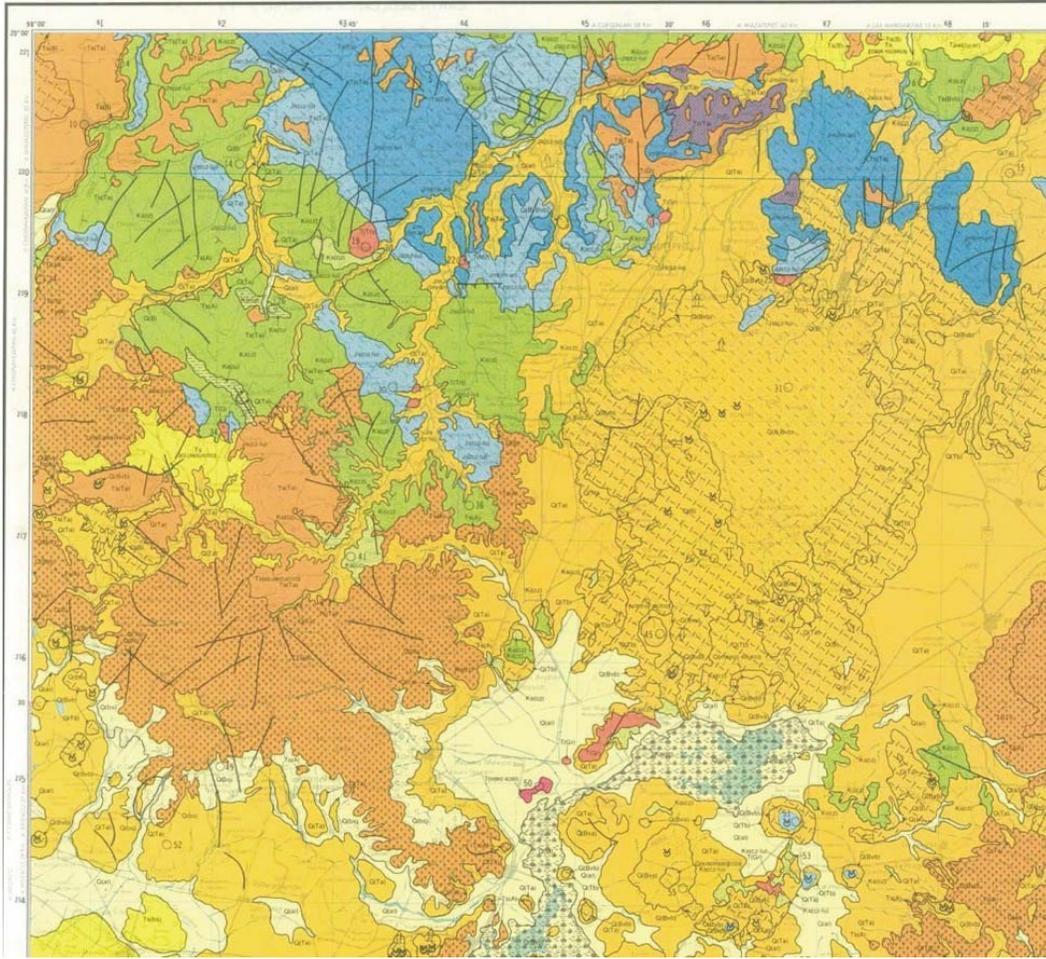


Fig II.3 Imagen de satélite Lansat escala 1 :500,000 :INEGI

Mapa geológico regional

El mapa geológico fig II.4 muestra las rocas paleozoicas esquistos de cuarzo y muscovita, íntimamente ligados a un batolito de composición granodiorítica y granítica; en conjunto, estas rocas constituyen un núcleo de grandes dimensiones que desde el punto de vista estructural corresponde a un domo alargado conocido como el Macizo de Teziutlán.

Alrededor de él se encuentran las distintas formaciones sedimentarias mesozoicas que tienen edades que van desde el Jurásico tardío hasta el Cretácico tardío, que son la continuación del anticlinorio de Huayacocotla y están alineadas con un rumbo general 45° NE-SW y por último se puede observar las distintas unidades volcánicas terciarias y cuaternarias representadas por las calderas Los Humeros y Acozulco, así como por distintos centros de emisión que se observa en la parte meridional del mapa.



CRONOESTRATIGRAFIA		LITOLOGIA		ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCANOSEDIMENTARIAS		ROCAS IGNEAS		ROCAS METAMORFICAS
						INTRUSIVAS	EXTRUSIVAS	
CENOZOICO	Terciario	CUATERNARIO Q		SUELOS Q			Q	
		Terciario Superior	PLIOCENO Tpl	Tpl-Q	Tpl	Tpl-Q		
			MIOCENO Tm	Tm	Tm	Tm		
		Terciario Inferior	OLIGOCENO Tc	Tc	Tc	Tc		
			EOCENO Te	Te	Te	Te		
			PALEOCENO Tpai	Tpai	Tpai	Tpai		
MESOZOICO	CRETACICO	CRETACICO SUPERIOR Ks	Ks	Ks	K	K	K	
		CRETACICO INFERIOR Kf	Kf	Kf	K	K	K	
	JURASICO	JURASICO SUPERIOR Jh	Jh	Jh	M	M	M	
		JURASICO MEDIO Jm	Jm	Jm	M	M	M	
		JURASICO INFERIOR Ji	Ji	Ji	M	M	M	
TRIASICO Tt	Tt	Tt	T	T	T			
PALEOZOICO	PALEOZOICO SUPERIOR Pa	Pa	Pa	P	P	P		
	PALEOZOICO INFERIOR Pn	Pn	Pn	P	P	P		
	PRECAMBRICO PC	PC	PC	PC	PC	PC		

Fig II.4 Carta geológica Veracruz E14-3, escala 1: 250000. SPP.

Se observa que las rocas que forman parte de la Sierra Madre Oriental, están constituidas por rocas sedimentarias calcáreas de edades que varían del Jurásico Medio al Cretácico Tardío, esta secuencia de rocas muestra una alineación NE-SW. Dentro de la Sierra Madre Oriental, existen sistemas de fallas de cabalgaduras que tienen aproximadamente el mismo rumbo que la alineación de las unidades mesozoicas y también se puede apreciar dos sistemas de fracturas con el siguiente rumbo: N-S y NW-SE. La Sierra Madre Oriental fue cubierta por material volcánico, debido a la actividad volcánica del Terciario y Cuaternario, dando origen a distintas estructuras volcánicas como son: la caldera Acoculco, la caldera Los Humeros, el Cofre de Perote, La Malinche, entre otros centros de emisión. El área de estudio se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental y entre las calderas: Los Humeros y Acoculco. La actividad volcánica dentro del área de estudio está relacionada con algunas de estas calderas.

III. Estratigrafía local.

En la región de San Miguel Tenango-Xonotla afloran de manera predominante, secuencias sedimentarias mesozoicas de ambiente marino, pertenecientes a las Formaciones Pimienta, Tamaulipas Superior e Inferior, Agua Nueva, San Felipe y Méndez, las cuales se encuentran plegadas, fracturadas, falladas y abarcan un periodo desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. Descansando de modo discordante sobre ellas, existen depósitos piroclásticos y cortando a toda la columna litoestratigráfica se encuentran algunos cuellos volcánicos, que tienen una composición química y mineralógica que corresponde a dacitas.

Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias que afloran en el área de estudio San Miguel Tenango-Xonotla están representadas por las Formaciones Pimienta, Tamaulipas Inferior y Superior, Agua Nueva, San Felipe y Méndez.

Formación Pimienta:

La unidad está constituida por una serie de calizas de color negro a gris oscuro, con texturas que varían de *mudstone a wackestone*, siendo el espesor de los estratos de 5 a 30 cm. Las calizas están intercaladas con capas de lutitas calcáreas laminares de color negro, ricas en materia orgánica. También presenta lentes y nódulos de pedernal negro. El espesor de la unidad varía de 60 a 500 m (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

La unidad aflora en el camino de San Miguel Tenango y Xonotla, entre los poblados San Antonio (611984 E, 2202730 N, UTM) y Xonotla (613596 E, 2203248 N, UTM).

• Relaciones estratigráficas

La Formación Pimienta cabalga sobre la Formación Agua Nueva, es decir su contacto es estructural, mientras que el contacto con la Formación Tamaulipas Inferior, que la sobreyace, es concordante y gradual.

• Edad

Se le asigna una edad del Titoniano medio- Titoniano tardío por la presencia de las amonitas *Kossmatia victoris* y *Pseudolissoceras citela* (Cantú-Chapa, 1971).

- **Ambiente de depósito**

Corresponde a un ambiente marino, en condiciones reductoras, relativamente profundo con aporte de material terrígeno y materia orgánica (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

Formación Tamaulipas Inferior

La unidad está constituida por calizas que presentan las siguientes características, mencionadas en orden ascendente:

Calizas de color gris con textura *wackestone a packstone*. El espesor de los estratos es grueso (en promedio 40 cm).

Calizas de color pardo claro con textura *mudstone a wackestone*. El espesor de los estratos varía de medio a grueso (entre 10 y 45 cm). Presenta lentes de pedernal y vetillas de calcita.

Caliza de color pardo con textura que varía de *mudstone a packstone*. El espesor de los estratos es delgado. Presenta nódulos y lentes de pedernal.

El espesor de la unidad varía de 60-220 m (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Relaciones estratigráficas**

Presenta un contacto tectónico por falla inversa con la Formación Agua Nueva. El contacto con la Formación Tamaulipas Superior, que la cubre, es concordante.

- **Edad**

Con base en los microfósiles: *Calpionella alpina Lorenz*, *Calpionella elíptica Cádiz*, *Tintinopsella cadischiana Colo*, se le ha asignó un edad del Berriasiano al Aptiano (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Ambiente de depósito**

Ambiente de plataforma externa y cuenca.

Formación Tamaulipas Superior

La unidad está constituida por una serie de calizas que presentan una textura que varía de *wackestone a packstone*, con nódulos de pedernal de color negro. El espesor de los estratos varía de delgado a grueso, presentando un color al fresco gris claro y gris oscuro, mientras que a la intemperie adquieren tonos rojizos a amarillentos. El espesor de la unidad varía de 80 a 400 m (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Relaciones estratigráficas**

Los contactos son concordantes con las formaciones que se hallan debajo y encima de ella (Fm. Tamaulipas Inferior y Fm Agua Nueva, respectivamente).

- **Edad**

Con base en microfósiles plantónicos (*Colomiella recta Bonet*, *C mexicana Bonet*, *Microcalamoides diversus Bonet* y *Rotalipora, sp.*, se le asigna una edad correspondiente al Albiano-Cenomaniano (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Ambiente de depósito**

El ambiente de depósito es de plataforma externa, de mar abierto de baja energía, con aporte moderado de material terrígeno (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

Formación Agua Nueva

La unidad está constituida por una serie de intercalaciones de calizas, lutitas negras y bandas de pedernal. Las calizas presentan una textura que varía de *mudstone a wackestone*, de color gris claro y oscuro al fresco y a la intemperie adquiere tonalidades amarillas. Las lutitas negras son laminares y carbonosas. El espesor de la unidad varía de 20 a 200 m, con base en los reportes de los pozos Gachupinate-1 y Tecuantepec-1 (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Relaciones estratigráficas**

Los contactos son concordantes con las formaciones que se hallan debajo y encima de ella (Fm. Tamaulipas Superior y Fm San Felipe, respectivamente).

- **Edad**

Con base en el registro fósil de radioalarios heterohelícidos, radiolarios, *Globotruncana sp.*, se le asigna una edad de Cenomaniano superior-Turoniano (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Ambiente de depósito**

El ambiente de depósito es de una plataforma restringida, en condiciones reductoras con aporte de terrígenos finos (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

Formación San Felipe

La unidad está constituida por una serie de intercalaciones de calizas, margas, lutitas bentónicas y horizontes tobáceos. Las calizas presentan una textura *wackestone*, las margas son de color verde, las lutitas son bentónicas laminares de color gris verdoso y los

horizontes tobáceos son de color verde olivo, con estratificación gradada, con piroclastos y fragmentos de cristales.

La característica principal de esta formación es la presencia de horizontes tobáceos.

Su espesor promedio es de 90m (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Relaciones Estratigráficas**

Los contactos son concordantes con las formaciones que se hallan debajo y encima de ella (Fm. Agua Nueva y Fm Méndez, respectivamente)

- **Edad**

Con base en radioalarios calcificados, *Marginotruncana sp.*, *Heterohelix sp.* y cámaras de foraminíferos plantónicos mal preservadas, se le asigna una edad de Santoniano-Coniaciano (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Ambiente de depósito**

El ambiente de depósito es de una plataforma abierta (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

Formación Méndez

La unidad está constituida principalmente por margas de color gris y gris verdoso, con intercalaciones de lutita calcáreas de color verde al fresco y de color amarillo a la intemperie. (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

El espesor de la unidad es de 150 a 176m, con base en los pozos Gachupinate-1 y Tecuantepec-1 (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Relaciones Estratigráficas**

El contacto inferior es concordante con la Formación San Felipe.

- **Edad**

Con base en la microfauna: *Globotruncana contusa*, *Globotruncana bulloides*, *Globotruncana avanceis* y *Globotruncana linneiana*, se le asignó una edad de Campaniano Medio-Maestrichtiano (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

- **Ambiente de depósito**

El ambiente de depósito es de mar abierto con una tendencia regresiva hacia el oriente, influenciado por un aporte de terrígenos finos (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

Rocas ígneas

Las estructuras volcánicas observadas en el área de San Miguel Tenango-Xonotla son cinco cuellos volcánicos, un domo y varios depósitos piroclásticos.

Descripción de los cuellos volcánicos

Los cuellos volcánicos adoptan una forma cilíndrica, que cortan a las formaciones sedimentarias y a los depósitos piroclásticos. Los cuellos observados son los: de San Miguel Tenango, San Antonio, el Pico del Águila y el Piedra Encimada (Ver Figura V.6).

IV.2.1.1 Cuello Pico del águila

Este cuello volcánico está constituido por dacitas con textura porfídica. Tiene una altura aproximada de 180 m y una anchura aproximada de 250 m. Está cortado por una falla normal con orientación 60° NE e inclinación de 62° SE, presenta además un sistema de diaclasas horizontales (Fig.. IV.1).

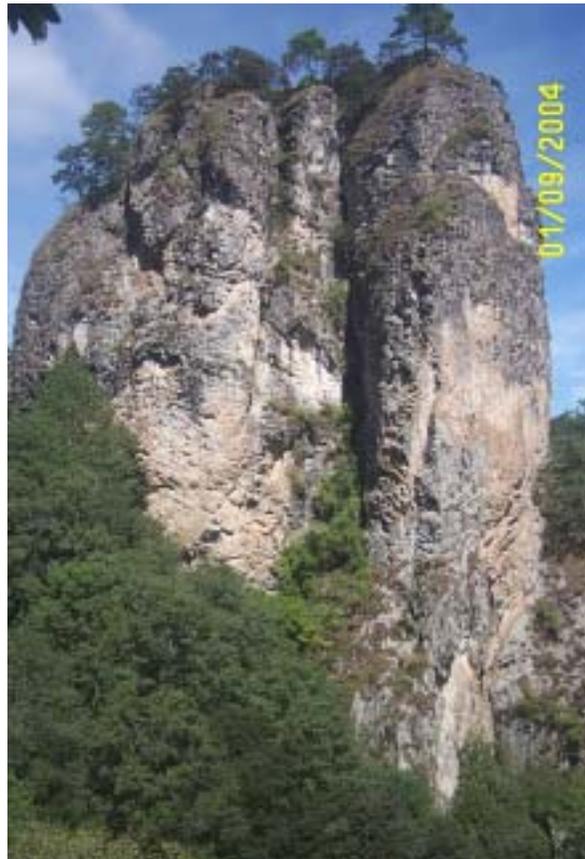


Fig.. IV.1 Pico del Águila

Cuellos de San Antonio

Cerca del poblado de San Antonio afloran dos cuellos volcánicos constituidos por dacitas con textura porfídica, que a continuación se describen:

Primer cuello volcánico

Este cuello volcánico se encuentra fracturado e intemperizado. El color es gris claro, tiene 8 m de altura por 50 m de anchura, muestra dos sistemas de diaclasas que tienen orientaciones 60° NW y 5° NE, con inclinaciones que varían entre 70° y 90°. Alrededor de él se observa que la roca está mucho más alterada, formando dos aureolas una de arcilla de color blanco y otra de arcilla de color rojizo.

Segundo cuello volcánico

Tiene color gris, es muy compacto, presenta vetillas rellenas de calcita. El cuello volcánico aflora aproximadamente unos 250 m sobre el camino que baja al poblado de San Antonio.

Cuello volcánico de la tercera sección de San Miguel Tenango

Este cuello volcánico está constituido por dacitas con textura porfídica. El cuello volcánico se encuentra fracturado e intemperizado (Fig. IV.2), su color es gris claro, tiene una altura aproximada 17 m. por 50 m de anchura y dos sistemas de diaclasas, con orientaciones 60° NW y 5° NE, e inclinaciones que varían entre 70° y 90°. Se observa óxidos de manganeso y hierro en forma dendrítica, así como vetillas calcita.



Fig. IV.2 Cuello de San Miguel Tenango

Cuello Piedra Encimada

Está fracturado e intemperizado, su color al fresco es gris claro y a la intemperie es gris. Tiene una altura aproximada de 120 m y la anchura medida en el río es de 80 m. El cuerpo está compuesto de bloques sobrepuestos de 2 a 4 m.

Las rocas que constituyen los cuellos presentan un color gris claro al fresco y pardo claro a la intemperie, con una textura porfídica en matriz afanítica. Los cristales observados son de feldespatos, cuarzo, biotita y anfíboles. Los minerales secundarios son calcita en forma de vetas, y óxidos de manganeso y hierro en forma dendrítica. Las rocas que constituyen los cuellos volcánicos son dacitas.

Descripción del domo de Xonotla

La estructura tiene una forma convexa, abarca una circunferencia de aproximadamente 300 m de radio y parece que fue provocada por un cuerpo intrusivo hipabisal. Las rocas que constituyen el domo se encuentran muy intemperizadas, ya que se observa arenas de cuarzo y arcillas producidas por el proceso de intemperismo. Los afloramientos son pequeños, compactos, fracturados e intemperizados de color gris claro. Las rocas que lo constituyen son dacitas similares a la de los cuellos volcánicos.

Las diferencias entre los distintos cuellos volcánicos y el domo son las siguientes:

- Las rocas del domo de Xonotla están más alteradas que las rocas de los cuellos de San Miguel, San Antonio y Pico del Águila.
- El domo de Xonotla tienen una matriz más fina y el tamaño de los cristales de biotita es más pequeño que el de los cuellos volcánicos.

Descripción de los depósitos piroclásticos

En la región afloran depósitos piroclásticos de los primeros eventos volcánicos de carácter explosivo, que arrastraron los fragmentos de rocas calcáreas al destaparse los conductos por donde se expulsó el material volcánico. No existen evidencias de volcanismo posterior, debido a que la secuencia volcánica probablemente se erosionó. Los depósitos piroclásticos forman una capa con un espesor máximo de 150 m con una disposición en forma de herradura de 2 km aproximadamente (Fig. V.6). Los afloramientos están constituidos por cenizas, lapilli y bloques, en donde los líticos de dacita, caliza y pedernal predominan sobre los cristales. El material está poco consolidado y la matriz está constituida por carbonato de calcio. Existen en el depósito algunos líticos que tienen una aureola de alteración de arcillas de color blanco; alrededor de ésta se observa otra aureola

con óxidos de manganeso y hierro. La muestra fue tomada de un afloramiento al SE de San Miguel Tenango en la coordenada 611526E, 2201165N UTM.

Existen dos tipos de depósitos piroclásticos: los de caída libre (*ash-fall*) y los derrames de cenizas. (*ash-flow*).

