

Sedimentología de la Formación Matzitzi (Paleozoico superior) y significado de sus componentes volcánicos, región de Los Reyes Metzontla-San Luis Atlotitlán, Estado de Puebla

Elena Centeno-García^{1,*}, Claudia C. Mendoza-Rosales² y Gilberto Silva-Romo²

¹Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México.

²Departamento de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México.

* centeno@servidor.unam.mx

RESUMEN

La Formación Matzitzi (Pérmico), se localiza en el sur del Estado de Puebla y constituye uno de los afloramientos más extensos de las pocas unidades paleozoicas que afloran en el sur de México. Sus rocas fueron reconocidas desde 1896 por Aguilera y desde entonces se ha resaltado su importancia dentro de la paleobotánica, ya que contiene una diversa flora fósil. Dicha unidad sobreyace, o está en contacto por falla, con el complejo Oaxaqueño y está cubierta discordantemente por conglomerados mesozoicos. En las columnas medidas a lo largo de la carretera de terracería entre Los Reyes Metzontla y Coatepec se caracterizaron seis asociaciones de facies principales, las cuales permitieron reconocer flujos de escombros, relleno de canales arenosos, 'overbank', y depósitos de desbordamientos. Se propone un modelo de facies fluvial anastomosado para la sedimentación de la Formación Matzitzi. Además se presentan evidencias del carácter extrusivo de la roca félsica expuesta en el poblado de San Luis Atlotitlán. Dicho cuerpo se había descrito previamente como un intrusivo de edad desconocida emplazado dentro de la Formación Matzitzi, y había sido considerado por algunos autores como stock, y por otros como sill o dique. La cartografía a detalle de este cuerpo permitió reconocer su origen volcánico, y se propone en este trabajo denominarla como Toba Atlotitlán. Las evidencias que demuestran su origen volcánico son: 1) El contacto inferior es concordante, sin metamorfismo de contacto, con una ligera superficie de erosión causada por el flujo (ondulitas de surge); 2) el contacto superior también es concordante, aunque ligeramente erosivo, y las capas arenosas que lo sobreyacen contienen clastos de la Toba Atlotitlán; 3) la toba presenta estructuras reomórficas y prismas hexagonales por enfriamiento. Por otra parte, la geoquímica sugiere un origen probable de arco volcánico continental para dicha toba, ya que presenta valores bajos de Ce, P, Nb y Ti, con patrones de elementos de las Tierras Raras (REE) enriquecidos en elementos de las Tierras Raras ligeras (LREE), anomalía negativa de Eu y patrones planos de elementos de las Tierras Raras pesadas (HREE). Esta última inferencia sería válida si no existió una asimilación considerable de corteza continental.

El reconocimiento de magmatismo contemporáneo al depósito de la Formación Matzitzi es importante para la reconstrucción de la Paleogeografía y evolución tectónica del sur de México, ya que es una evidencia más de la existencia de una margen activa pacífica durante el Pérmico, representada al norte de la región estudiada por un abundante magmatismo calcialcalino. Por otra parte, la toba Atlotitlán representa el primer reporte de registro de los niveles superiores del arco pérmico en el sur de México, ya que anteriormente sólo habían sido identificados cuerpos intrusivos de dicha edad.

Palabras clave: geoquímica, arco, volcanismo, facies fluviales, Pérmico, Formación Matzitzi, México.

ABSTRACT

The Matzitzi Formation (Permian), located in the southern part of Puebla State, constitutes one of the few exposures of Paleozoic rocks in southern Mexico. Rocks of this formation were recognized since 1896 by Aguilera, and ever since they are known for its paleobotanical significance, because of their diverse fossil flora. This unit overlies or is in fault contact with the Oaxacan Complex and is unconformably overlain by Mesozoic conglomerates. Measured columns along the dirt road between Los Reyes Metzontla and Coatepec allowed us to characterize six facies association. Based on these facies associations, we recognized debris flow deposits, sandy channel-fill, overbank, and crevasse splays deposits. These facies are interpreted as related to an anastomosed river system. In addition, evidence of an extrusive origin for the felsic rocks that crop out in San Luis Atolotitlán town are also discussed in this paper. These igneous rocks were previously interpreted as a shallow stock, or a sill or a dike. However, field observations corroborated a volcanic origin, those are: 1) the basal contact is conformable, it shows no evidence of contact metamorphism, and is formed by a minor erosional surface due to flow (surge ondulite); 2) the upper contact is also conformable, and mildly erosional as well, and sandstone and conglomerate that rest upon contain abundant clasts of the underlying felsic rock; 3) rocks show reomorphic structures and cooling hexagonal prisms. Thus, we interpret these rocks as part of a pyroclastic flow, named as the Atolotitlán Tuff. Geochemical data suggests a volcanic-arc affinity for this tuff, since it has low Ce, P, Nb and Ti, enriched light rare earth element (LREE) patterns, flat heavy rare earth element (HREE) patterns, and negative Eu anomaly. This last interpretation is valid only if there was no considerable amount of crustal melts involved in the magma generation.

The fact that the Matzitzi Formation contains volcanic rocks is important for the paleogeographic and tectonic reconstruction of southern Mexico, because it corroborates that the paleo Pacific continental margin was active during Permian time. Permian arc related volcanic rocks have been already recognized, but only to the north of the studied area. This is also the first record of upper levels of Paleozoic igneous activity, since only granitoids of Permian age have been found southern Mexico.

Key words: geochemistry, arc, volcanism, fluvial facies, Permian, Matzitzi Formation, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La Formación Matzitzi aflora entre los poblados de Los Reyes Metzontla y San Luis Atolotitlán, en el Sur del Estado de Puebla (Figura 1) (Aguilera, 1896; Calderón-García, 1956). Se trata de una unidad litoestratigráfica muy importante para la reconstrucción de la evolución geológica del Sur de México, por ser una de las pocas unidades de rocas Paleozoicas en el Terreno Zapoteco y por ser portadora de una variada paleoflora del Paleozoico tardío, cuya edad y afinidad paleogeográfica han sido objeto de discusión por varios años (Silva, 1970; Weber *et al.*, 1987; Weber, 1997; Hernández-Láscares, 2000). La Formación Matzitzi presenta en la parte inferior de su columna un cuerpo ígneo félsico cuyo carácter extrusivo y su afinidad petrotectónica de arco se documenta por primera vez en este trabajo. Las características y las relaciones de campo permiten reconocer a la felsita como una toba (flujo piroclástico) masiva intercalada en la sucesión clástica y no como un intrusivo como previamente se había caracterizado (Torres *et al.*, 1986; Hernández-Láscares, 2000). La Formación Matzitzi se acumuló en condiciones continentales sobre la sutura entre los complejos metamórficos Oaxaqueño y Acatlán, los cuales se amalgamaron hacia el Pérmico Temprano tal como lo atestigua la edad del Granito Cozahuico, intrusivo sintectónico emplazado durante la yuxtaposición de estos complejos (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez 2002; Elías-

Herrera *et al.*, 2005). El objetivo central del presente trabajo es el reconocimiento de actividad volcánica silícica dentro de la Formación Matzitzi, lo cual tiene un significado muy importante en la reconstrucción de la evolución tectonomagmática del sur de México. También se reportan los resultados de un levantamiento sedimentológico a lo largo del camino de terracería entre los poblados de Los Reyes Metzontla y Coatepec y se discute su probable ambiente de depósito.

MARCO GEOLÓGICO

Basamento

En el mapa geológico de la Figura 2 se agruparon todas las unidades metamórficas bajo la denominación de basamento. Hacia el sector sureste de la región de estudio, al sur del poblado de San Luis Atolotitlán, Estado de Puebla, afloran gneises cuarzo-feldespáticos y de granate del Complejo Oaxaqueño. Éste ha sido descrito como uno de los complejos metamórficos con mayor variedad petrológica en México; se encuentra en facies de granulita y tiene una edad grenvilliana con fechas entre 1.1 y 0.94 Ga (Keppie y Ortega-Gutiérrez, 1999; Solari *et al.*, 2003).

El Complejo Acatlán aflora al oeste, en el área de Los Reyes Metzontla, y al suroeste de La Compañía (Figura

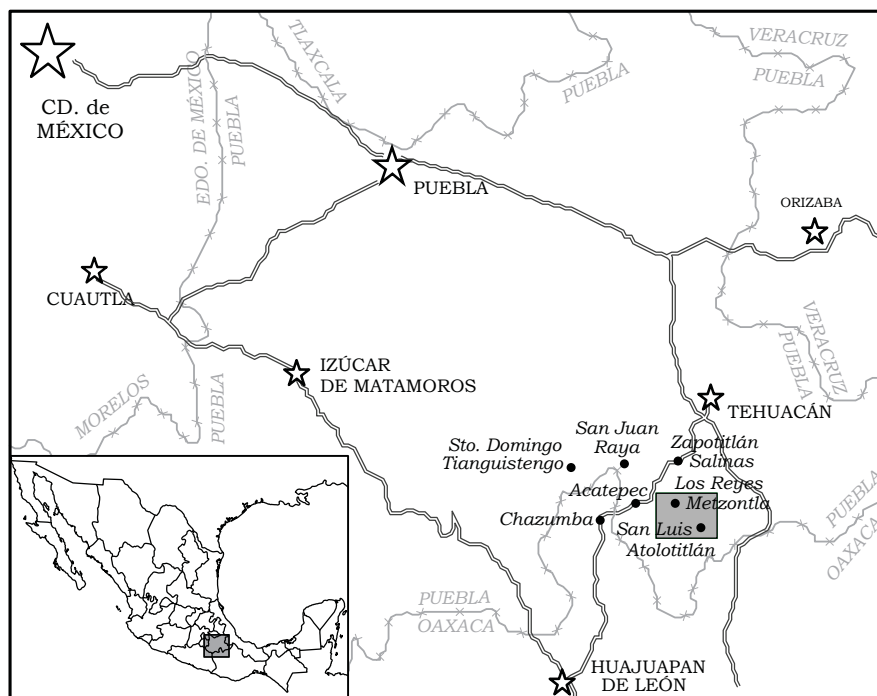


Figura 1. Localización del área de estudio.