- Los depósitos de caída libre se encuentran cubriendo a los derrames de cenizas y sobre la secuencia de rocas sedimentarias: El color al fresco es gris, mientras que a la intemperie es pardo y de depósitos no consolidados a semiconsolidados. Los líticos se componen de fragmentos volcánicos, calizas, lutitas y pedernal, existiendo además cristales de cuarzo y plagioclasas de 5 mm. Las partículas están cementadas por carbonato de calcio. Los afloramientos se distinguen por una disposición paralela al relieve y una clasificación granulométrica de buena a moderada. Presenta gradación normal. Los depósitos se encuentran moderadamente erosionados.

- Derrames de cenizas. Cubren discordantemente las secuencias sedimentarias mesozoicas y concordantemente a los depósitos caída libre, el color al fresco es gris y a la intemperie es pardo y están semiconsolidados a consolidados. Los fragmentos líticos varían de 1mm a 1 m. Los líticos se componen de fragmentos volcánicos, calizas, lutitas y pedernal. Existen además cristales de cuarzo y plagioclasas de 5 mm. Las partículas están cementadas por carbonato de calcio. Se distinguen por presentar una mezcla mal clasificada de material.

Petrografía de las rocas ígneas

Se caracterizaron las rocas ígneas de las estructuras volcánicas encontradas en el área, mediante la utilización del microscopio óptico, microscopio electrónico y el análisis de difracción de rayos X.

Descripción en el microscopio óptico

Fueron elaboradas 12 láminas delgadas de las rocas que constituyen los cuellos volcánicos, el domo y los depósitos piroclásticos para su estudio mediante microscopía óptica de polarización. El estudio se realizó empleando un microscopio Zeiss modelo Axiolab de la Facultad de Ingeniería. El procesamiento de las imágenes se realizó usando un analizador de imágenes Carl Zeiss Axiocam Emulation.

Cuellos volcánicos y el domo

Las rocas que constituyen los cuellos volcánicos y el domo de Xonotla presentan las mismas características generales (ver la tabla IV.1):

Textura porfídica de fenocristales, cuyo tamaño varía de grano medio (1 mm a 0.5 cm) a grano grueso (0.5 a 3 cm) rodeados de una matriz con textura criptocristalina e intersertal, en donde los intersticios fueron rellenados por calcita secundaria y por la matriz.

Al analizar la matriz en la microsonda se determinó que está constituida principalmente por cuarzo y en menor proporción por plagioclasas (andesina, labradorita y oligoclasa) como minerales esenciales. Los minerales accesorios son: hornblenda, biotita y magnetita.

Las rocas se clasificaron como dacitas.

Las diferencias que se puede observar entre los distintos cuellos volcánicos con el domo de Xonotla y el cuello de Piedra Encimada, es que estos últimos tienen una matriz mas fina, el tamaño de los cristales de biotita es más pequeño y los minerales ferromagnesianos están muy alterados.

IV.3.1.2 Depósitos piroclásticos

Las rocas que forman los depósitos piroclásticos están constituidas principalmente por componentes líticos (Fig. IV.14) de dacita, caliza y lutita. En menores cantidades se observa cristales de cuarzo y plagioclasas (andesina-oligoclasa). La matriz está compuesta por carbonato de calcio.

Tabla IV.1 Características petrográficas.

# Muestra	Textura	Minerales Primarios	Minerales accesorios	Minerales secundarios	Matriz	Características	Clasificación
Pico del Águila FPA-02	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.3, IV.4 y IV.5
San Antonio FPA-061	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.6
San Antonio FPA-03	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.7 y IV.8
San Miguel FPA-08	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.9
Piedra encimada PV-04	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.10
Domo de Xonotla PV-01 PV-02 PV-03 PV-05	Porfídica e intersertal	Andesina, oligoclasa y cuarzo	Biotita, hornblenda y opacos	Calcita	Criptocris talina	Plgs zonificadas Biotita de grano grueso	Dacita Fig. IV.11, IV.12 y IV.13



Fig. IV.3 Muestra FPA-02 Pico del Águila. Se observa fenocristales de biotita, hornblenda y plagioclasa alterada dentro de una matriz criptocristalina.

La fotografía fue tomada con Luz Polarizada y Analizada (LPA) y con aumento de 25.

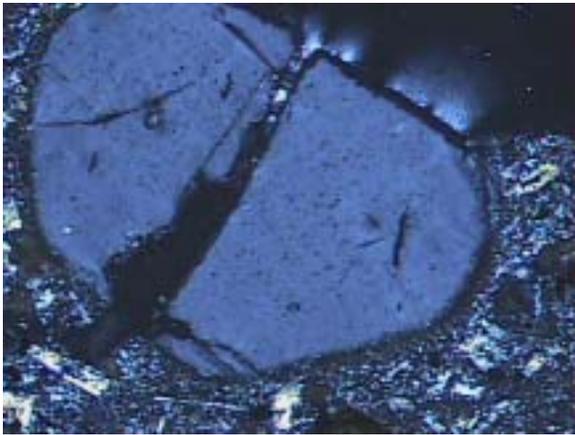


Fig. IV.4 Muestra FPA-02 Pico del Águila. Se observa un fenocristal de cuarzo fracturado.

La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

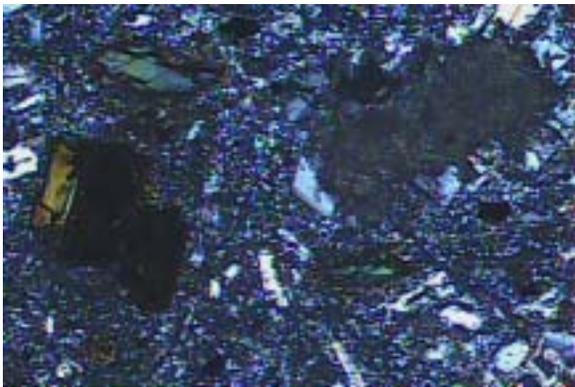


Fig. IV.5 Muestra FPA-06.1 cuello de San Antonio. Se observa fenocristales de biotita, plagioclasas y hornblenda dentro de una matriz criptocristalina.

La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

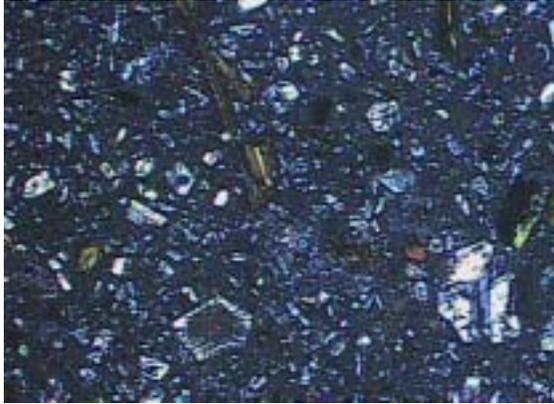


Fig. IV.6 Muestra FPA-02 Pico del Águila. Se observa fenocristales de plagioclasa fracturada y zoneada, cuarzo, hornblenda y biotita dentro de una matriz criptocristalina. La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

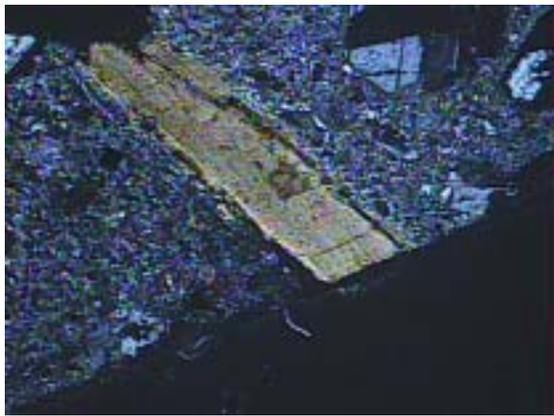


Fig. IV.7 muestra FPA-03 cuello de San Antonio. Se observa un fenocristal de biotita dentro de matriz criptocristalina, La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.



Fig. IV.8 Muestra FPA-03 cuello de San Antonio. Aparece un fenocristal de plagioclasa fracturada dentro de una matriz criptocristalina. La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.



Fig. IV.9 Muestra FPA-08 cuello de San Miguel Tenango. Se observa fenocristales de plagioclasa zonificada.

La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.



Fig.IV.10 Muestra PV-04 Piedra Encimada. Se observa fenocristales de plagioclasa, biotita, cuarzo y calcita dentro de una matriz criptocristalina.

La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.



Fig. IV.11 Muestra PV-01 domo de Xonotla. Se observa fenocristales de plagioclasa fracturada dentro de una matriz criptocristalina.

La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

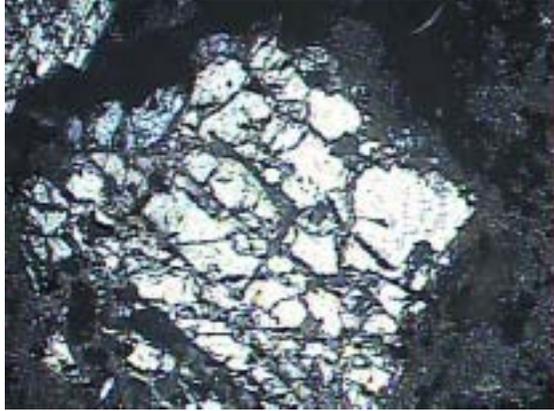


Fig. IV.12 Muestra PV-03 domo de Xonotla. Se observa un fenocristal de plagioclasa fracturada dentro de una matriz criptocristalina. La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.



Fig. IV.13 Muestra PV-05 domo de Xonotla. Se observa fenocristales de plagioclasa fracturada. La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

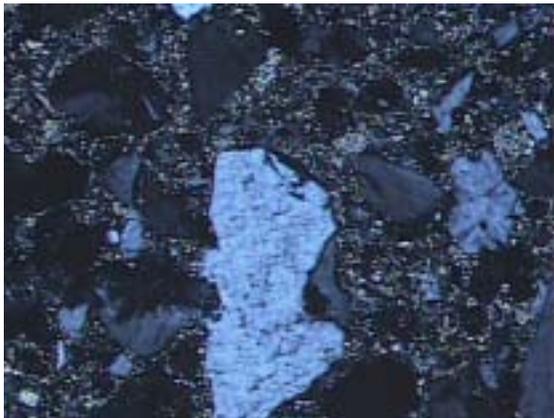


Fig. IV.14 Muestra FPA-06 depósitos de caída libre. Se observa fragmentos angulosos de caliza, feldespatos, cuarzo, dentro de una matriz de carbonatos. La fotografía fue tomada con LPA y con aumento de 25.

Microscopio electrónico de barrido (MEB) y microsonda electrónica

En este equipo fueron analizadas dos láminas delgadas pulidas del domo de Xonotla y del cuello Pico del Águila, con el fin de conocer la composición de la matriz y los cristales que constituyen la roca.

Generalidades de la microsonda

El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio Universitario de Petrología (LUP), el cual cuenta con instrumentos como microscopios ópticos, microsonda electrónica y técnicas de procesamiento de imágenes.

La microsonda electrónica de barrido es una técnica analítica para muestras sólidas en las que los rayos X se obtienen a través de un haz electrónico. Los espectros de rayos X contienen líneas que son características de los elementos presentes.

El equipo utilizado puede ser manejado en el modo de microscopio electrónico o en el modo de microsonda electrónica. El aparato empleado en este estudio es de la marca JEOL modelo JXA-8900R.

Cuando el equipo se utiliza en modo de microscopio electrónico es posible obtener imágenes y análisis semicuantitativos de los rayos X característicos de un elemento seleccionado. Cuando se utiliza en modo de microsonda electrónica de barrido pueden obtenerse análisis cuantitativos con gran exactitud de la concentración de elementos, que tengan un rango mayor de 40-50 ppm . También el equipo nos permite obtener imágenes de composición. El rango de elementos detectables oscila entre el B (boro) y U (uranio); hasta el momento únicamente se cuenta con dos espectrómetros, cada uno con dos cristales que pueden medir todo el rango de elementos detectables.

Trabajo de laboratorio

Es conveniente realizar un croquis de la muestra en donde se indique los campos que se desea analizar, el cual puede hacerse con la ayuda del microscopio petrográfico y a través de fotografías tomadas desde una cámara instalada en el microscopio óptico, lo que permite ahorrar tiempo en el uso de la microsonda. Además se obtiene información de las características petrográficas de los mismos minerales que serán analizados posteriormente con el microscopio electrónico y la microsonda. Los minerales opacos son como guías en el croquis, pues se aprecian con gran facilidad con electrones secundarios o retrodispersados en la microsonda. Los campos de interés se marcan con tinta china o

indeleble, encerrándolos en un círculo y después se unen por líneas a una línea principal (Fig. IV.15), formando un sistema de caminos. Por último se dibuja en papel el croquis de los campos que nos sirven de referencia.

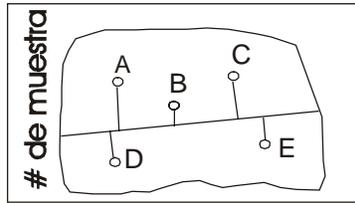


Fig. 15 Croquis de los campos

Los campos de interés seleccionados en las láminas presentan las características siguientes:

- Plagioclasas zonificadas
- Vetillas dentro de los cristales
- Alteración que afecta a los cristales
- Minerales opacos
- Matriz general de la roca

Análisis del cuello volcánico Pico del Águila

En el análisis de la roca que constituye el Pico del Águila, los campos que se seleccionaron fueron los siguientes:

- Campo A: está representado por una plagioclasa zonificada
- Campo C: está representado por una hornblenda alterada
- Campo E: está representado por una biotita

Campo A:

Se puede observar una plagioclasa zonificada (Fig. IV.16), cuya composición varía de oligoclasa-andesina-labradorita (Tabla IV.2); así como fenocristales de hornblenda y magnetita; todos los cristales están rodeados por una matriz constituida por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. Como mineral secundario está la calcita relleno de las fracturas y las oquedades.

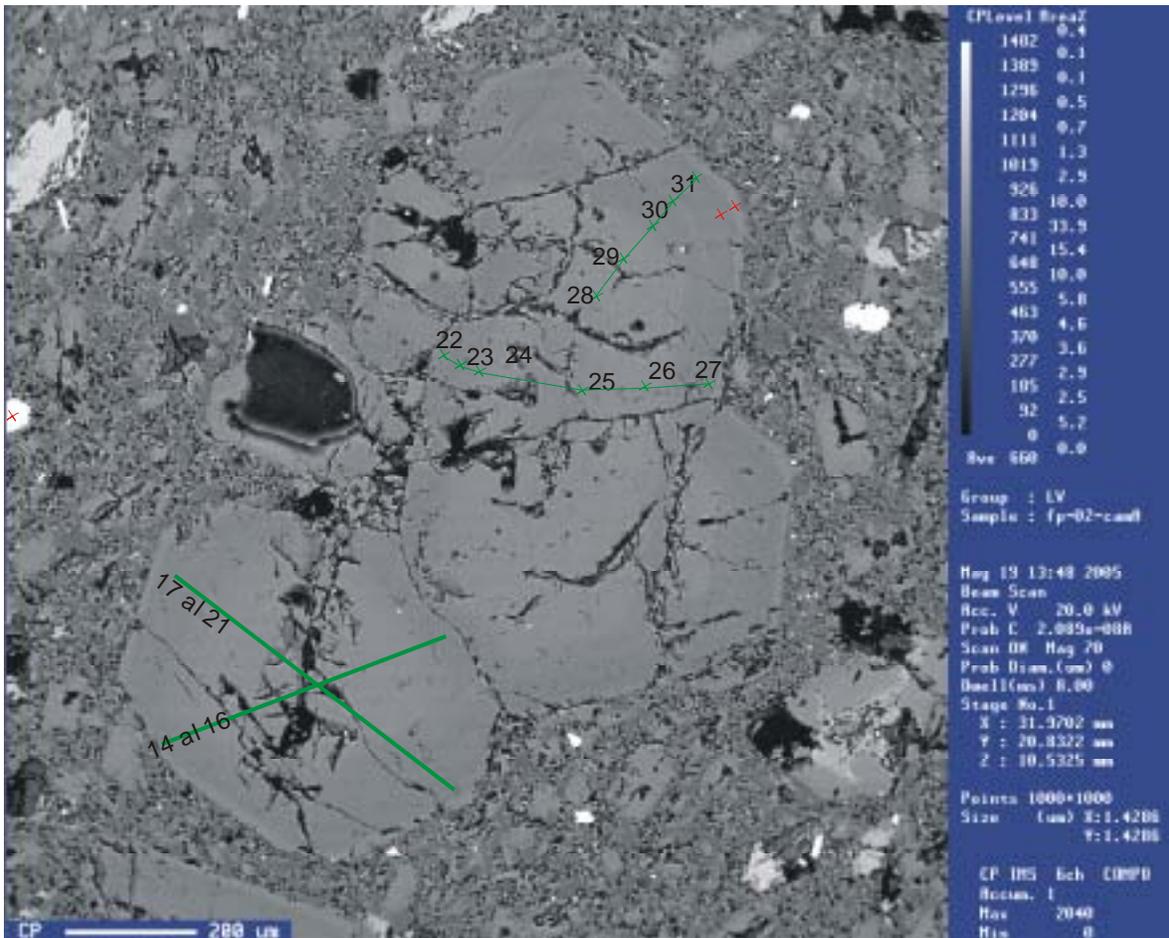


Fig. III.16 Imagen tomada en MEB del campo A, en donde se observa una plagioclasa zonificada que constituye la roca que forma el cuello volcánico del Pico del Águila (muestra FPA-02). Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos representados en la imagen por las X y líneas, mientras que los números nos permiten localizar los resultados de los análisis de estos puntos en las Tabla III.2

Los análisis cuantitativos indican que la composición dentro del mineral varía de la siguiente manera:

- Entre los puntos 14 y 16, la plagioclasa varía en su composición de andesina-labradorita.
- Entre los puntos 17 y 21, la plagioclasa varía en su composición de labradorita-andesina-oligoclasa.
- Entre los puntos 22 y 27, la plagioclasa varía en su composición de oligoclasa-andesina.
- Entre los puntos 28 y 31, la plagioclasa varía en su composición de andesina-oligoclasa

Tabla IV.2 de Análisis cuantitativos:

	SiO₂	Al₂O₃	CaO	Na₂O	K₂O	mol Or	mol Ab	mol An	Mineral
13	59.19	24.32	6.67	7.28	0.30	1.23	65.57	33.21	<i>Andesina-Labradorita</i>
14	56.64	26.56	9.42	5.26	0.26	1.82	49.36	48.82	<i>Andesina</i>
15	55.49	26.33	9.31	3.36	0.37	1.94	38.51	59.54	<i>Andesina-Labradorita</i>
16	55.19	25.72	9.35	3.14	0.24	2.83	36.74	60.43	<i>Andesina-Labradorita</i>
17	55.48	26.17	9.53	3.20	0.36	1.79	37.10	61.10	<i>Andesina-Labradorita</i>
18	55.54	25.73	9.19	3.27	0.31	2.78	38.09	59.13	<i>Andesina-Labradorita</i>
19	57.74	25.50	8.17	6.45	0.20	1.82	57.76	40.42	<i>Andesina</i>
20	58.11	24.80	7.64	6.46	0.23	1.23	59.73	39.04	<i>Andesina</i>
21	59.23	23.85	6.67	6.96	0.21	1.40	64.48	34.11	<i>Andesina-Oligoclase</i>
22	60.74	23.94	6.32	7.31	0.31	1.25	66.85	31.91	<i>Andesina-Oligoclase</i>
23	59.97	24.03	6.69	7.18	0.35	1.85	64.80	33.36	<i>Andesina-Oligoclase</i>
24	58.60	24.90	7.76	6.77	0.20	2.03	59.99	37.98	<i>Andesina</i>
25	57.12	26.23	8.77	6.24	0.22	1.18	55.60	43.21	Andesina
26	56.33	26.35	9.38	6.11	0.21	1.27	53.43	45.29	<i>Andesina</i>
27	56.96	26.74	9.16	5.94	0.18	1.24	53.33	45.43	Andesina
28	56.21	26.64	9.39	5.84	0.31	1.09	52.38	46.54	<i>Andesina</i>
29	57.00	26.60	9.18	6.11	0.17	1.78	53.67	44.56	Andesina
30	60.27	24.05	6.77	7.23	0.35	1.01	65.25	33.75	Andesina-Oligoclase
31	59.48	24.50	6.97	7.22	0.21	2.04	63.89	34.07	<i>Andesina-Oligoclase</i>

Con base en la imagen y en los resultados de los análisis, se puede determinar que la zonificación varía de labradorita-andesina-oligoclase.