2). Este complejo se originó por la deformación y polimetamorfismo asociados a un evento de colisión continental hace al menos 391 Ma; las rocas fueron metamorfizadas en condiciones de bajo a alto grado, y sufrieron otro evento de deformación aproximadamente hace 354 Ma (Ortega-Gutiérrez, 1978; Ortega *et al.*, 1999; Elías-Herrera *et al.*, 2005), aunque otros autores han debatido sobre la cronología de sus múltiples eventos de metamorfismo y deformación (Malone *et al.*, 2002; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005; Nance *et al.*, 2006). En particular, existe evidencia paleontológica y geocronológica de que la unidad más joven del Complejo Acatlán (Formación Tecomate) se depositó en el Leonardiano-Guadalupeño (Keppie *et al.*, 2004). En el área de estudio afloran esquistos verdes que pertenecen a dicho complejo. Además en el área está expuesto un cuerpo intrusivo milonitizado denominado Granito Cozahuico por Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez (2002). Este último se encuentra en una franja con orientación noroeste-sureste, en Los Reyes Metzontla y al suroeste de los poblados de La Compañía y Caltepec. Se trata de un granito porfírico con fenocristales de cuarzo y feldespato, fechado en 275.6 ± 1 Ma (U/Pb) (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 2002; Elías-Herrera *et al.*, 2005). Dicho granito se encuentra deformado y milonitizado y ha sido interpretado como la sutura entre los Complejos Acatlán y Oaxaca por los mismos autores.

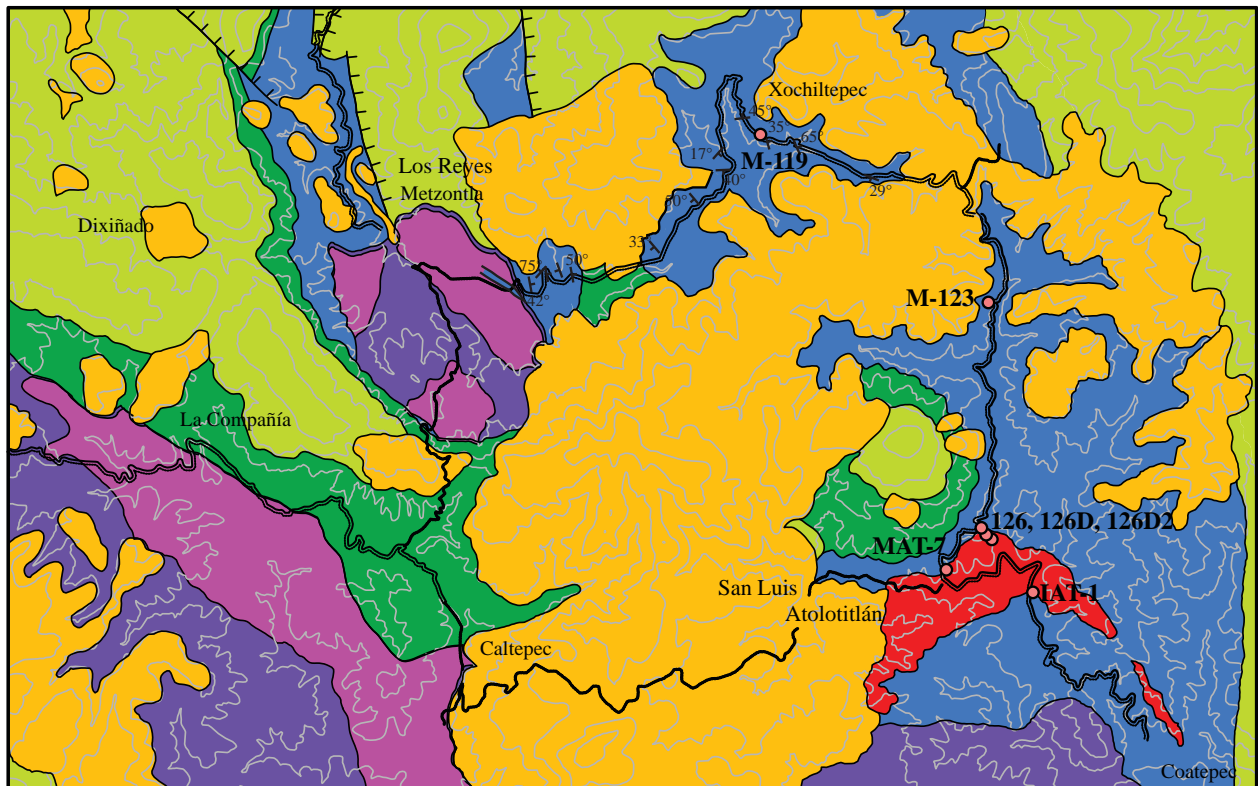
Cubierta sedimentaria

La primera unidad sedimentaria que descansa sobre los basamentos metamórficos es la Formación Matzitzi,

objetivo del presente trabajo. Esta unidad fue nombrada informalmente por Calderón-García (1956), quien la describió como una secuencia de 600 m de espesor de arenisca intercalada con lutita oscura, que en ocasiones contiene escasas lentes de conglomerado, capas de carbón y que presenta un gran contenido de restos de plantas fósiles. Esta unidad se describe con mayor detalle en el siguiente capítulo.

Sobre la Formación Matzitzi se encuentra una sucesión de capas rojas, la cual fue denominada informalmente por Calderón-García (1956) como 'lechos rojos'. Dicha unidad descansa discordantemente sobre la Formación Matzitzi y sobre las rocas cristalinas, y está constituida por una alternancia de conglomerados y areniscas cuarzo feldespáticas de color rojizo. Aflora en una franja noroeste-sureste que va de Caltepec a La Compañía, al oriente y poniente de Metzontla y al norte de San Luis Atolotitlán (Figura 2). Los conglomerados están formados por clastos metamórficos derivados de los Complejos Acatlán y Oaxaqueño, del Granito Cozahuico, y de areniscas de la Formación Matzitzi. La sucesión se acumuló en un ambiente fluvial con un relieve abrupto, aparentemente como abanicos aluviales, como se infiere por las estructuras primarias, tales como estratificación sinuosa a lenticular, estratificación incipiente, y estratificación cruzada tipo hamacada, observadas en los horizontes de areniscas. La edad de los 'lechos rojos' es incierta, pero por su posición estratigráfica y su semejanza litológica con las rocas que afloran en las localidades cercanas de Huajuapán de León y Santo Domingo Tianguistengo (Figura 1) se le ha asignado una edad del Jurásico (Morán-Zenteno *et al.*, 1993).

Sobre los 'lechos rojos' descansa, en forma concor-

97°32'02" W
18°15'17" N97°22'57" W
18°15'13" N97°32'05" W
18°09'52" N

UNIDADES GEOLÓGICAS

0 1000 2000 3000 m

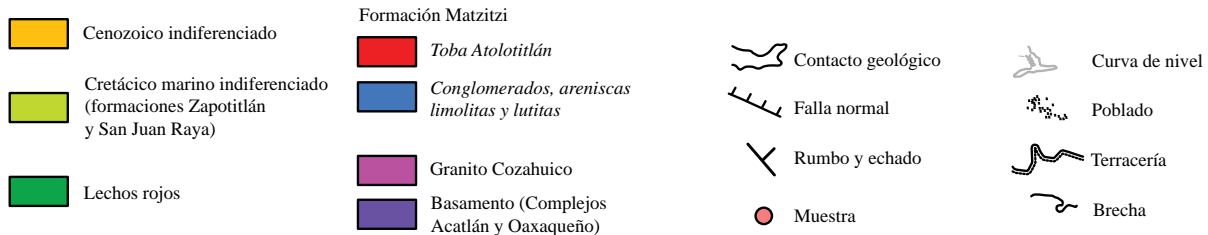
97°23'00" W
18°09'48" N

Figura 2. Mapa geológico del sector Metzontla-San Luis Atlotitlán, donde se muestra la ubicación de los mapas de facies de las Figuras 5 y 6, la sección esquemática de la Figura 10 y la ubicación de las muestras analizadas.

dante, una sucesión de areniscas y calizas, que se presentan en el mapa geológico de la Figura 2 como rocas marinas cretácicas (Formaciones Zapotitlán y San Juan Raya). Éstas consisten de arenisca de cuarzo, feldspatos y líticos, con una matriz calcárea, intercalada con lentes conglomeráticos con líticos de esquisto, gneis, granito y arenisca. La sucesión incluye intercalaciones de bancos calcáreos con fósiles de gasterópodos, pelecípodos y corales, y horizontes de margas. Con base en su contenido fósil se le ha dado a esta unidad una edad del Barremiano–Aptiano (Alencaster, 1956; Reyes-Navarro, 1963; De Cserna, 1970; Buitrón-Sánchez y Barceló-Duarte, 1980; Hernández-Láscares y Buitrón-Sánchez, 1992). Por su litología y estructuras primarias se infiere que dicha sucesión fue depositada en un ambiente marino somero.

Las unidades anteriores están cubiertas de manera

discordante por rocas volcánicas andesíticas a dacíticas, que alternan con un conglomerado formado por clastos de rocas volcánicas y sedimentarias. Este paquete que se representa en el mapa de la Figura 2 como Cenozoico indiferenciado, incluye además escasos depósitos fluviales y suelos recientes.

FORMACIÓN MATZITZI

Calderón-García (1956) denomina como Formación Matzitzi, y considera del Jurásico Medio(?), a la secuencia arcósica portadora de plantas fósiles que Aguilera (1896) reportó inicialmente con edad del Triásico tardío. Estudios posteriores realizados por Silva (1970), Weber *et al.* (1987), y Hernández-Láscares (2000) demostraron la

edad Paleozoica tardía de la unidad. En el área de estudio (Figura 2), la Formación Matzitzi está expuesta a lo largo del camino de terracería que comunica a los pueblos de Los Reyes Metzontla, Xochiltepec, San Luis Atolotitlán y Coatepec, Puebla. Sus mejores afloramientos se encuentran en las partes bajas, y en cañadas y arroyos, así como en los cortes realizados para la construcción de las terracerías. Presenta un drenaje subdendrítico muy espaciado, con un patrón ortogonal.

En el pueblo de San Luis Atolotitlán aflora un cuerpo de roca muy oxidado que en trabajos anteriores se describió como un intrusivo hipabisal emplazado en la Formación Matzitzi (Hernández-Láscares, 2000). Sin embargo, la cartografía detallada realizada por los autores del presente trabajo confirma que dicho cuerpo es una roca ígnea extrusiva que fue depositada contemporáneamente con las rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi. A dicha roca se le denominó Toba Atolotitlán, y se describe en detalle más adelante.

Litología

La Formación Matzitzi se compone de una sucesión clástica formada principalmente por arenisca y, en menor proporción, por estratos o paquetes de estratos de lutita, lodolita carbonosa, arenisca conglomerática y conglomerado. En su parte basal, que aflora en las afueras del poblado de Los Reyes Metzontla, contiene estratos masivos de conglomerados gruesos, formados por fragmentos metamórficos de tamaño de guijas a bloques procedentes principalmente del Complejo Oaxaqueño. La composición de las areniscas varía de arcosa, subcuarzoarenita a litarenita. La Formación Matzitzi presenta una gran variedad de plantas fósiles. Silva (1970), con base en el estudio detallado del material colectado por Teodoro Flores, determina una edad Pensilvánica. En tanto que Weber *et al.* (1987) y Magallón-Puebla (1991) proponen una edad Pérmica. Con base en una revisión sistemática de nuevos materiales colectados, Weber (1997) propone una edad del Leonardiano (Pérmico Temprano, 280–270.6 Ma; Gradstein *et al.*, 2004). Hernández-Láscares (2000) reporta haber medido 1,080 metros de espesor para la Formación Matzitzi. En esta unidad se distinguen las siguientes litofacies, cuyas características sedimentológicas y ambientes se describen más adelante.

Asociaciones de facies sedimentarias

La Formación Matzitzi se encuentra afectada por pliegues (tipo chevron) y fallas normales, inversas y laterales, principalmente a escala de afloramiento, aunque también los hay regionales, por lo cual no es posible realizar el levantamiento de una columna regional continua. Sin embargo, a escala de afloramiento, fue posible medir algunas pequeñas columnas estratigráficas. A partir de éstas, se determinaron

las asociaciones de facies más importantes. Dichas columnas fueron levantadas a lo largo del camino de terracería que comunica las poblaciones de Los Reyes Metzontla, Xochiltepec, San Luis Atolotitlán, y Coatepec (Figuras 2 y 3). En el presente trabajo se describen únicamente las facies identificadas a lo largo de los caminos antes mencionados, por lo cual se desconoce su distribución regional. Con base en las características de las asociaciones de facies, se llevó a cabo la reconstrucción del probable ambiente de depósito. Sin embargo, se requiere de un estudio sedimentológico más detallado, incluyendo observaciones de direcciones de corrientes y variabilidad regional de sus características texturales, para refinar la identificación de facies y el modelo ambiental presentados en este trabajo. Con el objetivo de simplificar la descripción, las facies identificadas fueron agrupadas en dos asociaciones de facies conglomeráticas, dos asociaciones principalmente arenosas y dos asociaciones arenosas/limosas (Figuras 3, 4, 5 y 6), las cuales se describen a continuación.

Asociación de facies 1a

Corresponde a conglomerados de matriz a clasto soportados, masivos, sin gradación ni estructuras primarias (Figuras 3 y 4a). El conglomerado es mal clasificado, con clastos bien redondeados a subredondeados que varían en tamaño de peñascos de hasta 60 cm a gránulos de 3 a 5 cm de diámetro. Su composición varía de un afloramiento a otro, aunque los clastos más abundantes son de gneis, cuarzo, y granito milonítico (Figura 4a); también contiene clastos de cuarzoarenita, caliza, y roca volcánica de composición máfica a intermedia. Esta facies constituye el conglomerado basal que aflora en el contacto entre el basamento metamórfico y la Formación Matzitzi en Los Reyes Metzontla (Figuras 2 y 5); también se identificaron un par de horizontes de espesor considerable que sobreyacen a las facies areno-limosas 2a y 3a, en el camino entre San Luis Atolotitlán y Coatepec (Figura 6). En esta última localidad, los clastos están bien redondeados y el conglomerado contiene peñascos erráticos de hasta 1.5–2 m de diámetro. Por sus características texturales y sedimentológicas, esta asociación corresponde a las facies Gmm (Grava masiva, soportada por matriz) y Gci (Grava soportada por clastos con gradación inversa) de Miall (1996). Se encuentra interestratificado con areniscas gruesas, con gradación normal e inversa, y escasos horizontes delgados de lutita carbonosa con impresiones de helechos, tallos y troncos. En este estudio es interpretada como depósitos de tipo aluvial (localidad de Los Reyes Metzontla) y fluvial de relleno de canal; probablemente fueron originados por flujos de escombros. Esta facies se encuentra formando estratos lenticulares de aproximadamente 3 a 5 m de longitud hacia la región de Los Reyes Metzontla. Los estratos con mayor espesor fueron observados en el camino a Coatepec, donde alcanzan los 3 m y tienen una extensión lateral de aproximadamente 100 m o más, formando un paquete de aproximadamente 80 m de espesor.

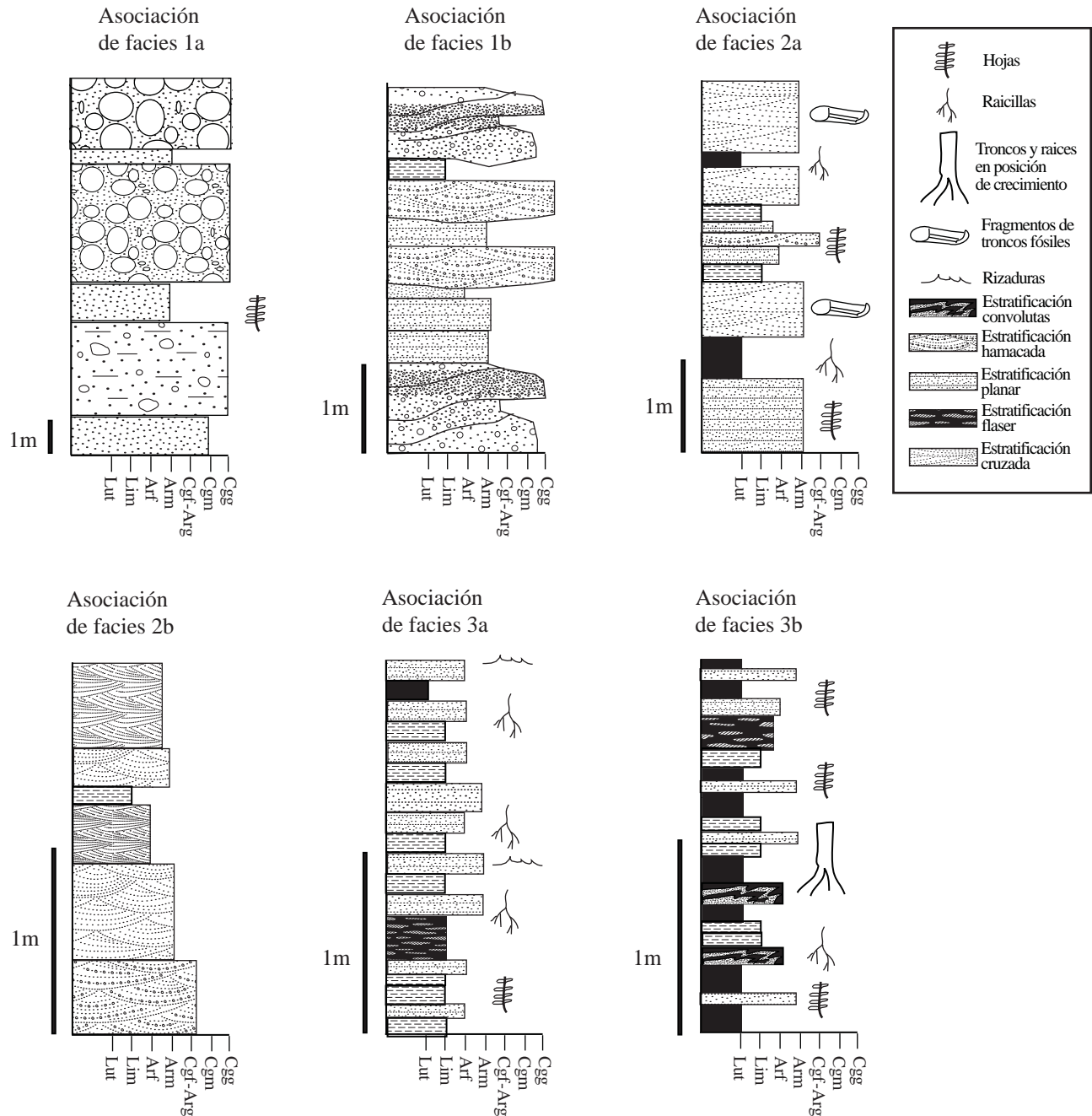


Figura 3. Columnas esquemáticas de las principales asociaciones de facies de las rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi. Lut: lutita, Lim: limolita, Arf: arenisca fina, Arm: arenisca media, Cgf-Arg: conglomerado fino o arenisca gruesa, Acg: arenisca conglomerática, Cgg: conglomerado grueso.

Asociación de facies 1b

Está formada por conglomerados soportados por clastos, en estratos lenticulares de delgados a gruesos, con gradación normal, alternando con facies de arenisca de grano grueso a medio. Su estratificación varía de horizontal a inclinada (Figura 3). En ocasiones las facies de conglomerados forman pequeños lentes dentro de estratos de arenisca más gruesos, o concentraciones locales de clastos gruesos, con estratificación cruzada hamacada. Los clastos varían de redondeados a subredondeados y a veces

están imbricados. La composición de los clastos es similar a la de los conglomerados de la facies 1a, y se encuentra principalmente en Los Reyes Metzontla (Figura 5). Esta asociación está constituida por las facies Gh (Grava con laminación horizontal), Gt (Grava con estratificación hamacada) y Gp (Grava con estratificación cruzada planar) de acuerdo con la clasificación de Miall (1996), las cuales probablemente fueron depositadas como *bedforms* transversales, barras y rellenos de canal (Miall, 1996). Ambas facies conglomeráticas representan alrededor del 20% del



Figura 4. Fotografías de algunas de las principales facies que constituyen la Formación Matzitz. a: Facies 1a, conglomerado soportado por matriz (flujos de escombros); b: facies 2a, arenisca con estratificación cruzada planar (mantos arenosos de desbordamiento); c: facies 2b, arenisca con estratificación cruzada hamacada (relleno de canales menores socavados por escorrentías); d) facies 3b, láminas de arenisca y lutita carbonosa interestratificadas con estratificación convoluta (facies de pantano).

total de las facies identificadas en la sección levantada a lo largo de los caminos (Figuras 5 y 6).