Campo C

Se observa una plagioclase fracturada, que está alterada en el centro por la calcita que aprovechó las fracturas para filtrarse dentro del mineral. También se observa varios cristales de magnetita titanífera (Fig. IV.17).

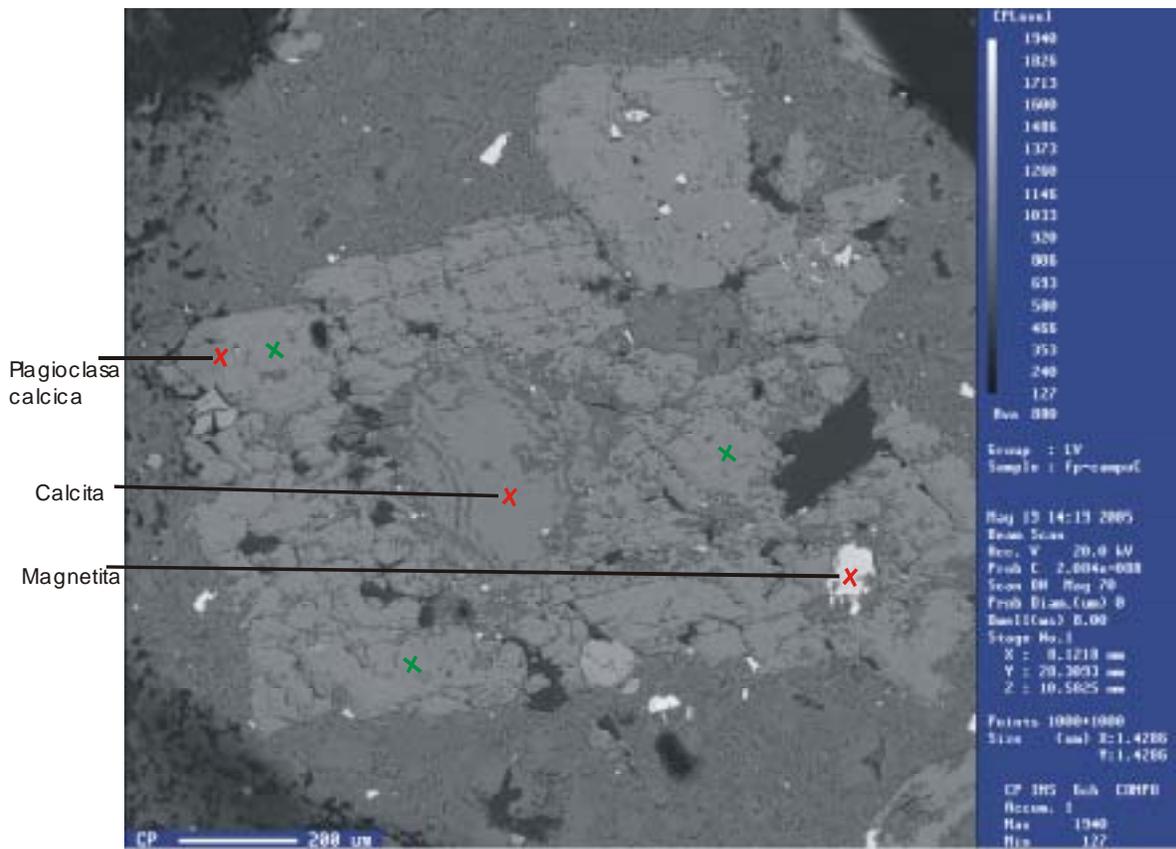


Fig. IV.17 Imagen tomada en MEB del campo C de la roca que constituye el cuello volcánico Pico del Águila (muestra FPA-02), en donde se observa una plagioclasa fracturada, en la cual las fracturas y oquedades están rellenas por calcita. Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos, representados en la imagen por las X

Campo E

En este campo (Fig. IV.18) se hicieron varios análisis semicuantitativos y se escogió el campo Eb (Fig. IV.19) para analizar la matriz.

Los resultados indican la presencia de cristales de apatita, magnetita titanífera, plagioclasa y biotita. La matriz está constituida principalmente por un material compuesto por SiO_2 y Al_2O_3 (Fig. IV.20)

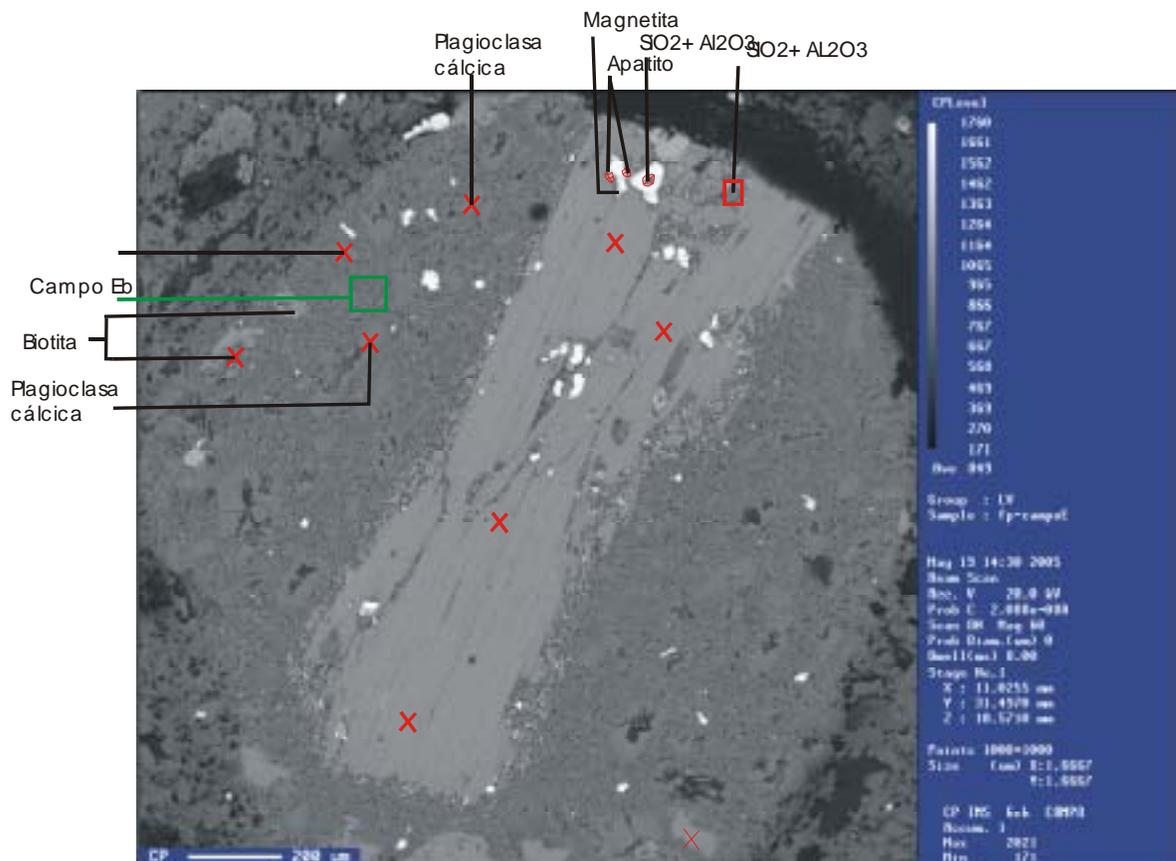


Fig. IV.18 Imagen tomada en MEB del campo E de la roca que constituye el cuello volcánico Pico del Águila (muestra FPA-02), en donde se observa una biotita y además se identifican minerales de magnetita titanífera, apatito y plagioclasa. Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos representados en la imagen por las X.

Campo Eb

La matriz está compuesta de plagioclasa, algunos pequeños cristales de feldespato potásico, cuarzo y arcilla. El cuarzo y las arcillas forman la mayoría de los cristales de la matriz.

Campo A

Se realizaron análisis cuantitativos y cuantitativos con lo que se concluyó que el campo (Fig. IV.21) está constituido por un cristal de plagioclasa zonificada, cuya composición varía de oligoclasa a labradorita (Tabla IV.3.2.4.1); también se identificó apatita y magnetita.

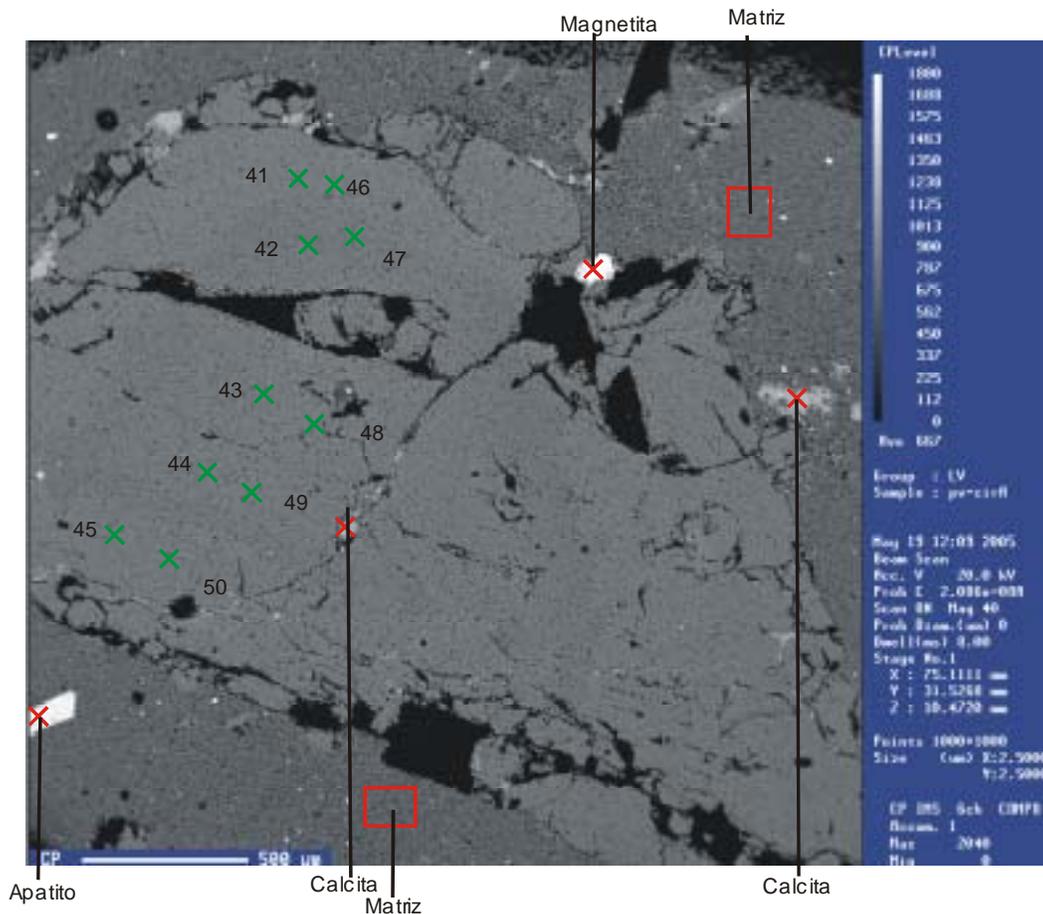


Fig. IV.21 Imagen tomada en MEB del campo A, en donde se observa una plagioclasa zonificada de la roca que forma el domo de Xonotla (muestra PV-05). Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos, representados en la imagen por las X, mientras que los números nos permiten localizar los resultados de los análisis de estos puntos en las Tabla IV.3

Los análisis cuantitativos indican que la composición dentro del mineral varía de la siguiente manera:

- Entre los puntos 41-45 del mineral varía de oligoclasa-andesina-labradorita-andesina.
- Entre los puntos 46-50 del mineral varía de oligoclasa-andesina-labradorita-andesina.

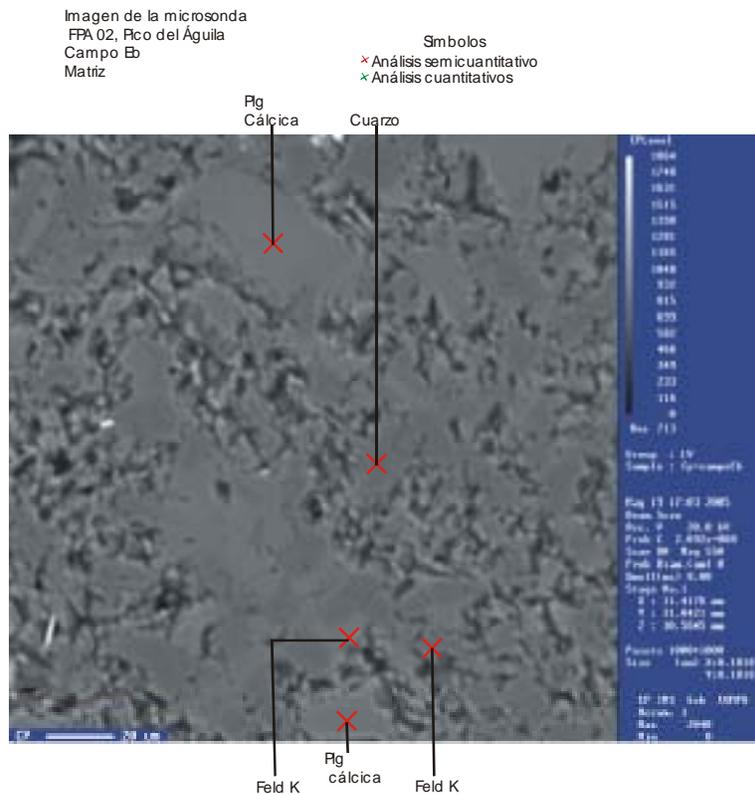


Fig. IV.19 Imagen tomada en MEB del campo Eb de la roca que constituye el cuello volcánico Pico del Águila (muestra FPA-02), en donde se analizaron los minerales (cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico) que forman la matriz. Los análisis semicuantitativos se realizaron en los puntos representados en la imagen por las X.

Dentro del mineral se observa lo siguiente:

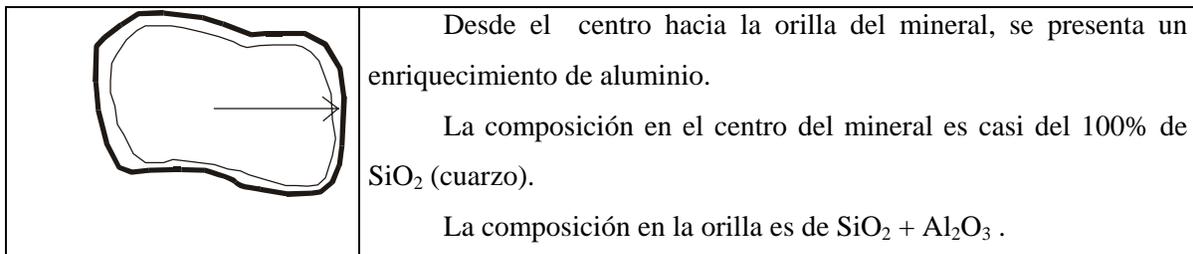


Fig. IV.20

IV.3.2.4 Análisis del domo de Xonotla

Se escogieron tres campos:

- Campo A: plagioclasa zonificada
- Campo B: plagioclasa fracturada
- Campo C: matriz

Tabla III.3 Campo A de la muestra PV-01 del domo de Xonotla.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Mol Or	mol Ab	mol An	Mineral
41	59.53	24.68	7.09	7.13	0.21	1.25	63.73	35.02	Andesina-Oligoclasa
42	59.92	24.71	7.08	7.16	0.20	1.16	63.91	34.93	Andesina-Labradorita
43	58.63	25.28	7.80	6.47	0.18	1.06	59.36	39.58	<i>Andesina</i>
44	59.32	25.08	7.36	7.00	0.22	1.29	62.44	36.27	Andesina
45	57.68	25.04	8.03	6.49	0.18	1.05	58.76	40.19	<i>Andesina</i>
46	60.83	24.42	6.67	7.04	0.18	1.09	64.93	33.98	Andesina-Oligoclasa
47	59.79	24.77	6.88	7.32	0.18	1.02	65.14	33.83	Andesina
48	60.01	24.94	7.17	7.07	0.20	1.15	63.35	35.50	Andesina
49	58.81	25.63	8.01	6.57	0.15	0.90	59.22	39.88	Andesina-Labradorita
50	59.90	25.35	7.34	6.80	0.21	1.25	61.83	36.92	Andesina

Campo B

En el campo se observa un cristal de plagioclasa fracturada con vetillas de calcita, cristales de calcita, magnetita y plagioclasa (Fig. III.22). La matriz que está alrededor de los cristales está compuesta principalmente por SiO₂ y en menor proporción por Al₂O₃, CaO y K₂O.

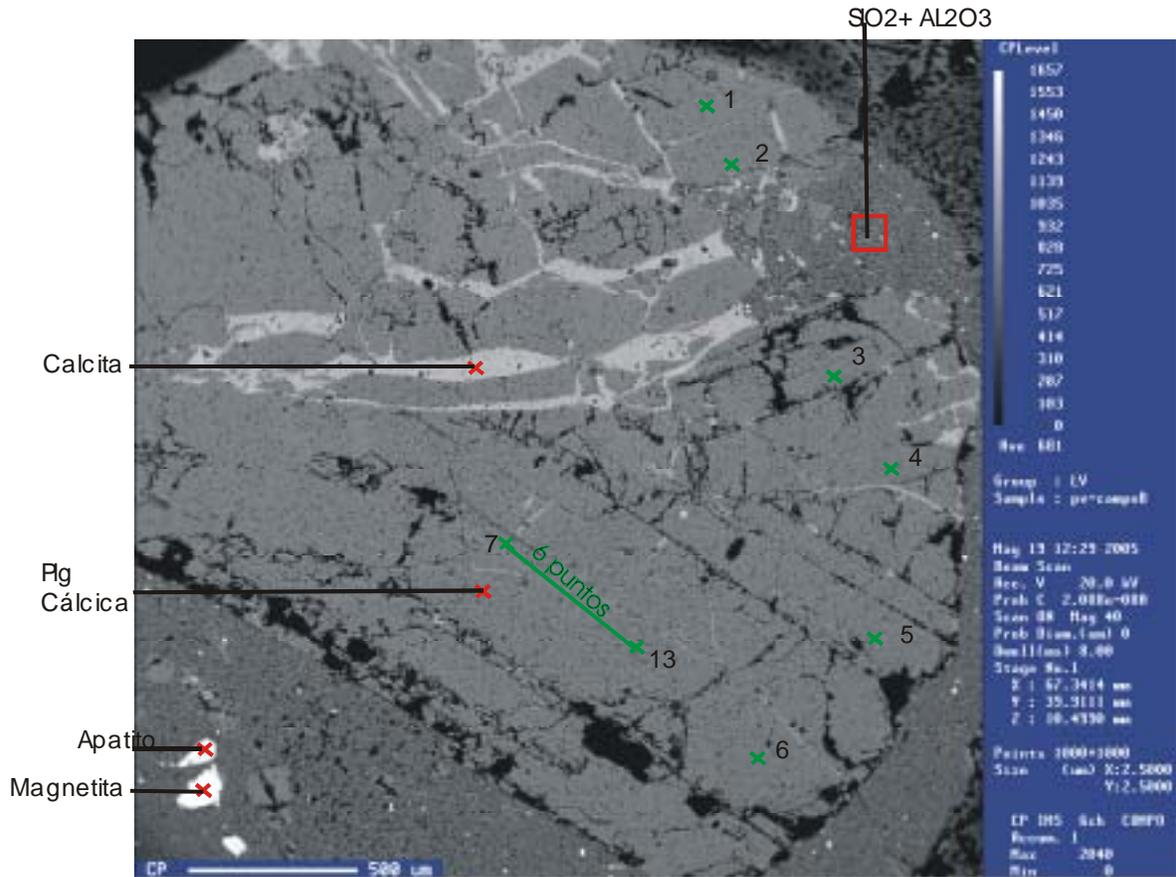


Fig. III.22 Imagen tomada en MEB del campo A, en donde se observa una plagioclasa zonificada de la roca que forma el domo de Xonotla (muestra PV-05). Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos representados en la imagen por las X, mientras que los números nos permiten localizar los resultados de los análisis de estos puntos en la Tabla III.4

Los resultados de los análisis indican que la composición dentro del mineral varía de la siguiente manera:

- En los puntos 1 al 6 la plagioclasa varía en su composición de andesina-oligoclasa-andesina-oligoclasa-andesina.
- Entre los puntos 7 y 13, la plagioclasa varía en su composición de oligoclasa-andesina-oligoclasa-andesina-labradorita.
- También se determinó por análisis cuantitativos la presencia de minerales de calcita, apatita, magnetita y plagioclasa.