Asociación de facies 2a

Constituida por areniscas en estratos gruesos a medios, con ocasionales lentes de conglomerado fino, y algunos horizontes de limolita. Se presenta en estratos que van de muy gruesos a medianos (2m a 10 cm); éstos son no paralelos con base sinuosa o plana (Figuras 3 y 4b). Los estratos varían en extensión de canales angostos y con una base en forma de “V” muy pronunciada a estratos planares de varios metros de longitud (Figura 4b). Las areniscas de la asociación de facies 2a son masivas, o presentan estratificación cruzada simple y planar, aunque en ocasiones tienen estratificación cruzada hamacada y acreción lateral (Figura.4b). En la base de algunos estratos se presentan abundantes hojas y fragmentos de troncos fósiles. El tamaño de grano de las areniscas varía de grueso a mediano y su composición varía de arcosa, subcuarzoarenita a litarenita. En ocasiones presenta escasas intercalaciones de limolita con raicillas. Las estructuras primarias y características texturales son

similares a las de las facies Sp (Arena con estratificación cruzada planar), Sh (Arena con laminación horizontal), Sl (Arena con estratificación cruzada de bajo ángulo), Fsm (Limos y arcillas masivos), Fl (Limos y arcillas con rizaduras) y P (Paleosuelos) de Miall (1996). Éstas corresponden a mantos de areniscas depositados como rellenos de canal, acumulaciones (*bedforms*) longitudinales, y/o barras de punta (*point bar*) arenosas. Contiene escasos horizontes de limolita de diferentes espesores, algunos de ellos con desarrollo de paleosuelo, lo que sugiere un depósito de cima de barras (Miall, 1996). Esta facies es la más abundante de la Formación Matzitz (Figuras 5 y 6), presenta algunas intercalaciones de las facies 3a y 3b, y se puede observar en los cortes de la terracería entre Los Reyes Metzontla y San Luis Atolotitlán y cerca de Coatepec (Figuras 5 y 6). Los espesores aproximados de esta facies varían de 2 a 60 metros, aproximadamente.

Asociación de facies 2b

Es una asociación de facies arenosas, de finas a gruesas, que se presentan en estratos ondulados asimétricos, y

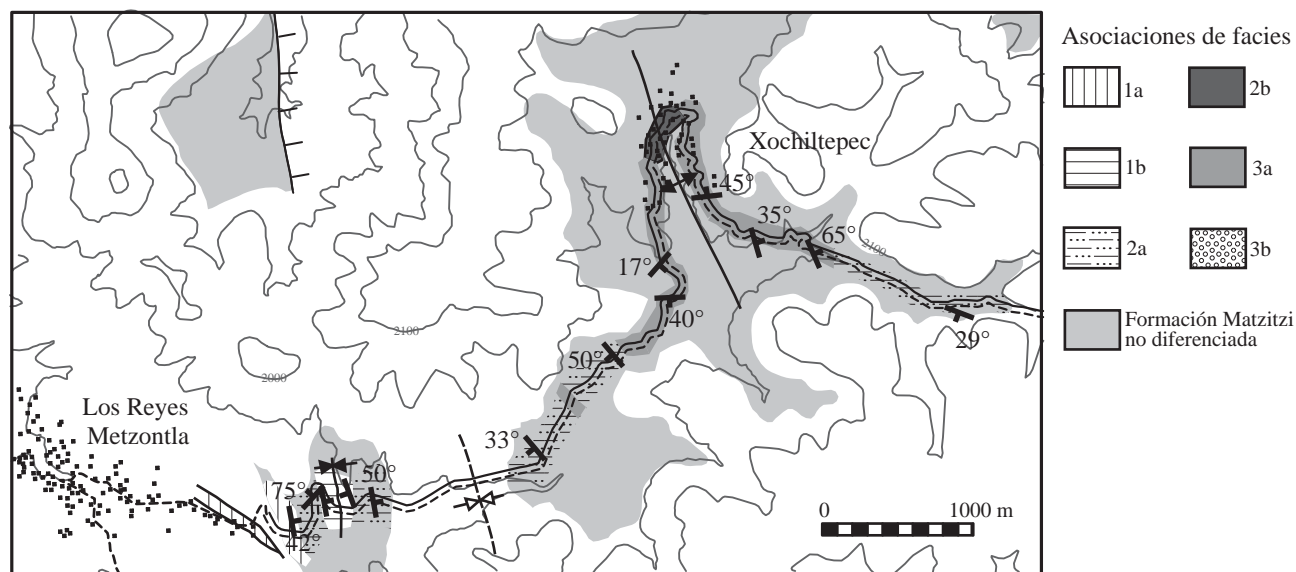


Figura 5. Mapa de distribución de las asociaciones de facies a lo largo del camino Los Reyes Metzontla-Xochiltepec (ubicación del mapa en la Figura 2).

que forman rellenos de canal sobreimpuestos de 1 a 30 cm de espesor (Figura 3). Presenta estratificación cruzada de tipo hamacada (Figuras 3 y 4c) y corresponde a las facies St (Arenas con estratificación cruzada hamacada) y Ss (Arenas de relleno) de Miall (1996). La mayoría fueron depósitos de canal, que rellenaron canales erosionados por pequeñas escorrentías (*scour hollows*) y algunas pueden ser el resultado de desbordamientos menores laterales (*crevasse splays*). Son abundantes en los afloramientos de la Formación Matzitzi en los cortes de la autopista Tehuacan-Oaxaca y sobre el Río Calapa (al sur, fuera del área representada en la Figura 2), aunque también se observó en el poblado de Xochiltepec (Figura 5).

Asociación de facies 3a

Está formada por una alternancia de areniscas finas a medianas, limolitas y lutitas, en estratos de espesores variables, de muy delgados a medianos (30 cm), aunque hay estratos masivos. Los estratos son paralelos, con base ligeramente sinuosa, a veces erosiva (Figura 3). En algunos hay bioturbación que hace que los contactos entre estratos se pierdan. Presenta estratificación cruzada de escala pequeña y algunas laminaciones, estratificación tipo *flaser*, estratificación convoluta, y algunas rizaduras. Contiene de pocas a abundantes raicillas y raíces grandes, bien desarrolladas, y en algunos horizontes hay evidencia de formación de paleosuelo. Contiene abundantes raíces y troncos gruesos *in situ*, que cortan la estratificación. Además presenta otros restos vegetales como troncos y hojas que en algunos horizontes son muy abundantes. Se distingue de la facies 3b porque predominan las areniscas y puede contener escasos lentes muy delgados de arenisca gruesa a conglomerado fino. Las lutitas y limolitas son menos carbonosas que aquellas de la facies 3b. Corresponde a las facies Sl, Sh, Fl Fsm y Fr (arcilla y limo masiva con bioturbación) de la clasificación

propuesta por Miall (1996). Esta asociación de facies se interpreta como depósitos de planicies de inundación y/o desbordamientos menores laterales (*crevasse splays*). Esta facies es muy abundante en el camino entre Xochiltepec y San Luis Atlotitlán (Figuras 5 y 6), tiene poca extensión lateral (desenas de metros) y el espesor varía de 1–2 m hasta más de 20 m.

Asociación de facies 3b

Esta facies corresponde a una sucesión de lutitas negras, lodolitas carbonosas y areniscas, en paquetes alternados de menos de 10 cm a más de 1 m (Figura 3). Tanto la arenisca como la lutita presentan estratificación laminar (continua a discontinua en distancias de centímetros a metros), estratificación tipo *flaser* y estratificación convoluta (Figura 4d). Se distingue de la facies 3a por la mayor proporción de lutitas (70% o más) y por la gran cantidad de materia orgánica, y contiene muy abundantes restos vegetales. Se correlaciona a las facies Fsm, Fl, Fr, Fm y C (carbón) de Miall (1996). Es en esta facies donde se han colectado la mayoría de las plantas fósiles estudiadas (*e.g.*, Silva, 1970; Weber *et al.* 1987) y se interpreta en este estudio como depósitos en pequeños pantanos asociados al sistema fluvial, o en planicies de inundación. Esta asociación de facies alterna con la facies 2a a lo largo del camino entre San Luis Atlotitlán y Coatepec, aunque el afloramiento con mayor espesor (aproximadamente 30 m) está en las afueras al norte de San Luis Atlotitlán (Figuras 5 y 6).

Rocas volcánicas

La Formación Matzitzi, de carácter predominantemente clástico, contiene escasas intercalaciones de capas delgadas de limolitas que aparentemente fueron tobas, pero en el

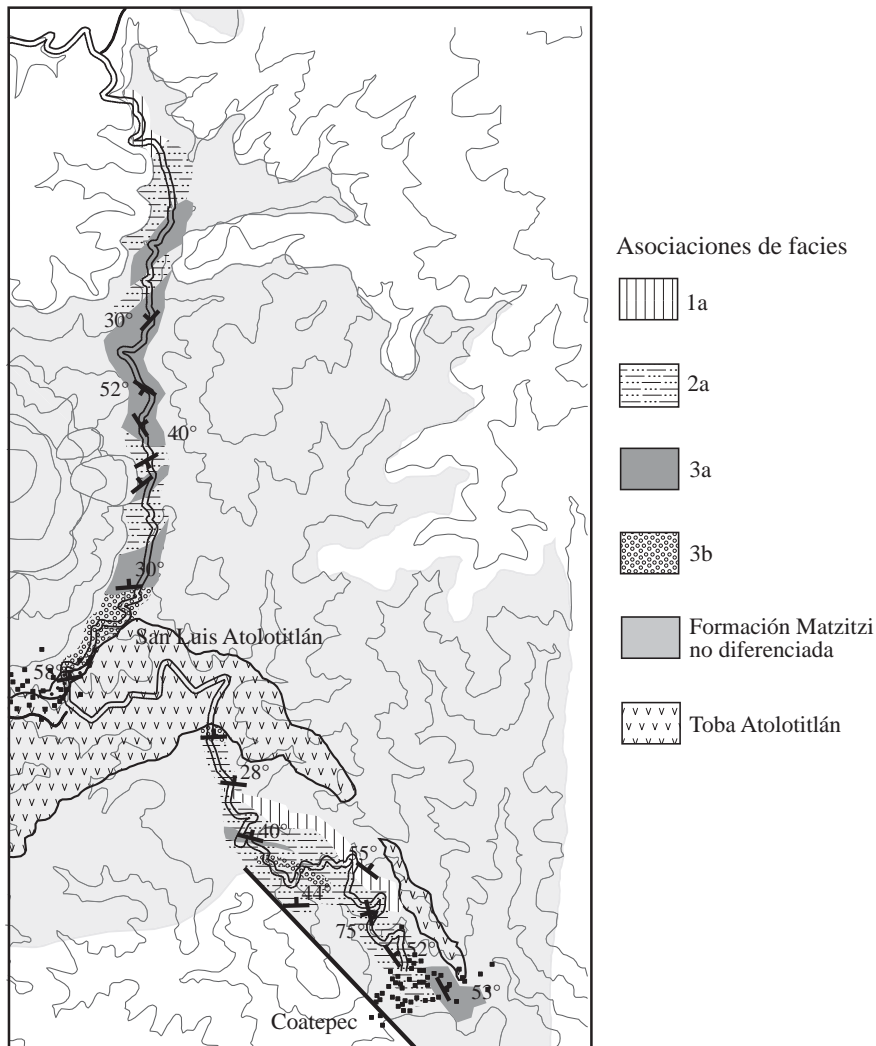


Figura 6. Mapa de distribución de las asociaciones de facies a lo largo del camino San Luis Atolotitlán-Coatepec (ubicación del mapa en la Figura 2).

poblado de San Luis Atolotitlán y en sus alrededores se encuentra el extenso afloramiento de una roca ígnea félsica. En el terreno es muy notable el contraste morfológico y cromático entre las rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi con tonos ocre y las lomas blanquecinas de dicha roca félsica, prácticamente desprovistas de vegetación. Se estima que el espesor máximo en afloramiento es de aproximadamente 500 m en el poblado de San Luis Atolotitlán; el cuerpo tiene una forma lenticular y se adelgaza hacia el sureste hasta desaparecer en las cercanías de Coatepec (Figura 2). A continuación se presentan las evidencias del origen extrusivo de éste cuerpo félsico, al cual se le denomina en el presente trabajo como Toba Atolotitlán.