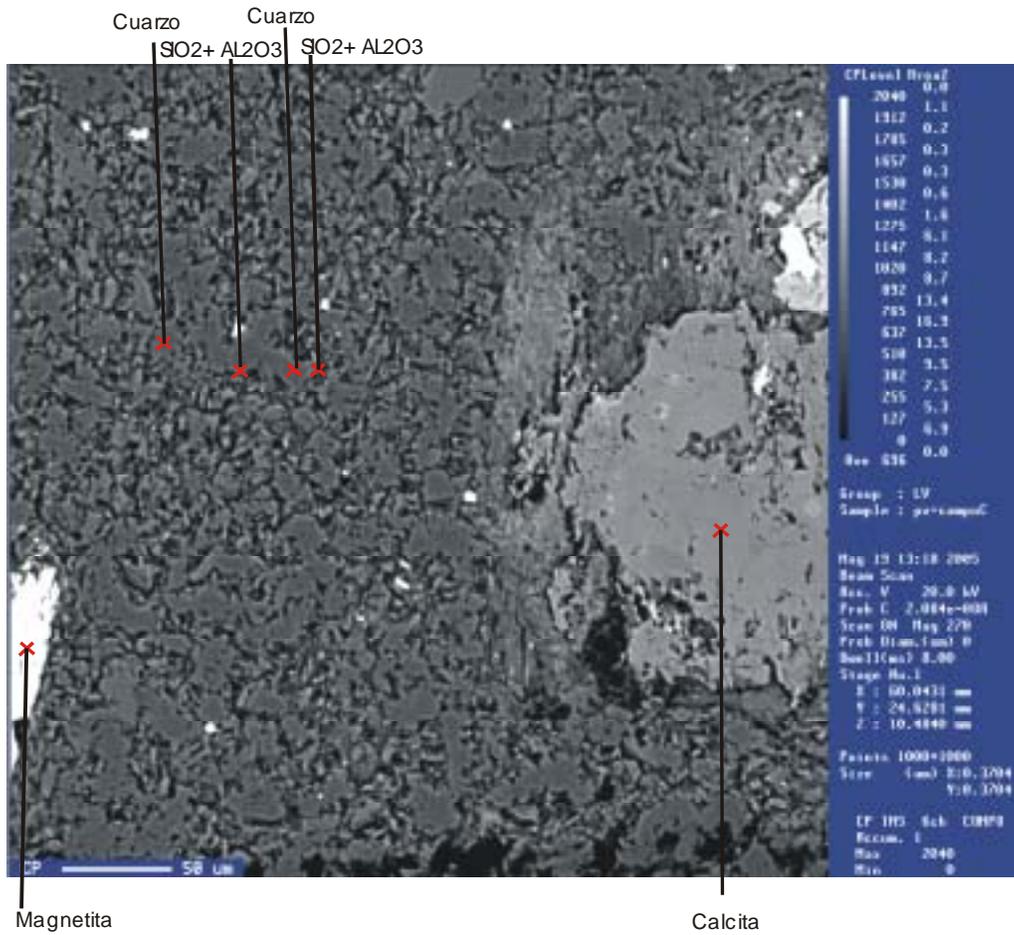


Fig. IV.23 Imagen tomada en el MEB del campo C de la roca que constituye el domo de Xonotla (muestra PV-05), en donde se analizaron los minerales (cuarzo, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$) que forman la matriz. Los análisis cuantitativos se realizaron en los puntos representados en la imagen por las X.

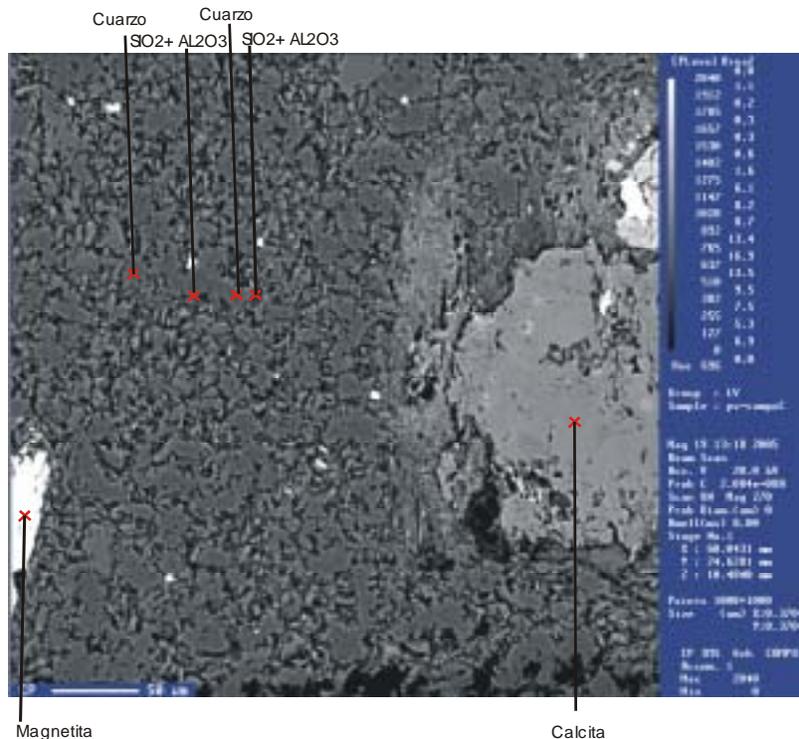
Tabla III.4 Análisis cuantitativos del Campo B, muestra PV-01, Domo de Xonotla

Dacita del cuello de Xonotla

	Si2O	Al2O3	CaO	Na2O	% en mol Or	% en mol Ab	% en mol An	Mineral
1	59.635	25.195	7.402	7.133	1.08	62.87	36.05	Andesina
2	59.269	25.249	7.58	6.97	1.61	61.45	36.93	Andesina
3	61.006	24.038	6.173	7.726	1.38	68.42	30.21	Oligoclasa-Andesina
4	60.327	23.759	6.506	7.421	1.29	66.50	32.22	Andesina-Oligoclasa
5	60.132	24.636	6.828	7.11	1.61	64.28	34.11	Andesina-Oligoclasa
6	60.577	25.395	7.373	7.081	1.26	62.68	36.06	Andesina
7	62.228	24.494	6.298	6.816	1.59	64.80	33.61	Oligoclasa-Andesina
8	61.96	24.029	6.178	5.641	1.71	46.13	52.16	Oligoclasa-Andesina
9	60.112	24.946	7.1	6.963	1.24	63.17	35.59	Andesina
10	59.876	24.39	6.857	6.882	1.95	63.23	34.82	Andesina
11	61.109	24.038	6.251	7.516	2.39	66.88	30.74	Oligoclasa-Andesina
12	59.818	24.476	6.925	7.078	1.84	63.72	34.45	Andesina-Oligoclasa
13	59.186	24.319	6.674	7.282	1.23	65.57	33.21	Andesina-Labradorita

Campo C

Este campo se marcó con el fin de estudiar la composición de la matriz que está alrededor de los cristales, la cual consiste principalmente de SiO₂ y en menor proporción Al₂O₃, CaO y K₂O (Fig. III.23).



Análisis de difracción de rayos X

Se realizaron análisis de difracción de Rayos X en cinco muestras de las rocas que constituyen los cuellos volcánicos (Pico del Águila, Piedra Encimada, San Antonio y San Miguel Tenango) y el domo de Xonotla.

Los análisis de difracción de rayos X tuvieron las siguientes finalidades:

- Identificar a los minerales de alteración, los cuales no fueron observados claramente en los difractogramas.
- Confirmar la presencia de los minerales ya identificados por otras técnicas.

Generalidades sobre la difracción de rayos X

El conocimiento de la distribución de los átomos, iones o moléculas en los cristales, es decir, su estructura, se basa principalmente en la aplicación del análisis de difracción de rayos X. La arquitectura de las estructuras cristalinas se basa en las distribuciones periódicas de los átomos en una red tridimensional, las cuales son regulares, separadas por distancias constantes y características. En los diagramas de difracción estos espacios constantes se traducen en una distribución característica de máximos (picos) que permiten identificar el mineral. Además, puesto que la intensidad de estos picos es proporcional al número de planos que difractan, es decir la concentración de una estructura específica, el método hace posible la evaluación cuantitativa. (Besoain E.,1985).

De lo anterior se resume que cada mineral tiene distribuciones e intensidades características de picos, por lo que se ha elaborado tablas y diagramas de los minerales que nos ayudan a identificarlos.

Difractogramas

En los difractogramas (Figs. IV.24, IV.25, IV.26, IV.27 y IV.28) se confirmó la presencia de los minerales cuarzo, biotita, andesina y hornblenda (Tabla IV.5)

Tabla IV.5. Minerales identificador por el análisis de difracción de rayos X, en donde andesina (Ads), cuarzo (Qz), biotita (Bt) y hornblenda (Hbl).

Lugar	# de muestra	Minerales identificados	# de Fig.ura
Pico de Águila	FPA-02	Qz, Ads, Hbl y Bt	IV.3.3.2.1
Piedra Encimada	PV-04	Qz, Ads, Hbl y Bt	IV.3.3.2.2
Domo de Xonotla	PV-01	Qz y Ads	IV.3.3.2.3
San Miguel Tenango	FPA-08	Qz, Ads y Hbl	IV.3.3.2.4
San Antonio	FPA-06.1	Qz, Ads y Hbl	IV.3.3.2.5

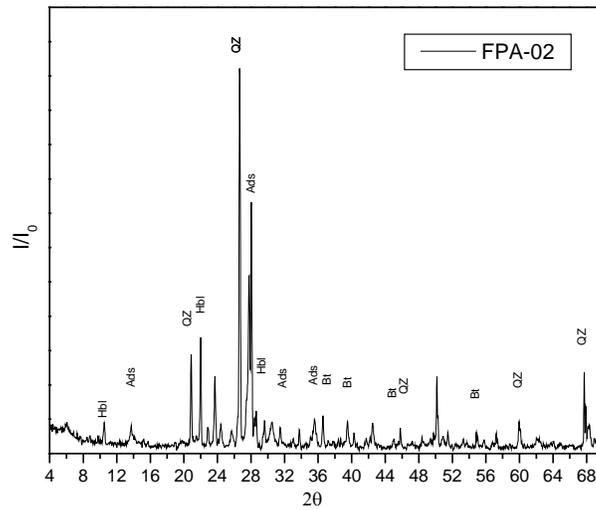


Fig. IV.24 Diagrama de difracción de rayos X del cuello Pico del Águila.

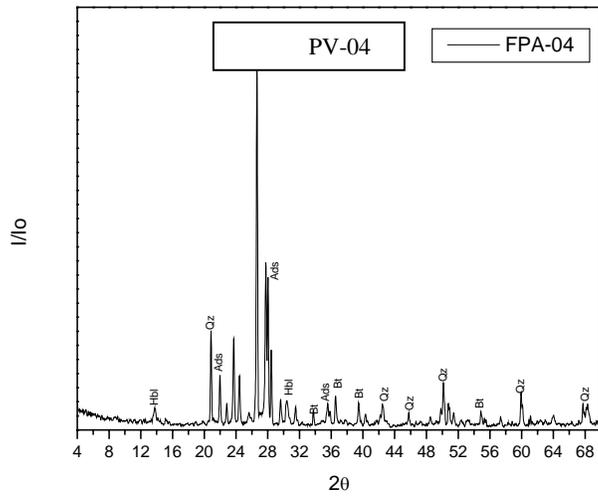


Fig. IV.25 Diagrama de difracción de rayos X del domo de Xonotla.

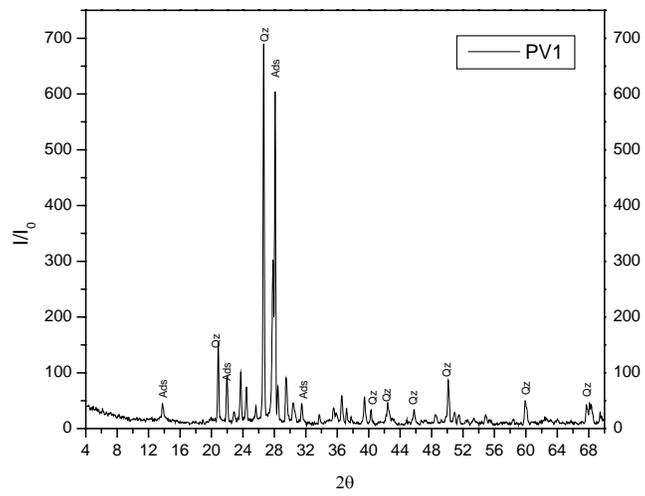


Fig. IV.26 Diagrama de difracción de rayos X del domo de Xonotla.

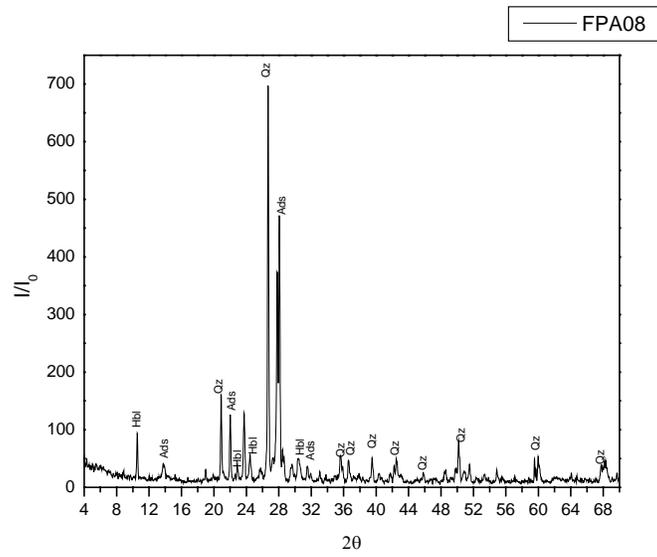


Fig. IV.27 Diagrama de difracción de rayos X del cuello de San Miguel Tenango.

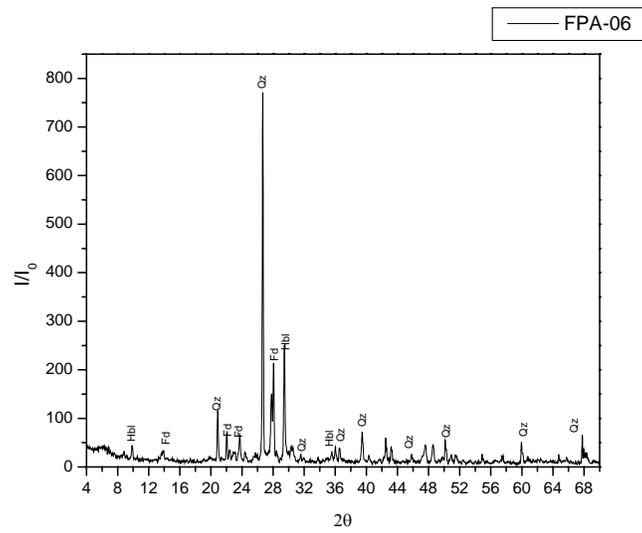


Fig. IV.28 Diagrama de difracción de rayos X del cuello de San Antonio.

V. Geología estructural.

El marco estructural que predomina en el área es el resultado de los efectos compresivos de la orogenia Larámide y de la tectónica distensional del Terciario medio, que dieron origen a la Sierra Madre Oriental y a la FVTM, respectivamente (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

La región de estudio se encuentra en la Sierra Madre Oriental, entre las calderas de Acoculco y Los Humeros, por lo que la actividad volcánica puede estar relacionada con el evento distensivo que produjo la FVTM.

Fotointerpretación

Por medio del análisis de las fotografías aéreas, se puede dividir la región en tres zonas, que presentan rasgos geomorfológicos, unidades litológicas y lineamientos estructurales característicos. Las zonas son las siguientes (Fig. V.1).

- La unidad sedimentaria.
- Mesa de Zacatlán.
- Zona de estructuras volcánicas.

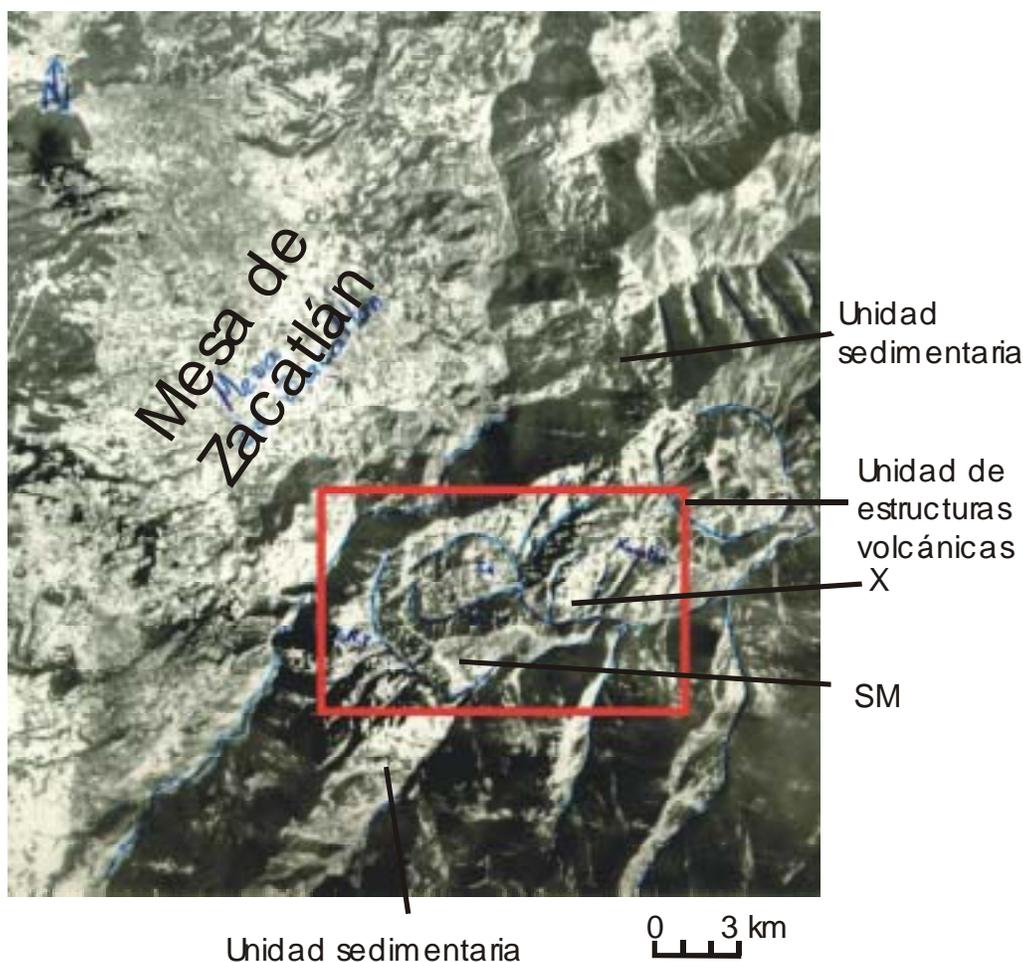


Fig. V.1. En la fotografía aérea, escala 1:10000, se observa las diferentes zonas: La unidad sedimentaria, la Mesa de Zacatlán y la zona de estructuras volcánicas: San Miguel (SM) y Xonotla (X). El rectángulo limita la región de estudio.

Unidad sedimentaria

Está compuesta por secuencias de calizas y lutitas del Mesozoico, que forman una sierra que tiene una altura promedio de 2000 m.s.m.m., con un parteaguas de orientación general hacia 45° NE. Presentan una deformación compresiva, resultado de la orogenia Larámide, que dio lugar a un complejo de pliegues y cabalgaduras denominado Anticlinorio de Huayacocotla (Ochoa-Camarillo *et al.*, 1992)

El drenaje es recto, orientado de 30 a 70° al NE-SW, al parecer controlado estructuralmente. También se aprecian fracturas con una tendencia hacia el NW, que coinciden con las fallas de cabalgadura del Anticlinorio de Huayacocotla.

Sobre las secuencias sedimentarias se presentan algunos lineamientos estructurales con tendencia hacia al NW, observados en fotografías aéreas (Fig.V.1), imágenes satelitales y en campo, que representan los contactos entre algunas formaciones (por ejemplo, Fm.

Pimienta con Fm. Agua Nueva), los cuales coinciden con el *trend* NW del anticlinorio de Huayacocotla.

Los ejes de los pliegues del área de San Miguel en general están orientados hacia el NW-SE, obtenidos a partir del *software Stereonet* de los datos de campo (Fig. V.2). La tendencia NW-SE de los ejes es semejante a la del complejo de pliegues del Anticlinorio de Huayacocotla (Yáñez,1982).

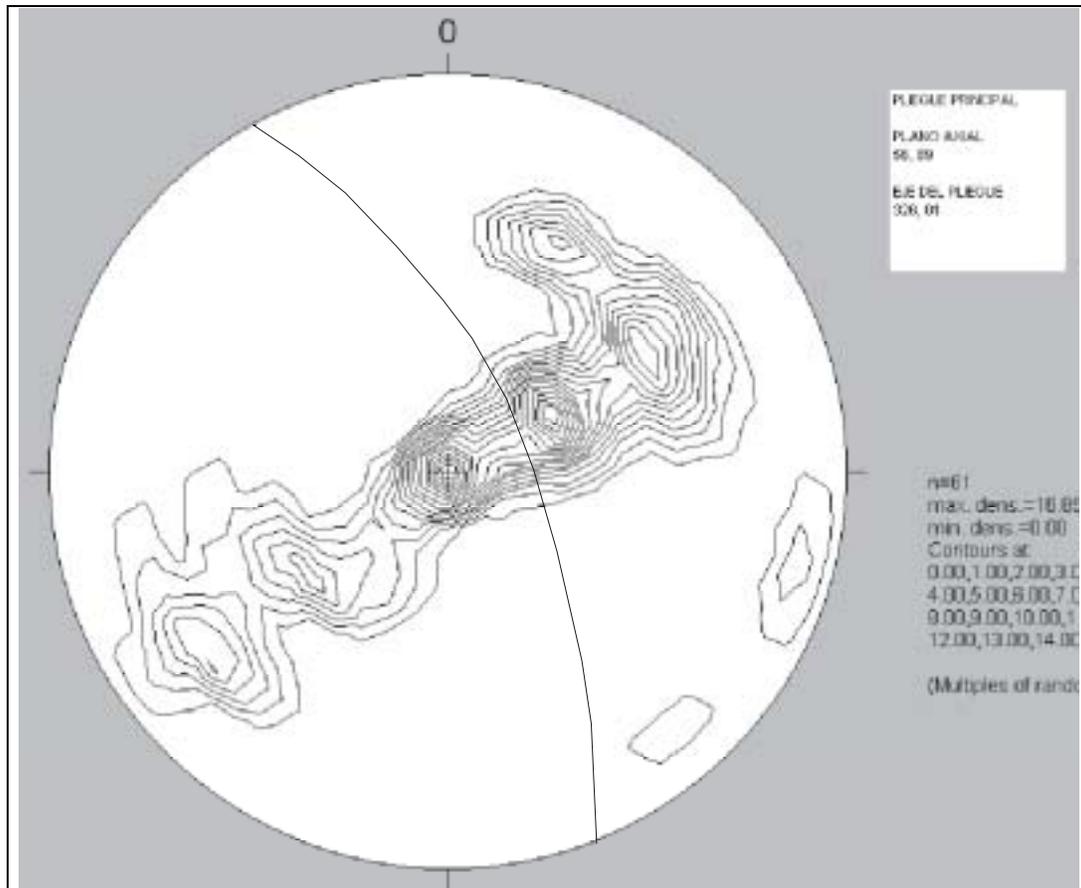


Fig. V.2 Representación general de la tendencia NW-SE de los ejes de pliegues en el área de San Miguel.

Mesa de Zacatlán

La Mesa de Zacatlán se encuentra yaciendo bajo el poblado del mismo nombre y se localiza fuera del área de estudio. Está constituida por una secuencia volcánica con basaltos en la base hasta ignimbritas en la cima, con un espesor aproximado de 250 m y descansa sobre rocas sedimentarias del Mesozoico. Esta mesa forma probablemente parte de los depósitos de la caldera de Acozulco, debido a su cercanía (Fig. V.1).

Unidad de estructuras volcánicas.

Está caracterizada por presentar tres estructuras circulares alineadas 70° al NE (Fig. V.1), alineamiento que posiblemente esté controlado por una zona de falla por donde salieron a la superficie los productos volcánicos. Las estructuras presentan las siguientes características:

- Fallas anulares
- Hundimiento
- Diámetros que varían entre 2 y 3 km..
- Mineralización

Estas estructuras posiblemente se formaron a partir de un volcán que se erosionó, quedando como evidencia de la actividad volcánica los conductos por donde se expulsó el material (cuellos volcánicos) y los depósitos piroclásticos de los primeros eventos eruptivos. El hundimiento y fallas anulares parecen deberse a un pequeño colapso provocado por la misma actividad volcánica.

Estructura volcánica de San Miguel Tenango

La estructura volcánica de San Miguel se encuentra hacia el oeste del *trend* $N70^\circ E$ y se distingue por su mejor arreglo circular (Fig. V.1). Dentro de ella se tienen depósitos de tobas líticas de 150 m de espesor, que descansan sobre la serie sedimentaria mesozoica (Formaciones Pimienta, Tamaulipas Superior, Agua Nueva y San Felipe) y cortando estos depósitos existen varios cuellos volcánicos (Pico del Águila, San Antonio y San Miguel).

Además de las fallas anulares, se puede distinguir dos sistemas de fallas normales: uno orientado $N45-60^\circ W$ y otro $N50-60^\circ E$ (Fig. V.3).

Estructura volcánica de Xonotla

La estructura volcánica de Xonotla se ubica en medio del *trend* $NE70^\circ$ (Fig. V.1.). Dentro de ella se encuentran secuencias sedimentarias cortadas por el domo de Xonotla y el cuello de Piedra Encimada. El sistema de fallas dentro de la estructura tiene una orientación 45° NE-SW.

Finalmente relacionado con el vulcanismo tardío, se presentan depósitos hidrotermales asociados a brechas y vetas de Ag-Mn que enmarcan el último evento en la creación de las calderas en el área de San Miguel Tenango-Xonotla

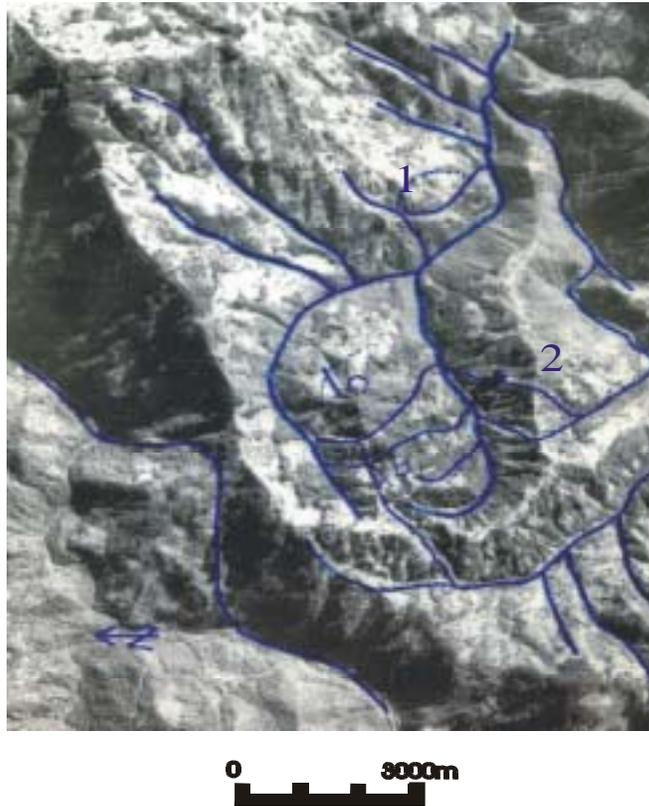


Fig. V.3 Fotografía aérea donde se pueden observar las dos estructuras volcánicas: San Miguel y Xonotla, con los sistemas de fracturas-fallas característicos de cada estructura.

Mapa geológico del área de San Miguel Tenango-Xonotla

Con la información obtenida en campo y con la ayuda de las fotografías aéreas, se realizó un mapa geológico local (Fig. V.4).

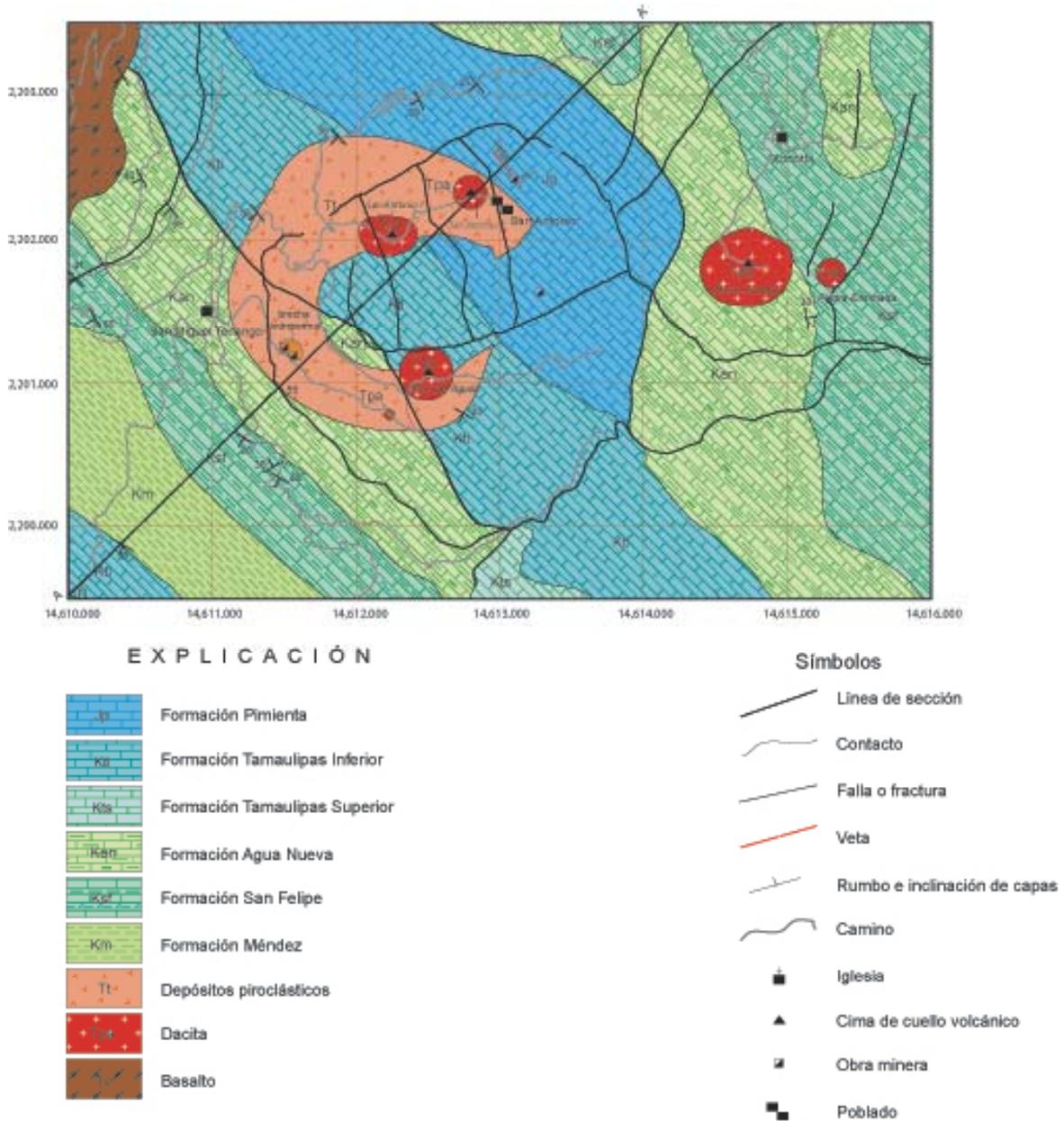


Fig. V.4 Mapa geológico del área de San Miguel Tenango-Xonotla

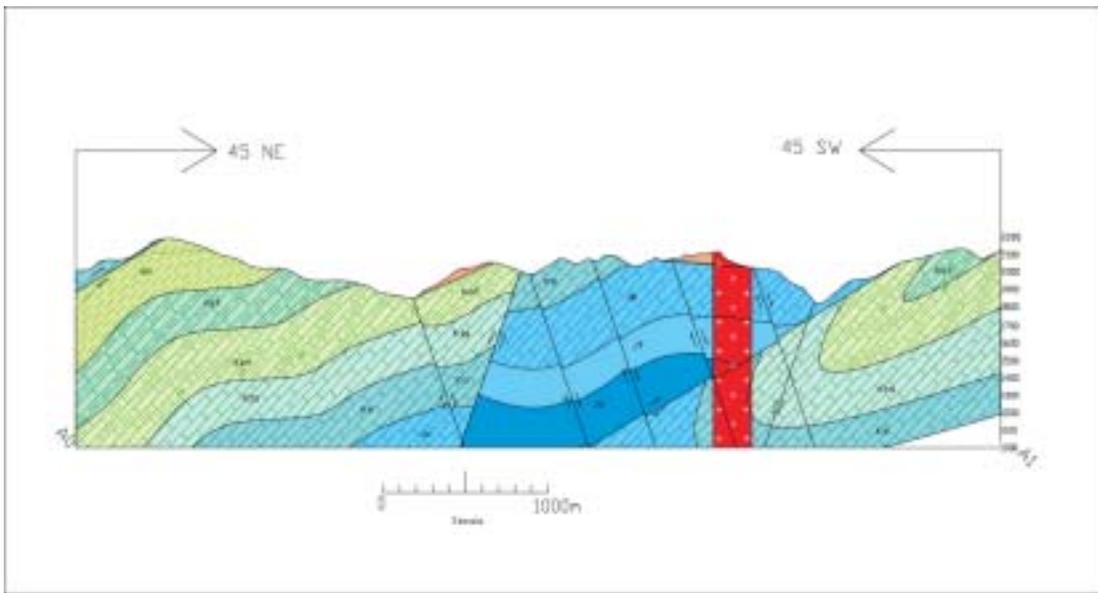


Fig. V.5 Sección Ao-A1 del área de San Miguel Tenango-Xonotla. Texto explicativo igual al de la Fig. V.2.1

IV. Geología estructural.

El marco estructural que predomina en el área es el resultado de los efectos compresivos de la orogenia Larámide y de la tectónica distensional del Terciario medio, que dieron origen a la Sierra Madre Oriental y a la FVTM, respectivamente (Tapia-Crespo *et al.*, 2001).

La región de estudio se encuentra en la Sierra Madre Oriental, entre las calderas de Acoculco y Los Humeros, por lo que la actividad volcánica puede estar relacionada con el evento distensivo que produjo la FVTM.

Fotointerpretación

Por medio del análisis de las fotografías aéreas, se puede dividir la región en tres zonas, que presentan rasgos geomorfológicos, unidades litológicas y lineamientos estructurales característicos. Las zonas son las siguientes (Fig. IV.1).

- La unidad sedimentaria.
- Mesa de Zacatlán.
- Zona de estructuras volcánicas.

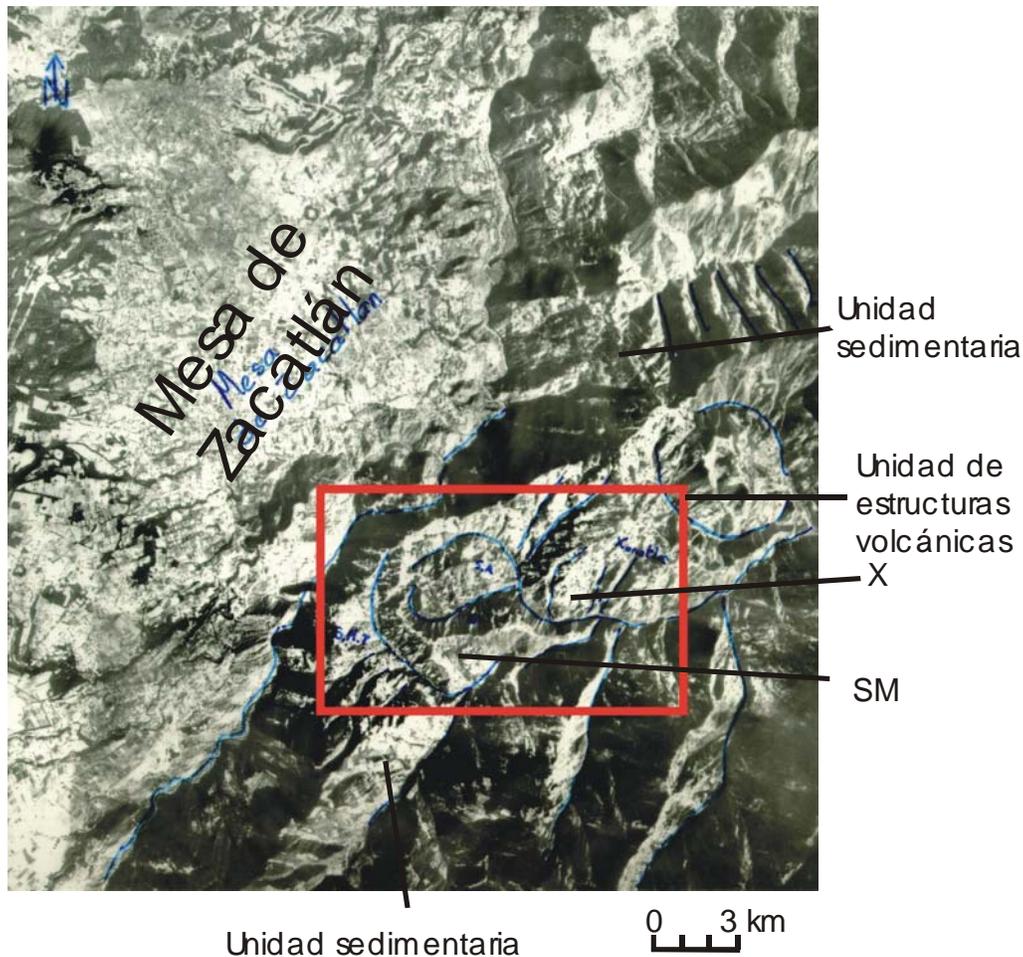


Fig. IV.1. En la fotografía aérea, escala 1:10000, se observa las diferentes zonas: La unidad sedimentaria, la Mesa de Zacatlán y la zona de estructuras volcánicas: San Miguel (SM) y Xonotla (X). El rectángulo limita la región de estudio.