Toba Atolotitlán

La Toba Atolotitlán en afloramiento es una roca félsica masiva, de colores claros que varían de verde a blanco, según el grado de intemperismo. En las zonas menos intem-

perizadas se distinguen zonas con textura cristalina, donde es posible reconocer con la lupa algunos fenocristales de feldespato y de cuarzo, aunque la mayor parte de la roca presenta una textura afanítica. La Toba Atolotitlán tiene relaciones estratigráficas concordantes con la Formación Matzitzi, como previamente fue reconocido por Hernández-Láscares (2000), sin embargo dicho autor la reporta como un intrusivo tabular (sill o manto).

Con el fin de establecer el carácter extrusivo o intrusivo de estas rocas, se realizó un muestreo vertical y lateral dentro de la Toba Atolotitlán. Se laminaron 20 muestras de roca que se estudiaron petrográficamente para reconocer la posible diversidad petrológica del cuerpo volcánico.

Las láminas delgadas estudiadas muestran que la roca es bastante homogénea en su mineralogía y sólo se observan variaciones texturales. La mayoría de las muestras presentan una textura porfírica (Figura 7), formada por fenocristales euhedrales de sanidino que tienen maclas de intercrecimiento (Figuras 7a y b) y en menor proporción de plagioclasa y

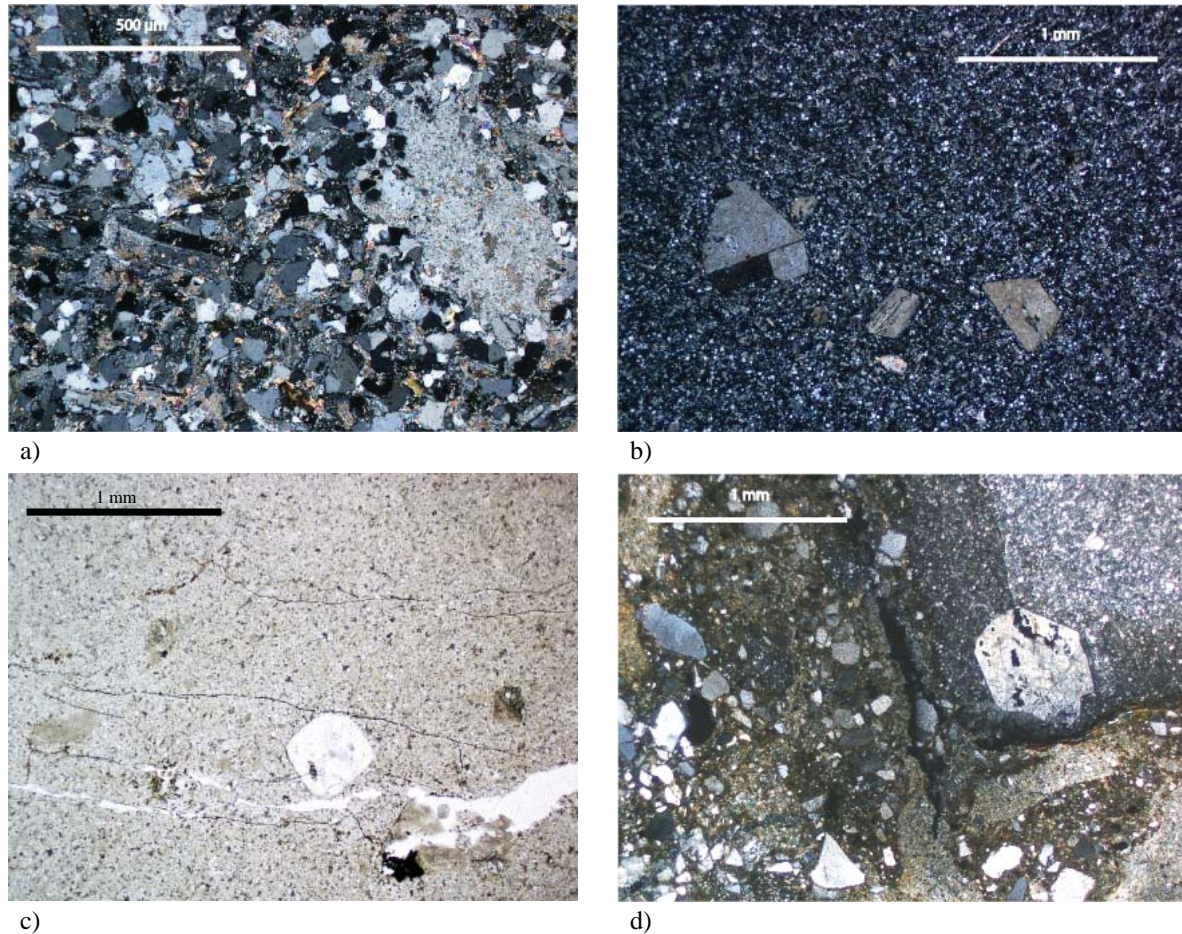


Figura 7. a-c: Fotomicrografías que muestran las características texturales de la Toba Atolotitlán; d: fotomicrografía de la arenisca depositada sobre la Toba Atolotitlán con un clasto derivado de dicha toba.

cuarzo que en algunos casos pudiera ser secundario (Figura 7a). Su matriz varía texturalmente de mosaico de cristales de cuarzo y feldespato intercrecidos, similar a la observada en cuerpos ígneos intrusivos, a texturas aparentemente traquíticas, con una orientación por flujo de los feldespatos (principalmente plagioclasa) que forman la matriz, la cual sigue el contorno de los fenocristales (Figuras 7b y c). No se encontraron minerales máficos y se observó que algunos fenocristales están parcialmente remplazados por sericita. La matriz se encuentra en parte remplazada por cuarzo, carbonatos y algunos cristales de clorita (Figura 7a y c). Debido a estas texturas, la roca había sido siempre descrita por otros autores como un cuerpo intrusivo (hipabisal), con menor tamaño de grano hacia los bordes del cuerpo.

Sin embargo, en el estudio detallado de las muestras en lámina delgada se observaron evidencias importantes del origen extrusivo: 1) aunque los cristales de plagioclasa dan la apariencia de microlitos, al observar las muestras sin nicóles cruzados, se distinguen claramente los remanentes de una textura eutaxítica (Figura 7c), característica de un flujo piroclástico; 2) se observaron fantasmas o relictos de esferulitas, que se distinguen por una distribución radial

de los feldespatos; y 3) hay también sombras de líticos que fueron totalmente reemplazados por feldespatos. Por estas razones, la textura de la roca se interpreta en el presente trabajo como una textura originada por un proceso de diagénesis (feldespatización) asociado a la desvitrificación, en el cual el crecimiento de los minerales autigénicos, preservó en parte las orientaciones del flujo. Sin embargo, las evidencias de campo que se enlistan a continuación son contundentes en cuanto al origen extrusivo de la Toba Atolotitlán:

1) La base es concordante con la estratificación de las limolitas carbonosas que subyacen a la roca félsica (Figura 8a), y las limolitas no presenta metamorfismo de contacto (Figura 6b). La base tiene cierta ondulación, que en partes es ligeramente erosiva y con presencia de intraclastos dentro de la toba, lo cual sugiere tracción-erosión, similar a las ondulitas de *surge* (Figura 8b). Esto es típico del emplazamiento de flujos piroclásticos fríos. Además, hacia la base, la felsita presenta una textura de flujo paralela a la estratificación (Figura 8c).

2) El cuerpo es paralelo a la estratificación y de forma lenticular, forma típica de un relleno de canal.

3) Presenta juntas de enfriamiento que no cortan



Figura 8. a: Fotografía del contacto inferior (paralelo y concordante) de la ignimbrita con la Formación Matzitzi en el Km. 2.0 del camino San Luis Atolotitlán–Coatepec, donde también se observan juntas de enfriamiento; b: acercamiento de dicho contacto donde se observa un contacto ligeramente sinuoso (erosivo); c: acercamiento que muestra la foliación de flujo en la base de la Toba Atolotitlán.



Figura 9. a: Fotografía del contacto superior de la Toba Atolotitlán con los estratos arenosos de la Formación Matzitzi; corte en el inicio de la terracería San Luis Atolotitlán–Coatepec, Puebla. Nótese el desarrollo de juntas que definen columnas hexagonales por enfriamiento en la ignimbrita; b: detalle de los estratos de arenisca conglomerática que sobreyacen a la Toba Atolotitlán; obsérvese la presencia de clastos angulosos de la ignimbrita soportados por una matriz arenosa, evidencia del carácter extrusivo de la felsita y su relación contemporánea con la Formación Matzitzi (longitud de la navaja: 9 cm); c: fotografía que muestra un acercamiento de la misma arenisca, con los clastos angulosos derivados de la Toba Atolotitlán.

a las lutitas y areniscas de las rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi que la subyacen y sobreyacen (Figura 8). La relación geométrica que guardan dichas juntas con la estratificación se discutirá más adelante.