Unidad sedimentaria

Está compuesta por secuencias de calizas y lutitas del Mesozoico, que forman una sierra que tiene una altura promedio de 2000 m.s.m.m., con un parteaguas de orientación general hacia 45° NE. Presentan una deformación compresiva, resultado de la orogenia Larámide, que dio lugar a un complejo de pliegues y cabalgaduras denominado Anticlinorio de Huayacocotla (Ochoa-Camarillo *et al.*, 1992)

El drenaje es recto, orientado de 30 a 70° al NE-SW, al parecer controlado estructuralmente. También se aprecian fracturas con una tendencia hacia el NW, que coinciden con las fallas de cabalgadura del Anticlinorio de Huayacocotla.

Sobre las secuencias sedimentarias se presentan algunos lineamientos estructurales con tendencia hacia al NW, observados en fotografías aéreas (Fig.IV.1), imágenes satelitales y en campo, que representan los contactos entre algunas formaciones (por

ejemplo, Fm. Pimienta con Fm. Agua Nueva), los cuales coinciden con el *trend* NW del anticlinorio de Huayacocotla.

Los ejes de los pliegues del área de San Miguel en general están orientados hacia el NW-SE, obtenidos a partir del *software Stereonet* de los datos de campo (Fig. IV.2). La tendencia NW-SE de los ejes es semejante a la del complejo de pliegues del Anticlinorio de Huayacocotla (Yáñez,1982).

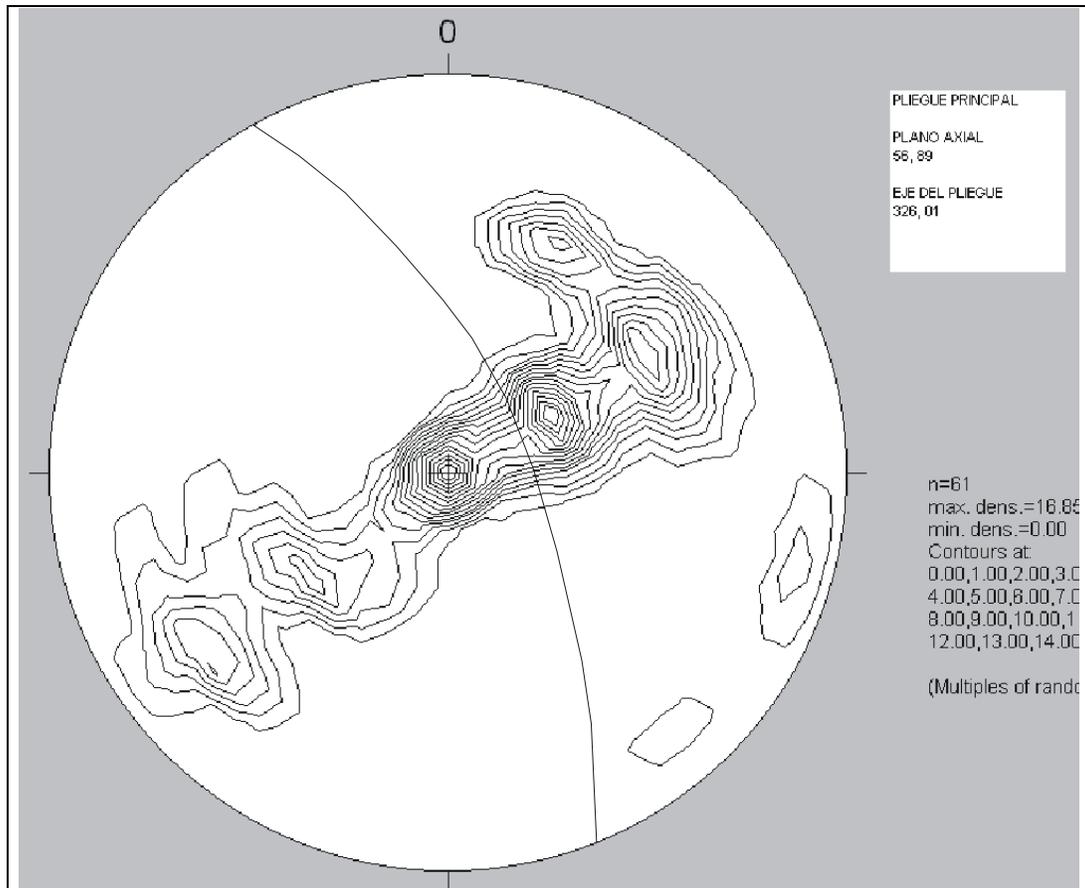


Fig. IV.2 Representación general de la tendencia NW-SE de los ejes de pliegues en el área de San Miguel.

Mesa de Zacatlán

La Mesa de Zacatlán se encuentra yaciendo bajo el poblado del mismo nombre y se localiza fuera del área de estudio. Está constituida por una secuencia volcánica con basaltos en la base hasta ignimbritas en la cima, con un espesor aproximado de 250 m y descansa sobre rocas sedimentarias del Mesozoico. Esta mesa forma probablemente parte de los depósitos de la caldera de Acozulco, debido a su cercanía (Fig. IV.1).

Unidad de estructuras volcánicas.

Está caracterizada por presentar tres estructuras circulares alineadas 70° al NE (Fig. IV.1), alineamiento que posiblemente esté controlado por una zona de falla por donde salieron a la superficie los productos volcánicos. Las estructuras presentan las siguientes características:

- Fallas anulares
- Hundimiento
- Diámetros que varían entre 2 y 3 km..
- Mineralización

Estas estructuras posiblemente se formaron a partir de un volcán que se erosionó, quedando como evidencia de la actividad volcánica los conductos por donde se expulsó el material (cuellos volcánicos) y los depósitos piroclásticos de los primeros eventos eruptivos. El hundimiento y fallas anulares parecen deberse a un pequeño colapso provocado por la misma actividad volcánica.

Estructura volcánica de San Miguel Tenango

La estructura volcánica de San Miguel se encuentra hacia el oeste del *trend* N70°E y se distingue por su mejor arreglo circular (Fig. IV.1). Dentro de ella se tienen depósitos de tobas líticas de 150 m de espesor, que descansan sobre la serie sedimentaria mesozoica (Formaciones Pimienta, Tamaulipas Superior, Agua Nueva y San Felipe) y cortando estos depósitos existen varios cuellos volcánicos (Pico del Águila, San Antonio y San Miguel).

Además de las fallas anulares, se puede distinguir dos sistemas de fallas normales: uno orientado N45-60°W y otro N50-60°E (Fig. IV.3).

Estructura volcánica de Xonotla

La estructura volcánica de Xonotla se ubica en medio del *trend* NE70° (Fig. IV.1.). Dentro de ella se encuentran secuencias sedimentarias cortadas por el domo de Xonotla y el cuello de Piedra Encimada. El sistema de fallas dentro de la estructura tiene una orientación 45° NE-SW .

Finalmente relacionado con el vulcanismo tardío, se presentan depósitos hidrotermales asociados a brechas y vetas de Ag-Mn que enmarcan el último evento en la creación de las calderas en el área de San Miguel Tenango-Xonotla



0 3000m

Fig. IV.3 Fotografía aérea donde se pueden observar las dos estructuras volcánicas: San Miguel y Xonotla, con los sistemas de fracturas-fallas característicos de cada estructura.

Mapa geológico del área de San Miguel Tenango-Xonotla

Con la información obtenida en campo y con la ayuda de las fotografías aéreas, se realizó un mapa geológico local (Fig. IV.4).

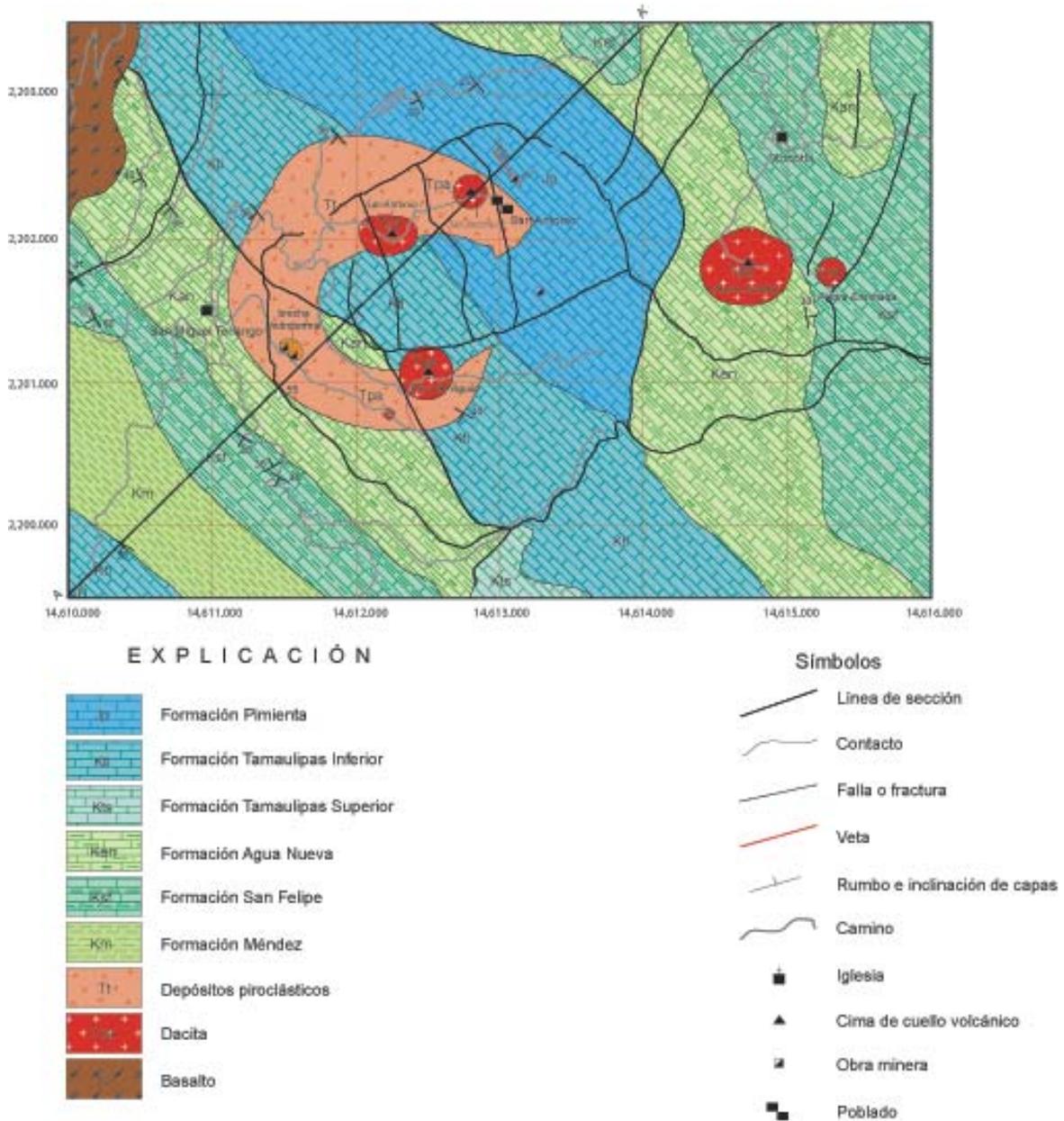


Fig. IV.4 Mapa geológico del área de San Miguel Tenango-Xonotla

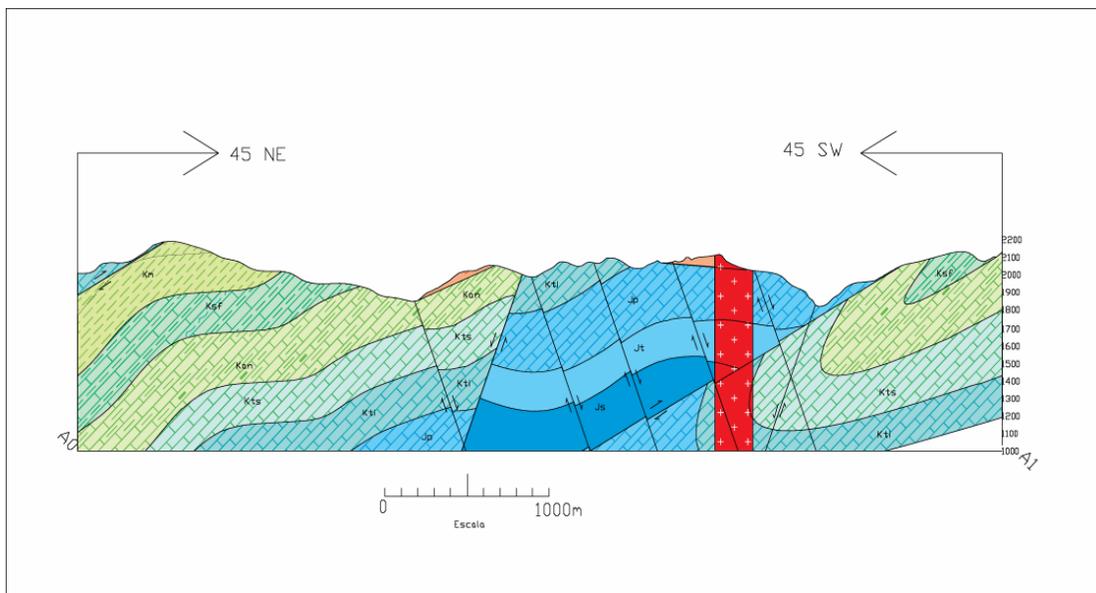


Fig. IV.5 Sección Ao-A1 del área de San Miguel Tenango-Xonotla. Texto explicativo igual al de la Fig. IV.2.1

V. Geoquímica

Se realizó un estudio geoquímico a seis muestras de los cuellos volcánicos (San Miguel Tenango, Pico del Águila, San Antonio y Piedra Encimada) y del domo de Xonotla, para conocer su composición química en elementos mayores, menores y trazas, calcular la norma y a través de diagramas geoquímicos clasificar las rocas e interpretar el ambiente tectónico donde se formaron.

Trabajo de laboratorio

Para realizar los análisis químicos se requiere aproximadamente de cinco Kg por muestra. Los criterios utilizados para la selección de las muestras fueron los siguientes:

- Buscar rocas que no estuvieran alteradas, lo cual no fue posible ya que toda el área de estudio está afectada por procesos de intemperismo e hidrotermalismo. No obstante, se buscaron los afloramientos menos afectados por dichos procesos.
- Colectar las muestras en lugares química y petrográficamente representativos de los cuellos volcánicos y del domo.

Preparación de las muestras:

Descostar las muestras: Este proceso es muy importante, porque es muy fácil contaminar las muestras. Cada muestra se colocó sobre una lámina de acero previamente lavada y con un marro se quitaron los fragmentos intemperizados, así como las vetillas de minerales secundarios.

Triturar: Para poder usar la trituradora, es necesario que la muestra presente fragmentos menores de tres cm, por lo que la trituración se tiene de hacer con el marro sobre la lámina de acero hasta obtener fragmentos del tamaño deseado. Los fragmentos se lavan con agua destilada y tallan para eliminar el polvo. Después se reducen a tamaños de partícula de 1 a 5 mm de diámetro, utilizando una quebradora de quijadas mecánica de posiciones, marca Fritsch.

Pulverizar: Antes de pulverizar es necesario observar los fragmentos bajo un microscopio binocular para separar las partículas contaminadas, tanto de la muestra natural como de los fragmentos de metal de la trituradora. Después se cuartea hasta obtener 200 gramos de muestra. En el pulverizador marca SPEX de anillos de acero endurecido, se pulverizó 50 gr de muestra con el fin de contaminar el mortero con la misma muestra a pulverizar y se tiró este material. Después fueron pulverizados los 150 gr de muestra restantes.

Ya pulverizado el material se separó y guardó en frascos y bolsas bien cerradas, para utilizarlos en los análisis por fluorescencia y difracción de rayos X.

Análisis químicos

Fluorescencia de rayos X (FRX): Es la técnica analítica de mayor aplicación para el análisis de elementos mayores y algunos elementos traza en materiales geológicos. El espectrómetro de FRX que se utilizó para la determinación de los elementos mayores y algunos traza es del tipo secuencial dispersivo de longitud de onda marca SIEMENS SRS 3000, del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) de los Institutos de Geología y Geofísica de la UNAM.

Para medir los elementos mayores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O y P_2O_5) (Tabla V.1) se empleó la técnica tradicional de discos fundidos. La preparación consistió en la fusión de 0.8 gramos de muestra y 7.2 gramos de una mezcla de fundente constituida por $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y LiBO_2 1:1; ambos materiales se utilizaron en forma granular y con un grado de ultra pureza (Aldrich). La fusión se realizó en cristoles de una aleación Pt/Au, 95:5, en un horno de procedimiento programado (Corporation Scientifique Claisse). De esta manera, la fusión se programó en un período de 10 minutos, obteniendo las perlas de vidrio que son montadas en el portamuestra del equipo de FRX.