4) El contacto entre su cima y las areniscas conglomeráticas de la Formación Matzitzi que la sobreyacen es paralelo pero ligeramente erosivo, tal como puede observarse en el kilómetro cero de la terracería San Luis Atolotitlán-Coatepec (Figura 9a). En esta localidad se observan también dentro de la arenisca clastos angulosos de hasta 15 cm de diámetro de la Toba Atolotitlán (Figura 9b y c), tal como lo indican sus características petrográficas texturales (Figura 7d). La presencia de estos clastos es una prueba más de la contemporaneidad del magmatismo y la sedimentación de las rocas siliciclásticas de la Formación Matzitzi, y que además sugiere la presencia de una discordancia erosiva menor en este nivel de la formación.

Se descarta la interpretación de que Toba Atolotitlán se originara como una toba de caída, porque no se observan relictos de estructuras de pseudoestratificación o gradación típicas de cenizas de caída. Tampoco se interpreta como un derrame de lava, en virtud de lo imperturbado de los sedimentos hacia la base, y porque además no presenta relictos de bandeamiento de flujo ni relictos de intervalos de autobrecha típico de los derrames félsicos. En campo no se identificó gradación o alguna discontinuidad dentro del cuerpo que permita establecer si se formó en un solo evento. Por su gran espesor es probable que sea el resultado de varias emisiones. Con excepción de la foliación de flujo hacia la base y la presencia de juntas de enfriamiento no se identificó algún otro rasgo primario.

En el área de San Luis Atolotitlán, la Formación Matzitzi y la Toba Atolotitlán presentan una estructura anticlinal amplia, con plano axial subvertical y charnela inclinada hacia el norte (Figura 2). El flanco occidental tiene un rumbo general S 50° W y se inclina 36 grados al noroeste, en tanto que el flanco oriental se inclina 50° al noreste y tiene un rumbo general N 50° W. La Toba Atolotitlán presenta cuatro familias de fracturas, una es paralela a la foliación por flujo y las otras con orientaciones casi perpendiculares a los contactos. Para corroborar que dicho fracturamiento, observado únicamente en la Toba Atolotitlán, corresponde a juntas de enfriamiento, se realizó una rotación geométrica de dichas estructuras. Si en efecto están asociadas al flujo éstas deben ser perpendiculares a la superficie de contacto.

Una de las evidencias importantes a favor del carácter primario del fracturamiento es que las fracturas definen elementos columnares de sección hexagonal, de menos de un metro de diámetro, lo cual es característico de cuerpos ígneos extrusivos. Las superficies de las juntas se aprecian nítidas y ligeramente curvas, pero no presentan ningún rasgo que indique que hayan acomodado deformación considerable, excepto ligeros desplazamientos a escala de centímetros de carácter normal durante la deformación postlitificación de la sucesión de la Formación Matzitzi, en la cual se intercala la toba.

En el campo se colectaron datos estructurales tanto de las fracturas como de la foliación por flujo y la estratificación de las lutitas y areniscas de la Formación Matzitzi. Estos datos se tomaron tanto en la cima de la toba como en la base (Figura 10a); dichos datos planares se graficaron como polos en diagramas estereográficos en los cuales es evidente la relación angular cercana a valores de 120° – 60° entre las juntas que definen las columnas hexagonales y la disposición subparalela de las superficies de foliación por flujo con las superficies de estratificación como se puede observar en la Figura 8.

Para reconstruir la posición original de las fracturas con respecto a la estratificación se realizó su corrección estructural, para lo cual se rotaron los datos estructurales de las juntas, utilizando la inclinación del echado y el rumbo de los estratos como eje. El giro tuvo sentido antihorario pero si había una estructura anticlinal, seguramente la corrección se hizo en un solo flanco. Los datos estructurales de la base se trataron con un giro de 20° y un eje al N 88° W, y los de la cima con un giro de 36° conforme a un eje al N 40° W (diagramas estereográficos de la Figura 10b). Después de la rotación, las rectas de intersección entre los planos de las juntas adquieren una posición subvertical que corresponde a la posición inicial de las columnas hexagonales originadas por enfriamiento, sobre todo en las columnas que se observan en la cima de la Toba Atolotitlán, mientras que los planos de foliación por flujo tienden a la horizontal como se observa en los diagramas de la Figura 10b. La falta de paralelismo estricto entre los planos de foliación por flujo y la estratificación de la Formación Matzitzi pudiera deberse a una inclinación primaria del depósito sedimentario inferior por agradación de las barras y canales.

Las evidencias listadas en los párrafos anteriores sugieren que la Toba Atolotitlán fue originalmente un flujo piroclástico (Cas y Wright, 1987). Probablemente una ignimbrita pumicítica fría (esto por las características del contacto inferior previamente listadas). La Toba Atolotitlán tendría que haber sido una roca pumicítica de grano fino, con pocos cristales de cuarzo y abundante sanidino. No parece haber sufrido una diagénesis de alta temperatura porque no se observaron en el campo evidencias de emplazamiento de alta temperatura, ya que no hay metamorfismo de contacto. Es probable que su textura de mosaico de cristales intercrecidos y los aparentes microlitos de plagioclasa se hayan originado por un proceso de desvitrificación, ocurrido como parte ya de los procesos de diagénesis.

GEOQUÍMICA DE LA TOBA ATOLOTITLÁN

Se realizaron análisis multielementales de roca total de tres muestras de la Toba Atolotitlán colectadas en las cercanías al pueblo del mismo nombre, éstas provienen de diferentes niveles en una sección transversal a la estratificación. La muestra 126 se colectó cerca de la cima, la 126D en la parte intermedia y la 126D2 dos metros abajo

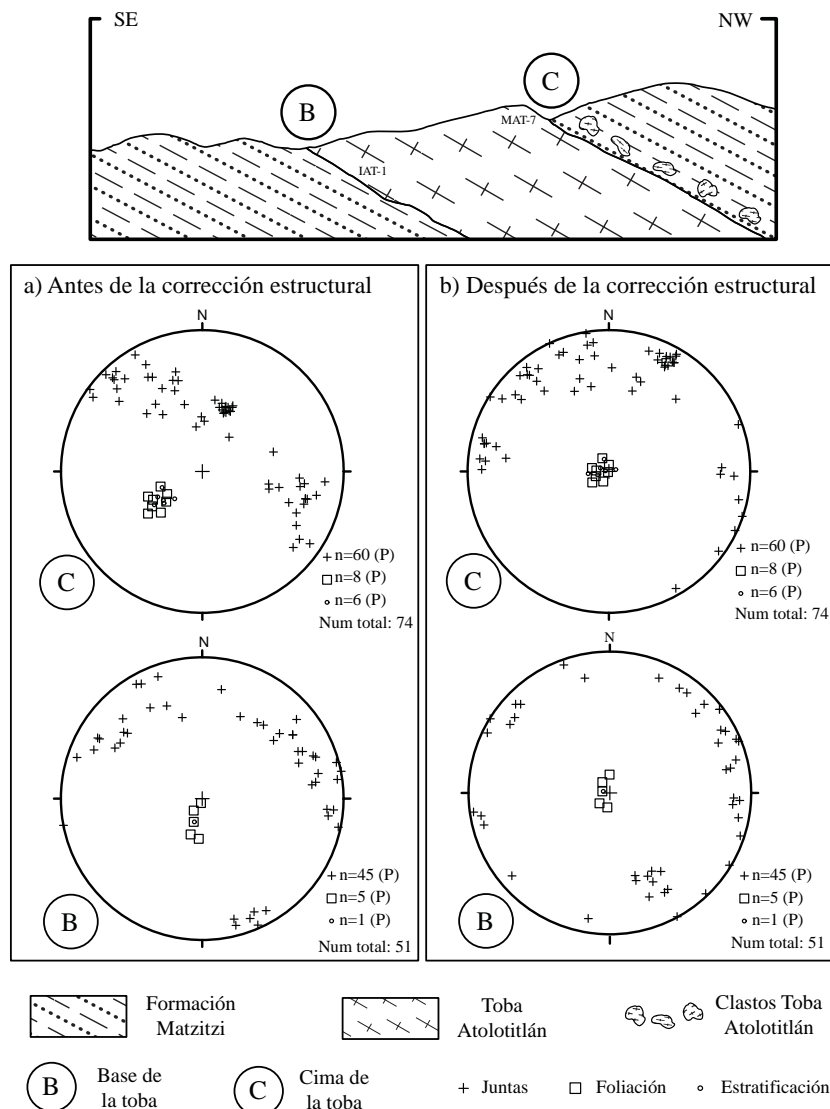


Figura 10. Sección esquemática (no a escala) de la relación estratigráfica entre la porción sedimentaria de la Formación Matzitz y la Toba Atolotitlán (ubicación en figura 2). Diagramas estereográficos de planos estructurales en la Red de Schmidt (hemisferio inferior). a: Diagramas de los datos colectados en la base (IAT-1) y en la cima de la Toba Atolotitlán (MAT-7). Note la disposición subparalela entre la foliación por flujo de la ignimbrita y la estratificación de la Formación Matzitz. b: Diagramas estereográficos que muestran los datos planares después de su corrección estructural con base en la rotación de los planos de estratificación hasta su posición horizontal (20° en sentido antihorario conforme a un eje horizontal con dirección al N 88° W para la base y 36° en sentido antihorario conforme a un eje horizontal con dirección N 40° W). Note la posición subvertical que adoptan las juntas después de la corrección.

estratigráficamente de la muestra 126D (Figura 2). Los análisis fueron hechos por Fluorescencia de Rayos X y por Activación Neutrónica en los laboratorios ActLabs en Ontario, Canadá. No se colectaron más muestras para análisis geoquímicos debido a que, en otras zonas de afloramiento, la Toba Atolotitlán se encuentra muy intemperizada. Aunque son pocos los datos obtenidos, consideramos que son significativos, ya que no presentan variaciones, a pesar de haber sido tomados en distintos niveles. Además, en láminas delgadas de muestras colectadas en diversos puntos de la toba, se observa la misma composición mineralógica, con variaciones sólo en el tamaño de sus mine-

rales. Las muestras analizadas se escogieron con base en sus características petrográficas, ya que preservan rasgos aparentemente primarios (fotografías en figura 7). Se colectó y procesó suficiente muestra para homogeneizar por la diferencia de tamaño de grano, la roca no es lo suficientemente fanerítica como para tener diferencias mayores en la composición por análisis de roca total. Las tres muestras corresponden a una composición riódacítica/dacítica (Tabla 1, Figura 11), con 74–75 % en peso de SiO_2 , 5.0–5.4 % en peso de K_2O y 1.8–2.0 % en peso de Na_2O , con bajos porcentajes de MgO (0.3–0.4 % en peso) y altos contenidos de Ba (420–530 ppm), característicos de magmatismo conti-

mental calcalcalino silíceo.