También fueron analizados seis muestras por elementos mayores (Tabla V.1), menores y trazas (Tabla V.2), en los laboratorios comerciales Act Lab de Ancaster Canadá, por la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

Tabla V.1 Análisis de fluorescencia de rayos X e ICS-MS de elementos mayores y menores

SAMPLE	Pico del Águila	San Miguel	San Antonio	Domo de Xonot	Domo de Xonotla	Piedra Encimada
	Fpa-02	FPA 06.1	FPA 08	PV-01	PV-04	PV-05
SiO2	66.080	65.210	65.770	69.645	70.351	68.472
Al2O3	15.770	16.010	16.110	16.402	16.570	17.485
Fe2O3	1.470	1.850	2.280	2.114	2.116	1.838
FeO	1.010	0.960	0.500	0.000	0.000	0.000
MnO	0.049	0.046	0.038	0.060	0.058	0.044
MgO	1.190	1.140	1.080	0.331	0.133	0.548
CaO	4.810	4.990	4.650	4.583	3.827	2.099
Na2O	4.070	4.050	3.930	3.452	3.617	5.164
K2O	1.480	1.460	1.530	1.152	1.303	1.853
TiO2	0.392	0.427	0.435	0.000	0.000	0.000
P2O5	0.120	0.160	0.160	0.093	0.099	0.086
V	40.608	36.864	39.556	19.245	32.000	21.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Co	28.927	16.666	25.141	20.398	33.000	23.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cu	91.210	0.000	0.000	0.000	9.000	13.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	91.000	26.000
Ga	19.944	19.847	20.726	16.862	0.000	0.000
Ge	0.916	0.972	1.048	0.815	0.000	0.000
As	7.859	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rb	17.621	13.948	16.244	15.873	0.000	0.000
Sr	664.310	777.148	790.307	446.955	564.000	546.000
Y	15.583	13.219	13.066	8.441	5.000	7.000
Zr	139.815	146.178	149.341	77.118	142.000	125.000
Nb	4.543	3.938	4.077	3.402	3.000	3.000
Mo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
In	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb	0.214	0.000	0.000	0.225	0.000	0.000
Cs	0.221	-0.100	0.151	0.510	0.000	0.000
Ba	321.671	262.126	277.367	293.594	0.000	0.000
La	19.735	1.166	20.414	11.235	0.000	0.000
Ce	39.566	0.166	43.999	22.041	0.000	0.000
Pr	5.143	1.079	5.687	2.535	0.000	0.000
Nd	20.955	1.068	24.000	10.069	0.000	0.000
Sm	3.922	4.137	4.318	1.926	0.000	0.000
Eu	1.167	1.314	1.340	0.656	0.000	0.000
Gd	3.420	3.393	3.419	1.672	0.000	0.000
Tb	0.450	0.439	0.452	0.239	0.000	0.000
Dy	2.252	2.150	2.145	1.238	0.000	0.000
Ho	0.423	0.397	0.398	0.237	0.000	0.000
Er	1.262	1.162	1.166	0.713	0.000	0.000
Tm	0.183	0.169	0.166	0.108	0.000	0.000
Yb	1.151	1.066	1.068	0.705	0.000	0.000

Tabla V.2 Análisis de fluorescencia de rayos X e ICP-MS de elementos trazas

Sample ID:	FPA 02	FPA 06.1	FPA 08	PV-01	PV-04	PV-05
V	40.608	36.864	39.556	19.245	32.000	21.000
Cr	-20.000	-20.000	-20.000	-20.000	0.000	0.000
Co	28.927	16.666	25.141	20.398	33.000	23.000
Ni	-20.000	-20.000	-20.000	-20.000	2.000	0.000
Cu	91.210	-10.000	12.308	-10.000	9.000	13.000
Zn	-30.000	-30.000	-30.000	-30.000	91.000	26.000
Ga	19.944	19.847	20.726	16.862	0.000	0.000
Ge	0.916	0.972	1.048	0.815		
As	7.859	-5.000	-5.000	-5.000		
Rb	17.621	13.948	16.244	15.873		
Sr	664.310	777.148	790.307	446.955	564.000	546.000
Y	15.583	13.219	13.066	8.441	5.000	7.000
Zr	139.815	146.178	149.341	77.118	142.000	125.000
Nb	4.543	3.938	4.077	3.402	3.000	3.000
Mo	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000		
Ag	-0.500	-0.500	-0.500	-0.500		
In	-0.100	-0.100	-0.100	-0.100		
Sn	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000		
Sb	0.214	-0.200	-0.200	0.225		
Cs	0.221	-0.100	0.151	0.510		
Ba	321.671	262.126	277.367	293.594		
La	19.735	1.166	20.414	11.235		
Ce	39.566	0.166	43.999	22.041		
Pr	5.143	1.079	5.687	2.535		
Nd	20.955	1.068	24.000	10.069		
Sm	3.922	4.137	4.318	1.926		
Eu	1.167	1.314	1.340	0.656		
Gd	3.420	3.393	3.419	1.672		
Tb	0.450	0.439	0.452	0.239		
Dy	2.252	2.150	2.145	1.238		
Ho	0.423	0.397	0.398	0.237		
Er	1.262	1.162	1.166	0.713		
Tm	0.183	0.169	0.166	0.108		
Yb	1.151	1.066	1.068	0.705		
Lu	0.176	0.165	0.160	0.117		
Hf	3.791	4.109	4.321	2.152		
Ta	1.036	0.534	0.716	0.403		
W	469.047	209.438	380.826	113.704		
Tl	-0.050	-0.050	-0.050	0.106		
Pb	-5.000	-5.000	-5.000	-5.000	0.000	0.000
Bi	0.258	0.815	0.123	-0.100		
Th	2.890	3.336	3.413	1.136	0.000	0.000
U	0.930	0.954	0.977	0.347		
Rb					17.000	37.000

Cálculo de la Norma:

Con los resultados de los análisis de los elementos mayores anteriores, se calculó la norma utilizando el *software Igpert* (Tabla V.3)

Tabla V.3. Norma

Sample ID:	FPA 02	FPA 06.1	FPA 08	PV-01	PV-04	PV-05
%AN	37.18986	38.2135	39.59701	43.1039	37.46894	18.39753
Q	26.48285	25.61289	26.93584	35.90431	36.93847	26.92781
Or	9.069226	8.959491	9.374898	6.963299	7.856593	11.22524
Ab	35.71051	35.58595	34.47948	29.87627	31.22708	44.7919
an	21.14418	22.00907	22.60293	22.63396	18.71144	10.09847
lc	0	0	0	0	0	0
ne	0	0	0	0	0	0
kal	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	1.397988	2.539292	3.458851
di	2.175909	2.033258	0.180651	0	0	0
hy	2.14762	2.005308	2.70484	0.8430953	0.3379307	1.398901
wo	0	0	0	0	0	0
ol	0	0	0	0	0	0
ac	0	0	0	0	0	0
mt	2.210016	2.083506	1.52949	2.021369	2.015639	1.151903
il	0.7719802	0.8421122	0.8565959	0	0	0
hem	0	0.4840262	0.9513646	0.1400674	0.1402345	0.743125
ti	0	0	0	0	0	0
						0.204244
ap	0.2882847	0.3849304	0.38435	0.2203826	0.2340221	5
cc	0	0	0	0	0	0
pero	0	0	0	0	0	0
wus	0	0	0	0	0	0
ru	0	0	0	0	0	0
KMS	0	0	0	0	0	0
NMS	0	0	0	0	0	0
COS	0	0	0	0	0	0

Diagramas geoquímicos

Por medio del software Igpnet se elaboraron los siguientes diagramas:

- El diagrama propuesto por Le Bas (1986), que permite clasificar las rocas con base en su contenido en álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) y sílice (SiO_2) (Fig. V.1).

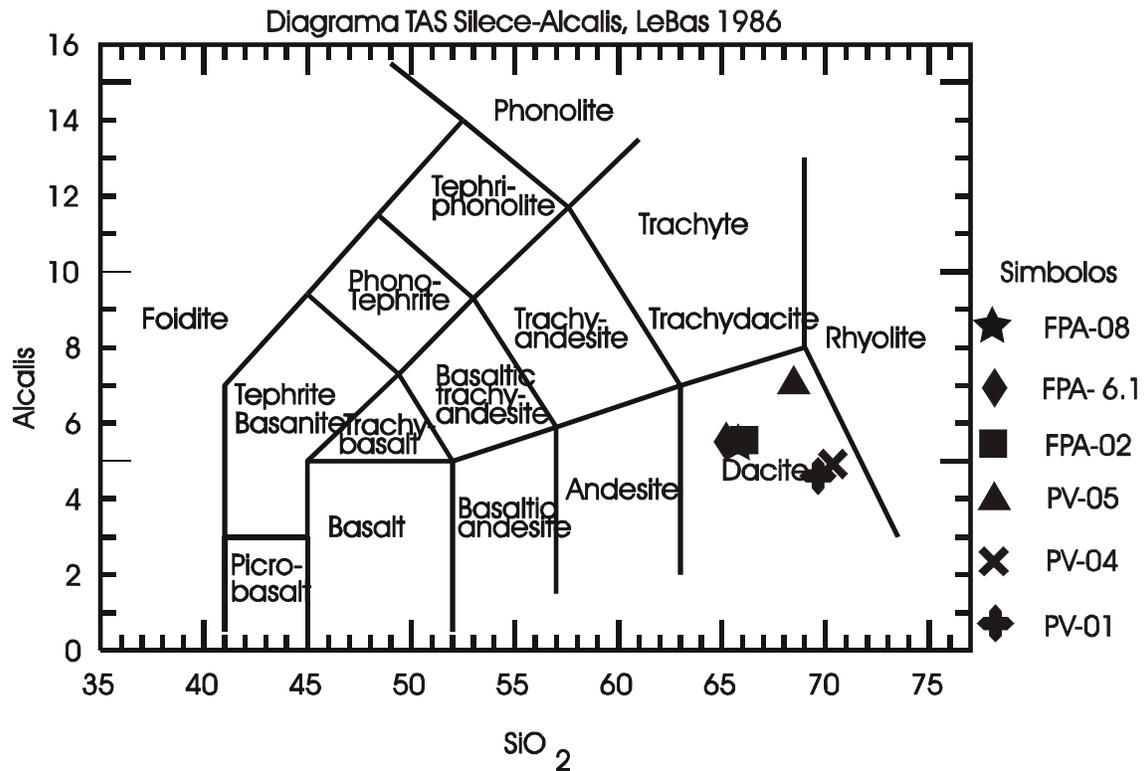


Fig. V.1 Diagrama TAS de Le Bas, 1986

- El diagrama de porcentaje en peso de álcalis contra sílice que puede ser usado para diferenciar los miembros de las series magmáticas alcalina y subalcalina (Fig.V.2).

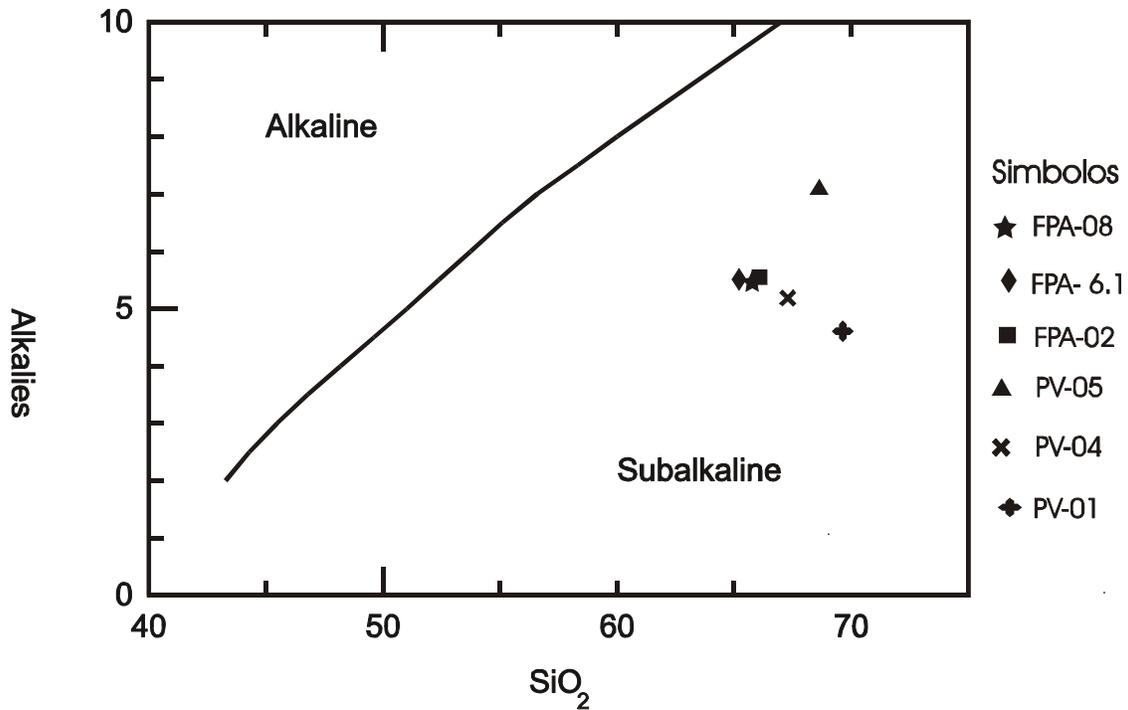


Fig. V.2 Diagrama Alcalis contra Sílice de Rickwood, 1989

- El diagrama AFM (Fig. V.3) permite subdividir a los miembros de la serie subalkalina en dos series: toleítica y calcialcalina. Estas series se pueden diferenciar en términos de sus tendencias sobre un diagrama AFM, porque las series toleíticas muestran comúnmente un fuerte enriquecimiento de hierro en las etapas tempranas de diferenciación y la serie calcialcalina se caracteriza por el aumento progresivo y paralelo de los contenidos de sílice y álcalis, y por una ausencia en el enriquecimiento de hierro, siguiendo la tendencia de Bowen.

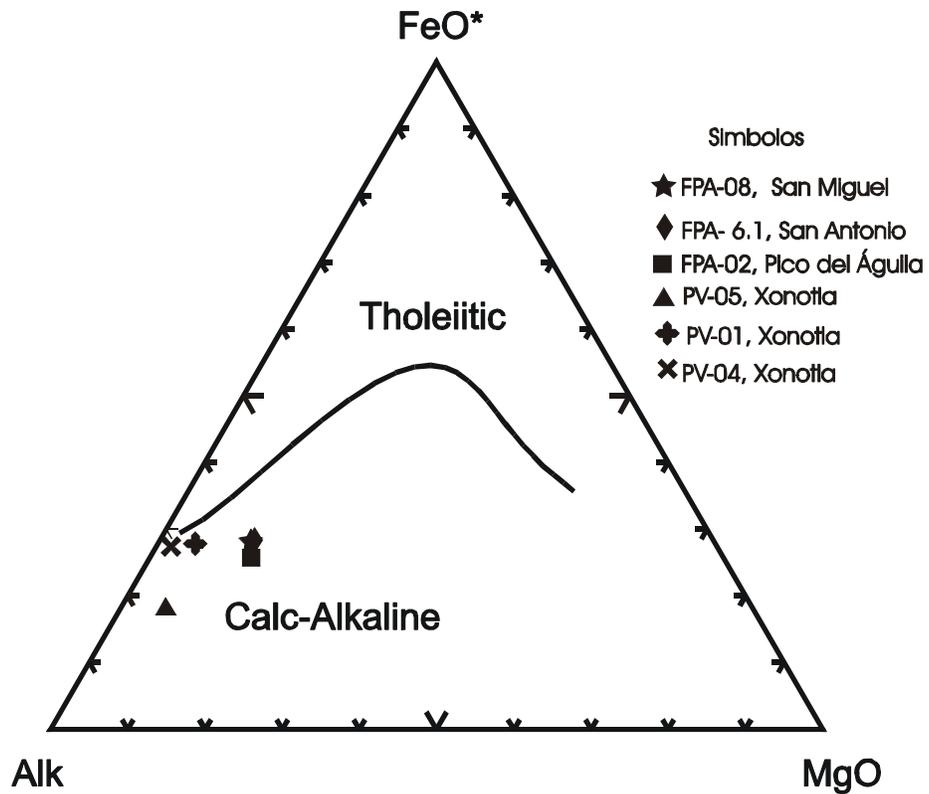


Fig. V.3 Diagrama AFM

- Diagramas discriminatorios para granitos

Tomando en cuenta que las rocas que constituyen los cuellos volcánicos y el domo de Xonotla tienen composición química granítica, se elaboraron los diagramas (Fig. V.4) propuestos por J.A Pearce (1984), que permiten conocer el ambiente tectónico en que se formaron las rocas.

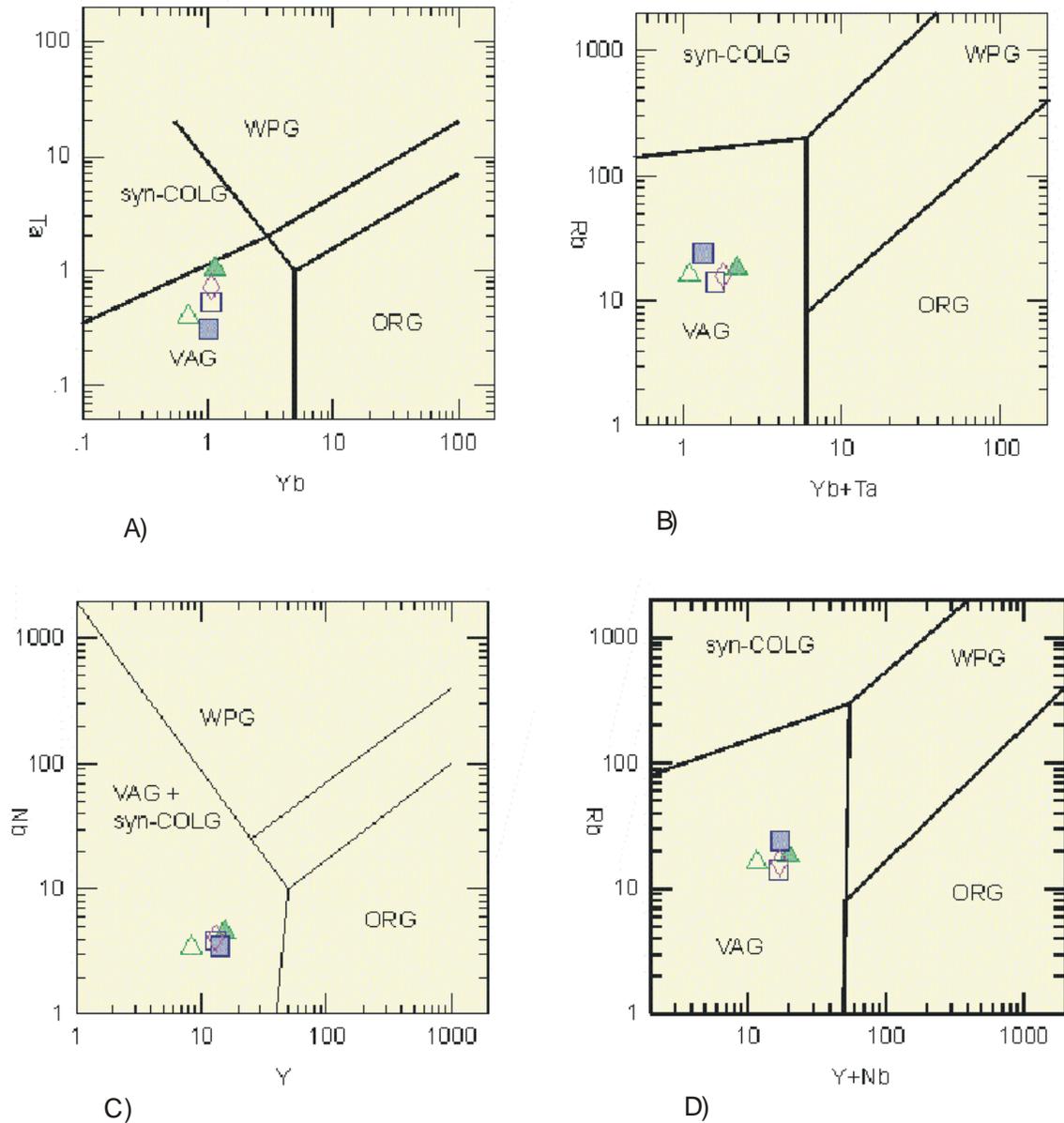


Fig V.4. Diagramas A) Ta-Yb, B) Rb-(Yb+Ta), C) Nb-Y y D) Rb-(Y+Nb) de Pearce (1984), donde syn-COLG granitos en un ambiente sin colisión, VAG granitos de arcos de islas, WPG granitos intraplacas y ORG granitos de cordilleras oceánicas.

- Diagrama de tierra raras

Las muestras tienen un contenido alto en tierras raras, que equivalen de 30 a 50 veces el contenido de tienen las condritas. La distribución y abundancia de las tierras raras son similares a las que presentan las rocas de la serie calcialcalina de los márgenes continentales, donde la distribución de las tierras raras es lineal y su abundancia va

disminuyendo progresivamente de las tierras raras ligeras a las tierras raras pesadas (Fig. V.5).