Los patrones de elementos de las Tierras Raras (REE) normalizados a condrita (valores de condrita de Sun y McDonough, 1989) muestran concentraciones altas de REE (ΣREE_N 227–240), con un enriquecimiento en los elementos de las Tierras Raras ligeras, una ligera anomalía negativa de Eu y patrones planos de los elementos de las Tierras Raras pesadas (La/Yb_N 15.6–17.2) (Figura 12a) que son parecidos a los de rocas volcánicas asociadas a arcos volcánicos continentales actuales.

El diagrama de elementos traza normalizado con respecto a MORB (Pearce, 1983) (Figura 12b) muestra que la Toba Atolotitlán está enriquecida en elementos incompatibles, presenta anomalía positiva de Pb, valores bajos de Ce, P, Nb, Ta y Zr, y en particular presenta muy baja concentración de Ti, este tipo de patrones son típicos de magmatismo asociado a subducción (e.g., Wilson, 1989; Vogel *et al.*, 2004).

El empobrecimiento en elementos incompatibles como Nb, Y y Ta es característico de magmatismo asociado a subducción, como se muestra en los diagramas de discriminación tectónica propuestos por Harris *et al.* (1986) y Pearce *et al.* (1983) para rocas graníticas, y que son también utilizados para rocas ígneas extrusivas de composición riolítica (Figuras 13a y 13b). Las muestras de la Toba Atolotitlán caen en el campo de granitos de arco volcánico. Por otra parte, firmas geoquímicas como las obtenidas en el presente estudio pueden también presentarse en volcanismo asociado a otros ambientes tectónicos que no sean arcos asociados a la subducción, si es que existe una porción considerable de participación de la corteza continental en la formación de los magmas. Por lo tanto, las interpretaciones sobre el probable carácter de arco del volcanismo de la Formación Matzitzi deben ser corroboradas utilizando determinaciones de relaciones isotópicas iniciales (p. ej. análisis isotópicos de Rb/Sr, Sm/Nd y Pb/Pb).

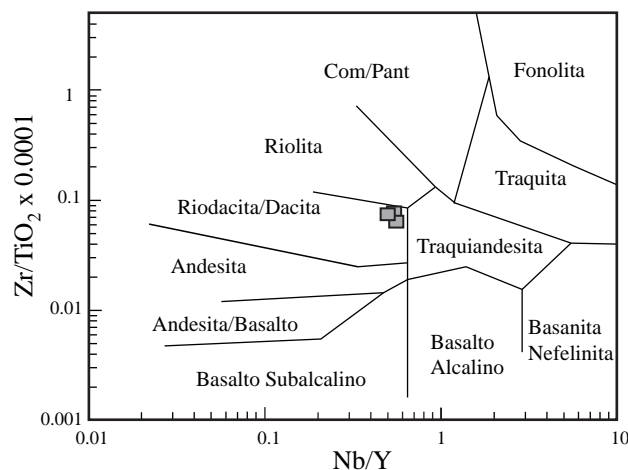


Figura 11. Diagrama de clasificación de rocas ígneas propuesto por Winchester y Floyd (1977). La Toba Atolotitlán cae en el campo de las riodacitas.

Tabla 1. Análisis multielemental de roca total de la Toba Atolotitlán.

Muestra		I-126E	I-126D2	I-126D	G-2 ^a	G-2 ^b
SiO ₂	%	74.23	74.45	75	69.08	68.66
TiO ₂	%	0.114	0.105	0.112	0.48	0.477
Al ₂ O ₃	%	14.31	14.19	14.14	15.35	15.36
Fe ₂ O ₃	%	1.52	1.38	1.34	2.66	2.67
MnO	%	0.03	0.023	0.025	0.032	0.033
MgO	%	0.38	0.46	0.38	0.75	0.76
CaO	%	0.53	0.67	0.72	1.96	1.96
Na ₂ O	%	5.38	5.24	5.09	4.08	4.1
K ₂ O	%	1.83	1.98	2.06	4.48	4.52
P ₂ O ₅	%	0.06	0.06	0.06	0.14	0.14
LOI	%	1.86	1.74	1.57		
Total	%	100.25	100.29	100.49		
Be	ppm	1	1	1	2.5	2
Sc	ppm	–	–	1	3.5	3
V	ppm	–	–	–	36	34
Cr	ppm	–	23	–	90	93
Co	ppm	–	–	–	43	44
Ga	ppm	18	18	17	19	20
Ge	ppm	0.9	1	0.9	1.6	1
Rb	ppm	43	48	49	23	20
Sr	ppm	201	200	198	191	194
Y	ppm	7.5	7.9	7.7	21.6	24
Zr	ppm	82	82	85	98	94
Nb	ppm	3.8	4.1	3.8	7.6	7.9
Mo	ppm	–	–	–	–	0.6
Cs	ppm	1.2	1.4	1.5	1	1
Ba	ppm	420	495	538	178	182
Yb	ppm	0.68	0.69	0.72	11	11
La	ppm	15.3	16.6	15.7	2.96	6
Ce	ppm	28.8	28.7	28.5	12.7	14
Pr	ppm	3.09	3.28	3.1	3.21	3
Nd	ppm	10.8	11.5	11	1.17	1
Sm	ppm	1.91	2.06	2	3.52	4
Eu	ppm	0.49	0.522	0.493	0.63	0.63
Gd	ppm	1.69	1.8	1.71	3.97	4
Tb	ppm	0.24	0.26	0.24	0.82	0.8
Dy	ppm	1.3	1.43	1.37	2.4	2.5
Ho	ppm	0.24	0.26	0.26	0.357	0.4
Er	ppm	0.69	0.73	0.73	2.4	2.5
Tm	ppm	0.103	0.109	0.112	0.357	0.4
Lu	ppm	0.09	0.096	0.095	0.311	0.3
Hf	ppm	2.4	2.4	2.5	2.6	2.56
Ta	ppm	0.5	0.66	0.5	0.59	0.5
Th	ppm	3.82	3.91	3.96	2.3	2.2
U	ppm	1.16	1.22	1.19	0.55	0.53

^a Valores medidos en el material de referencia G-2 (granito); ^b Valores de referencia para el material G-2.

ISÓTOPOS DE Sm-Nd EN ROCAS SEDIMENTARIAS DE LA FORMACIÓN MATZITZI

Dos muestras de rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi, una limolita y una arenisca, fueron analizadas para determinar las relaciones isotópicas de Sm-Nd (roca total). Los análisis se realizaron en los laboratorios del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona con un espectrómetro de masas VG-354, siguiendo los procedimientos descritos en Patchett y Ruiz (1987). Los

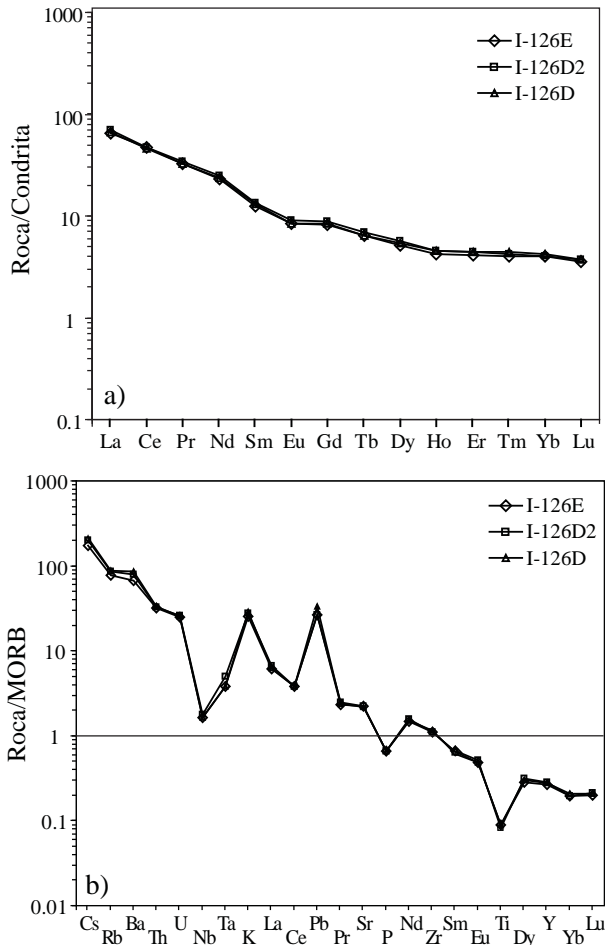


Figura 12. a: Diagrama de la abundancia de elementos de las Tierras Raras normalizada a condrita para la Toba Atolotitlán, con un enriquecimiento en tierras raras ligeras y una ligera anomalía negativa de Eu (normalización con valores propuestos por Sun y McDonough, 1989); b: diagrama de elementos traza normalizados con respecto a basaltos de dorsal oceánica (MORB; valores de normalización tomados de Pearce, 1983). Los patrones son similares a los de rocas félsicas de arcos actuales.

blancos son $Nd < 300$ pg y los duplicados desplegaron diferencias de menos de +0.2 unidades de ϵNd . Las muestras 119 y 123 fueron colectadas en la parte media-superior de la formación, en el camino entre Xochiltepec y San Luis Atolotitlán (ver Figura 2 para su localización).

Los resultados de los análisis isotópicos de Sm-Nd se presentan en la Tabla 2. Las muestras tienen valores de ϵNd inicial (260 Ma) de -7.71 y -8.51 y edades modelo T_{DM} de 1.52 y 1.57 Ga, y sugieren que estos siliciclásticos fueron derivados de una corteza continental evolucionada. Estas razones isotópicas y edades modelo se encuentran dentro del rango de valores obtenidos en el Complejo Oaxaqueño y otros basamentos Proterozoicos de México (1.3 a 1.8 Ga) (Ruiz et al., 1988; Weber y Köhler, 1999), además indican que no hubo aporte, o hubo un aporte mínimo, de una fuente volcánica contemporánea, ya que las rocas ígneas del Pérmico Inferior de Hidalgo, y los granitos Permo-Triásicos

del sur de México tienen edades modelo entre 0.61 y 1.3 Ga. (Torres et al., 1999; Rosales-Lagarde et al., 2005).