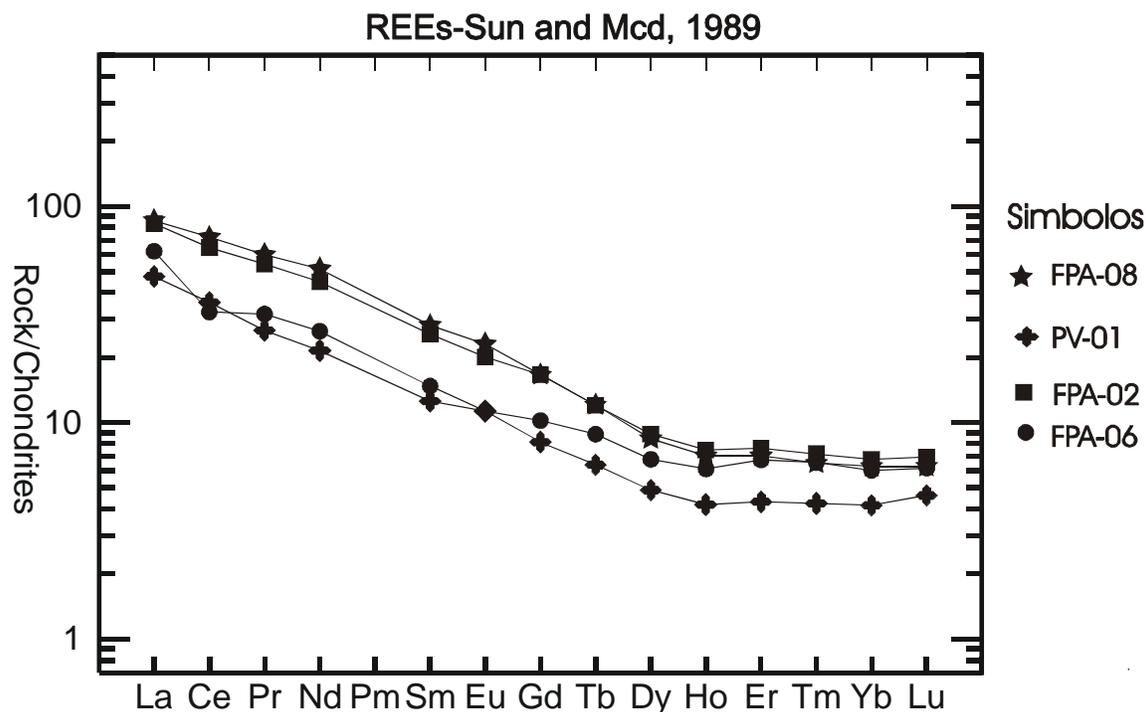


Fig. V.5 Diagrama Condrita-normalizado REE

Resultados

Los diagramas nos indican que las rocas que forman los cuellos volcánicos y el domo pueden ser clasificados como dacitas (Fig. V.1), las cuales se formaron a partir de magmas calcialcalinos (Fig. V.3). La serie calcialcalina de los arcos insulares y márgenes continentales son típicas de estos ambientes tectónicos, lo cual se confirma con los diagramas de Pearce (Fig. V.4). Con el diagrama de tierras raras (Fig. V.5) se puede determinar que las rocas se formaron bajo un ambiente tectónico de subducción de margen continental.

VI. Geología económica.

Dentro del área de San Miguel Tenango-Xonotla existieron minas de plata y posiblemente también de oro, explotadas en pequeña escala desde la época Colonial hasta mediados del siglo pasado.

Las localidades mineralizadas se encuentran inhabilitadas actualmente, ya que las minas fueron sepultadas por derrumbes naturales y artificiales. La información disponible de la geología económica es nula y sólo se cuenta con los datos proporcionados por la gente del lugar, que en algunos casos trabajaron en esas minas.

La zona de mayor interés por su importancia económica e histórica, es la ubicada cerca del poblado San Antonio. No obstante, no existe acceso por los derrumbes y sólo se observa en superficie pozos, socavones y manifestación como una veta. También hay evidencia de actividad minera cerca de los poblados de Xonotla y San Miguel Tenango, pero desgraciadamente tampoco se pudo ingresar y conocer estos yacimientos.

Zona de San Antonio

La región mineralizada de San Antonio es conocida localmente como Mina La Esperanza, ubicada en los alrededores del poblado San Antonio. El acceso al área es difícil por no contar con infraestructura adecuada para entrada de vehículos. Dentro de la zona mineralizada se observó diversas obras mineras, como socavones y pozos de acceso restringido, debido a derrumbes y falta de equipo. Algunos pobladores de la región han desaparecido dentro de estas estructuras mineras, por lo que la mayoría fueron tapadas. El desarrollo de la obra es desconocido y la comunicación entre las obras visibles no es clara.

Las rocas donde se alberga la mineralización de plata y manganeso son secuencias calcáreas, correspondientes a la Formación Pimienta, constituidas por calizas arcillosas de color negro a gris oscuro, de textura que varía de *mudstone* a *wackestone*, con estratos delgados. Las calizas están intercaladas con capas de lutitas calcáreas laminares de color negro y también presenta lentes y nódulos de pedernal negro. Yaciendo sobre esta unidad se encuentran calizas que corresponden a la Formación Tamaulipas Inferior, de color gris con textura *wackestone* a *packstone*, en estratos de espesor grueso, con lentes de pedernal y vetillas de calcita.

Estas secuencias están estratificadas, plegadas y fracturadas, presentan una estratificación preferente con orientación NW 30-45°, e inclinaciones que varían de 30-60° y que tal vez formen parte de un flanco del pliegue del anticlinal de San Miguel Tenango. Cerca de un socavón existe una veta orientada N30°W, 80° en forma tabular, de un espesor de 20 cm en afloramiento superficial. La característica principal de esta veta es la presencia de minerales de manganeso, cuarzo y calcita, además de un borde arcilloso blanco-rojizo. La veta tiene una apariencia masiva de minerales oscuros, debido a los óxidos de manganeso observados hacia el centro de la misma, con sus bandas arcillosas en sus extremos. Por análisis de difracción de rayos X se pudo identificar a la Todorokita (óxido de Manganeso) y otros minerales amorfos de manganeso. En algunos sectores de la veta se observa oquedades con drusas de óxidos de manganeso, óxidos de fierro, cuarzo y calcita.

Zona de San Miguel Tenango.

La región mineralizada de San Miguel Tenango se localiza en los alrededores del poblado del mismo nombre. En esta zona existen dos brechas (Fig. VI.1) limitadas por fallas con una orientación general N44°E, 80° y alojadas en tobas líticas. Estas brechas se formaron por actividad hidrotermal que arrastró, junto con el fluido mineralizante, fragmentos de calizas y lutitas de las unidades sedimentarias que yacen bajo la toba lítica. La matriz está compuesta principalmente por óxidos de manganeso, cuarzo y calcita. También existen drusas de cuarzo, de minerales de manganeso y de calcita .

Las obras encontradas en la zona mineralizada son:

- Un socavón aproximadamente de 8 m que corta a la brecha por falla.
- Dos socavones de 50 m de profundidad, los cuales están interconectados por un crucero de 70 m, que corta a la brecha y a la toba lítica.

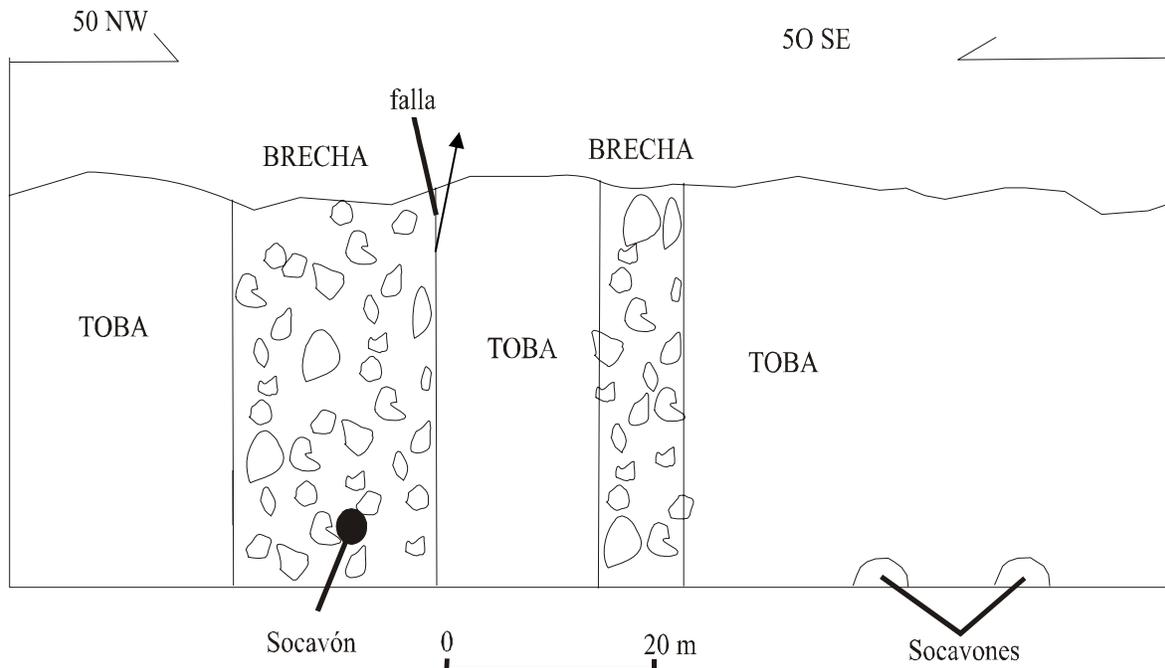


Fig. VI.1 Sección esquemática del afloramiento.

Zona de Xonotla.

La información de actividad minera es la proporcionada por los habitantes de la región, pero en campo no se observó alguna obra minera, ni manifestaciones superficiales, por lo que se desconoce los tipos de yacimientos de la zona.

VII. Resultados y discusión

Resultados

Las características petrográficas, geomorfológicas, estructurales y geoquímicas del área de San Miguel Tenango-Xonotla, permiten dividirla en cuatro unidades: unidad sedimentaria, unidad de cuellos volcánicos, unidad del domo de Xonotla y unidad de depósitos piroclásticos.

Unidad sedimentaria

La unidad sedimentaria está representada por secuencias mesozoicas de ambiente marino. Estas rocas se encuentran plegadas, de modo que los ejes de los pliegues están orientados NW-SE (Fig. IV.2). Los sistemas de fallas que las afectan tienen las siguientes orientaciones: 45° NW en las fallas de cabalgaduras y 45° NE en las normales. Presenta contactos discordantes con las demás unidades.

Depósitos piroclásticos

Los depósitos piroclásticos están constituidos por tobas líticas, formadas principalmente por fragmentos sedimentarios de calizas y lutitas, además de fragmentos de rocas ígneas y en menor cantidad cristales de cuarzo y feldespatos, todos ellos cementados por carbonatos. Estas rocas cubren discordantemente a la secuencia sedimentaria.

Unidad de cuellos volcánicos

Análisis petrográfico

Las rocas que constituyen los cuellos volcánicos son dacitas, cuyas características ópticas son las siguientes (Tabla III.1):

Textura porfídica e intersertal; minerales primarios constituidos principalmente por plagioclasas (oligoclasa a labradorita) y cuarzo; minerales accesorios consisten en hornblenda, biotita y opacos; minerales secundarios compuestos por carbonatos, sobre todo calcita.

Análisis MEB

Con el análisis en la microsonda electrónica y el microscopio electrónico de barrido (MEB) se llegó a los siguientes resultados:

- La plagioclasas muestran una zonificación que varía de oligoclasa a labradorita (Tabla III.2).
- La matriz está constituida principalmente por SiO_2 y en muy pequeñas cantidades por Al_2O_3 , CaO y K_2O (Figs. III.19 y III.20).
- Los cristales de magnetita rica en titanio y apatita (Fig III.18).
- Los minerales que se encuentran rellenando fracturas y oquedades están compuestos por calcita (Fig III.17).

Análisis XRD

Con el análisis de difracción de rayos X (XRD), se determinó la presencia de los siguientes minerales (Figs. III.24, III.27 y III.28): cuarzo, andesina, hornblenda y biotita.

Análisis geoquímicos

Con los análisis geoquímicos se determinó que las rocas que forman los cuellos volcánicos se clasifican como dacitas (Fig. V.1), que se formaron a partir de magmas calcalcalinos (Fig. V.3). Las rocas se formaron bajo un ambiente tectónico de subducción en una margen continental. Estos cuerpos se encuentran cortando a las secuencias sedimentarias y depósitos piroclásticos.

Domo de Xonotla

Análisis petrográfico

Las rocas que constituyen el domo son dacitas, que presentan características petrográficas y geoquímicas similares a las rocas que forman los cuellos volcánicos. Las características ópticas se consignan en la Tabla III.1

Análisis MEB

Con los análisis en la microsonda electrónica de barrido se llegó a los siguientes resultados:

- La zonificación de las plagioclasas varía de oligoclasa a labradorita (Tablas III.3 y III.4).

- La matriz está constituida principalmente por SiO₂ y en muy pequeñas cantidades Al₂O₃, CaO y K₂O (Figs. III.23).
- Los cristales de magnetita rica en titanio y apatita (Fig. III.22).
- Los minerales que se encuentran rellenando fracturas y oquedades están compuestos por calcita (Fig III.22).

Análisis XRD

Con el análisis de difracción de rayos X se determinó la presencia de los siguientes minerales (Tabla III.5): cuarzo, andesina, hornblenda y biotita.

Análisis geoquímicos

Con los análisis geoquímicos se determinó que las rocas que forman el domo se clasifican como dacitas (Fig. V.1), que se formaron a partir de magmas calcalcalinos (Fig. V.3). Las rocas se formaron bajo un ambiente tectónico de subducción en una margen continental.

Estructuras dentro del área de San Miguel Tenango-Xonotla

Por medio de fotografías aéreas se observaron tres estructuras circulares alineadas entre sí 70° al NE (Fig. IV.1), de las cuales dos se encuentran dentro del área de estudio (la estructura de San Miguel Tenango y la estructura de Xonotla), que presentan las siguientes características:

- Se encuentran limitadas por fallas anulares
- El diámetro de las estructuras esta varía entre 2 a 3 km
- Existe un hundimiento.
- Mineralización dentro de la estructura volcánica

Dentro de cada una de estas estructuras se aprecian distintos sistemas de fracturas (Fig IV.3):

- La estructura de San Miguel Tenango está afectada por dos juegos de fallas normales con orientación general N45-60W y N50-60E, respectivamente.
- La estructura de Xonotla está afectada por fallas normales de orientación N45°E.

Mineralización de la región de San Miguel Tenango-Xonotla

Dentro de las estructuras se presentan depósitos hidrotermales asociados a brechas hidrotermales y vetas de Ag-Mn.

DISCUSIÓN

Las rocas que constituyen la unidad sedimentaria se hallan plegadas, con los ejes orientados de manera general hacia el NW y están afectadas por fallas de cabalgaduras orientadas N45° W y fallas normales orientadas N45°E.

Se observa que las rocas sufrieron una deformación compresiva, resultado de la Orogenia Larámide, formando un complejo de pliegues y cabalgaduras semejante al complejo de pliegues del Anticlinorio de Huayacocotla (Yáñez-García, 1982, y Ochoa-Camarillo, 1992).

Las secuencias sedimentarias son de ambiente de plataforma que abarca un periodo desde el Jurásico Tardío, representado por la Formación Pimienta, hasta el Cretácico Tardío, representado por las formaciones Tamaulipas Inferior, Tamaulipas Superior, Agua Nueva, San Felipe y Méndez.

Yaciendo discordantemente sobre las secuencias sedimentarias afloran la unidad de depósitos piroclásticos y cortando ambas unidades se encuentran el domo de Xonotla y la unidad de cuellos volcánicos.

Los depósitos piroclásticos representan los depósitos de los primeros eventos volcánicos de carácter explosivo y contienen fragmentos de rocas sedimentarias que fueron arrastrados al abrirse los conductos por donde se expulsó el material volcánico. Los depósitos piroclásticos están constituidos por tobas líticas, que varían de no consolidados a consolidados y son de dos tipos: (1) depósitos de caída libre que se distinguen por una disposición paralela al relieve, una clasificación granulométrica de buena a moderada y gradación normal, y (2) derrames de cenizas que se distinguen por presentar una mezcla mal clasificada de material.

El domo es una estructura convexa aproximadamente 600 m de diámetro.

Los cuellos volcánicos forman estructuras de forma cilíndrica.

Es posible que la actividad volcánica haya dado lugar a la creación de estructuras circulares de un diámetro entre los 2-3 km, limitadas por fallas anulares originadas por

fenómenos de subsidencia. En el interior de las estructuras existen cuellos volcánicos (estructura de San Miguel Tenango) y un domo (estructura de Xonotla). Estas estructuras se formaron, quizás a partir de un volcán que se erosionó, quedando como evidencia de la actividad volcánica los conductos por donde se expulsó el material (cuellos volcánicos) y los depósitos piroclásticos de los primeros eventos eruptivos.

Asociados al vulcanismo se presentan depósitos hidrotermales que consisten en brechas hidrotermales y vetas de Ag-Mn.

VIII. Conclusiones

La cartografía permitió delimitar a las unidades y estructuras que afloran en el área de San Miguel Tenango-Xonotla., particularmente las unidades volcánicas. Se reconocieron cinco cuellos volcánicos, un pequeño domo y secuencias piroclásticas.

El ambiente tectónico en el que se formaron las rocas ígneas es de un arco volcánico en una margen continental

Se delimitaron dos estructuras volcánicas: La estructura de San Miguel y la estructura de Xonotla, en donde se observaron depósitos hidrotermales asociados a brechas hidrotermales y vetas de Ag-Mn.

Recomendaciones

Realizar una cartografía a más detalle de las estructuras volcánicas.

Estudiar las zonas mineralizadas con mayor detalle, para poder realizar un modelo de yacimiento.

Realizar fechamientos isotópicos con el fin de correlacionar a las rocas, dentro de un contexto regional.

Bibliografía

Ángeles-Moreno, Edgar y Sánchez-Martínez, Salvador, 2002, Geología, geoquímica y geología regional de las rocas del macizo de Teziutlán, Puebla: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 105 p. (Inédita)

Besoain, Eduardo, 1985, Mineralogía de arcillas de suelos

Cantú-Chapa, Abelardo, 1998, Transgresiones Jurasicas en México: Revista mexicana de ciencias geológicas. Vol 15, 1998, 21-24p.

Castro-Mora, Jesús, 1995, Monografía geológico-minera del estado de Puebla: Consejo de recursos minerales, publicación M-16e, 139 p.

Cepeda-Dávila, Leovigildo, 1986. Apuntes de petrología ígnea: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería DICT, 363p

Kerr P.F., 1965, Mineralogía óptica: New York, McGraw-Hill, 433p.

Le Bas, Le Maitre, Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagrams. J. Petrol. 27, 745-750p.

Lipman, P.W., 1997. Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry: Bulletin of Volcanology, V. 59, 198-218p.

MacKenzie W.S, Donaldson C.H. y Guilford C, 1996, Atlas de rocas ígneas y sus texturas: Londres, Masson, 96p.

Ochoa-Camarillo, Héctor. Geología del anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, Hidalgo: México D.F, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Tesis de Maestría (inedito).

Ochoa-Camarillo, Héctor; Buitrón B.E. y Silva-Pineda, Alicia, 1998, Contribución al conocimiento de la bioestratigrafía, paleoecología y tectónica del Jurásico (Anticlinorio Huayacocotla) en la región de Molango: Revista mexicana de ciencias geológicas. Vol 15, 1998, 57-63p.

Ortega-Gutiérrez, 1992

Pearce J.A., Nigel B.W., Harris y Andrew G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: Journal of petrology. Vol. 25.part 4, 956-983 p.

Ragan, D.M. 1980, Geología estructural- Introducción a las técnicas geométricas: Madrid, Omega, 207p.

Rickwood P:C., 1989, Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements, 22, 247-263p.

Robert L. Smith and A. Bailey, 1968, Resurgent Cauldrons. Geological Society of American memoir 116, p 613-662.

Rollinson Hugh, 1993, Using geochemical data-Evaluation, presentation and interpretation: Longman Scientific and technical.

Suter, Max, 1990, Hoja Tamazunchale 14Q-e(5) con geología de la hoja Tamazunchale, de los estados de Queretaro y San Luis Potosí: UNAM, Instituto de Geología serie de 1:100000, mapa con texto explicativo de 55 p.

Tapia-Crespo, L.A, 2001, Informe geológico: Tetela de Ocampo: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Convenio PEMEX-UNAM. (Inédito)

Wilson marjorie, 1989, Igneous petrogenesis a global tectonic approach: Londres, Chapman & Hall, 466 p.

Yáñez-García, Camilo, 1982, Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Pue y Ver: México D.F., Comisión Federal de Electricidad.