DISCUSIÓN

Ambiente de depósito y afinidad tectónica

Las observaciones preliminares de las características sedimentológicas de la Formación Matzitzí presentadas en este trabajo sugieren que el ambiente de depósito fue fluvial, con presencia de flujos de escombros conglomeráticos y abundantes depósitos de canales arenosos con sus distintas facies, que contienen algunos pequeños canales conglomeráticos (barras, *overbank*, *bedforms*, *crevasse splay*, etc.). Estos cambiaban lateral y verticalmente a planicies de inundación y pantanos. Con la información colectada en este trabajo se propone un río anastomosado como modelo de facies preliminar para la Formación Matzitzí (Figura

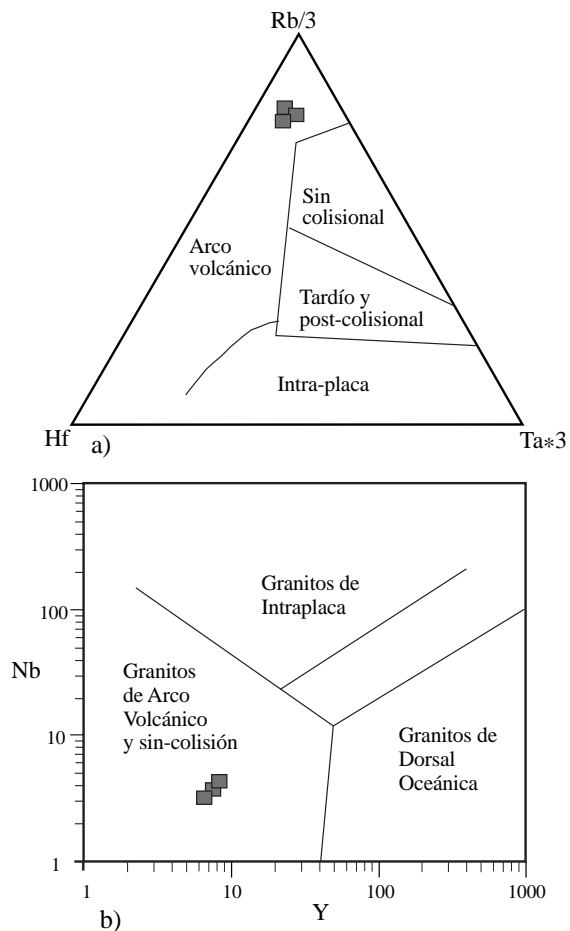


Figura 13. Diagramas de discriminación tectónica propuestos por (a) Harris et al. (1986) y (b) Pearce (1983), para diferenciar granitos originados en distintos ambientes tectónicos (se utilizan estos diagramas debido a la composición félsica de la Toba Atolotitlán), los cuales sugieren un origen de arco volcánico para dicha toba.

Tabla 2. Análisis de isótopos de Sm/Nd de roca total de rocas sedimentarias de la Formación Matzitzi.

Tipo de roca	Muestra	Edad (Ma)	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T_{DM} (Ma)	ϵNd	$\epsilon\text{Nd}(i)$
Arenisca	119	260	11.23	56.08	0.121024	0.512114	1,523	-10.21	-7.71
Lutita	123	260	11.21	56.77	0.119397	0.512070	1,568	-11.07	-8.51

14). Lo anterior con base en la observación de que los ríos anastomosados tienden a presentar gradientes bajos y baja energía de corriente, que da lugar a mantos arenosos y canales amplios como los observados en la formación. Además, los ríos anastomosados se caracterizan por canales limitados por amplias planicies de inundación y pantanos de tamaños variables, donde se acumula la materia orgánica que dio lugar a las lodolitas carbonosas.

Aunque la sedimentación es similar a la observada en algunos ambientes de planicie deltaica actuales, se requiere de un estudio sedimentológico más detallado para determinar si los depósitos de la Formación Matzitzi corresponden o no a un delta. La composición de los clastos de conglomerados y areniscas indican una fuente principalmente de basamento cristalino, ya que los clastos son principalmente de gneisses y granitos con texturas miloníticas, aunque se han encontrado escasos clastos de esquistos, areniscas y rocas ígneas que sugieren una fuente de orógeno reciclado. El origen de la fuente es apoyado por los isótopos de Sm/Nd, ya que las muestras de arenisca y lutita tienen edades modelo de 1.5 Ga. La presencia de clastos de cuarzoarenita y caliza sugieren la erosión de sucesiones sedimentarias paleozoicas más antiguas.

Como se mencionó anteriormente, la Toba Atolotitlán fue originalmente descrita como un cuerpo intrusivo (*stock*

volcánico), de edad desconocida, emplazado en la Formación Matzitzi. En el presente artículo se documentan por primera vez las evidencias de su carácter extrusivo y su probable afinidad petrotectónica de arco. Las características y las relaciones de campo permiten reconocer a la felsita como un (o una serie de) flujo(s) piroclástico(s) intercalado en la sucesión clástica y no como un *sill* o dique como previamente se había caracterizado (Torres *et al.*, 1986; Hernández-Láscares, 2000). Su carácter sinsedimentario con el depósito de las rocas clásticas de la Formación Matzitzi, cambia las interpretaciones previas con respecto a la edad de dicho cuerpo y al ambiente tectónico de dicha formación.

La Toba Atolotitlán es de composición riodacítica/dacítica y presenta bajas concentraciones de ciertos elementos como el Nb, Ti, Eu y P y altos valores normalizados de elementos de las Tierras Raras ligeras que sugieren un origen en una zona de subducción. Esta interpretación es válida sólo si se descarta una elevada contaminación cortical. Sin embargo, el contexto geológico regional (ver discusión más adelante), indican que probablemente el volcanismo de la Formación Matzitzi sí estuvo asociado a subducción.

Aparte de la Toba Atolotitlán, las únicas evidencias de magmatismo en la formación son escasas capas de lutita de colores claros que aparentemente corresponden a epiclásticos o cenizas de caída. Los conglomerados presentan

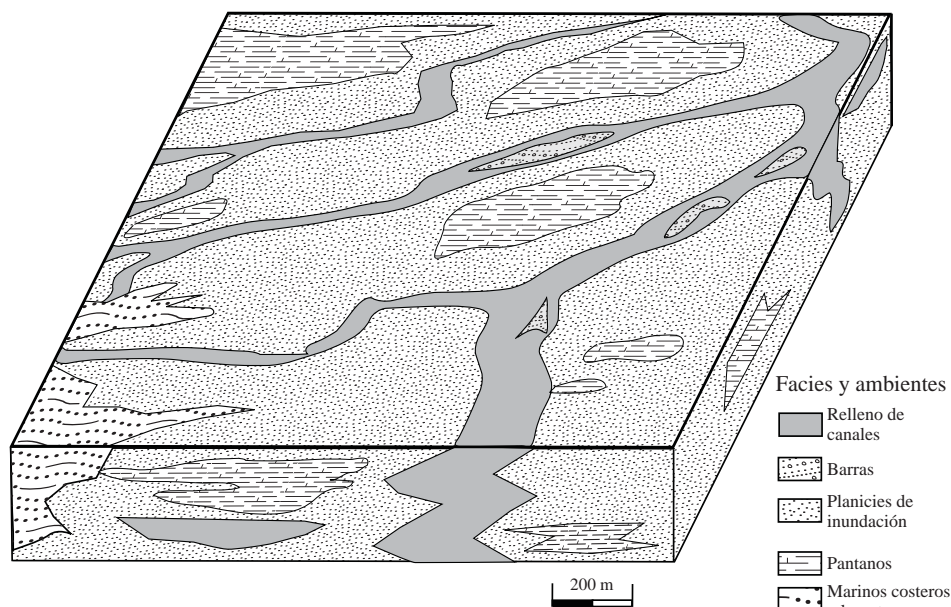


Figura 14. Esquema de modelo de facies para la Formación Matzitzi y su probable ambiente de depósito.

muy escasos clastos de toba y rocas volcánicas. Como el área total de los afloramientos de las rocas de la Formación Matzitzi no es muy grande, se desconoce si hubo otros flujos piroclásticos contemporáneos. Con base en lo que se observó en afloramientos en el presente estudio, se puede inferir que la proporción de rocas volcánicas con respecto a las rocas sedimentarias es menor al 5%. Esto indica que la Formación Matzitzi se depositó en un área con baja actividad volcánica. La Toba Atolotitlán probablemente se originó por una serie de eventos explosivos que acumuló un paquete de flujos piroclásticos en la región. Condiciones similares se presentan en ambientes actuales de la zona de trasarco, donde los sedimentos procedentes de áreas alejadas del arco se mezclan con los flujos piroclásticos provenientes del arco. Como ejemplos actuales están las cuencas de trasarco andinas y otras cuencas en Australia (Busby e Ingersol, 1995; Davis y Henderson, 1994).

Correlación y significado regional

La correlación regional del evento magmático representado por la Toba Atolotitlán con otras rocas ígneas Paleozoicas se dificulta al no contar con una edad absoluta. Con base en el análisis de la flora fósil, Weber (1997) propone una edad Leonardiano (~280 – 270.6 Ma; Gradstein et al., 2004), aunque el mismo autor menciona que se requieren más estudios para reafirmar dicha edad. Los mismos ejemplares de plantas fósiles que se utilizaron para fechar la formación se encuentran tanto en las rocas sedimentarias depositadas sobre la Toba Atolotitlán, como en las rocas sedimentarias que la subyacen, por lo cual se asigna a dicha edad.

Por lo tanto, el volcanismo de la Formación Matzitzi se traslapa en edad con un importante evento de volcanismo de arco registrado en el Complejo Acatlán (Formación Tecomate), el cual contiene abundantes rocas volcánicas de composiciones intermedias y félsicas, y cuyo rango de edad se encuentra entre el Pensilvánico Superior y el Pérmico Inferior (Leonardiano-Guadalupeño) (Keppie et al., 2004). El magmatismo de edad Wolfcampiano-Leonardiano estuvo ampliamente distribuido hacia el norte del actual Cinturón Volcánico Transmexicano, y se ha identificado en las regiones de Molango, Hidalgo, en Ciudad Victoria, Tamaulipas y en Delicias, Coahuila, que constituyen el Arco Tuzancoa-Delicias (López, 1997; Centeno-García et al., 1997; McKee et al., 1999; Rosales-Lagarde et al., 2005; observaciones de campo de los autores). Sin embargo el magmatismo en estas áreas es submarino, de composición menos evolucionada (basaltos a andesitas), y presenta un menor fraccionamiento en las tierras raras comparado con los patrones obtenidos de la Toba Atolotitlán (Figura 15). Otros reportes de magmatismo Pérmico en el sur de México son los abundantes cuerpos graníticos emplazados en el Complejo Oaxaqueño, cuyas edades K/Ar varían del Pérmico al Triásico Temprano (282–240 Ma), aunque sólo dos de ellos han sido fechados

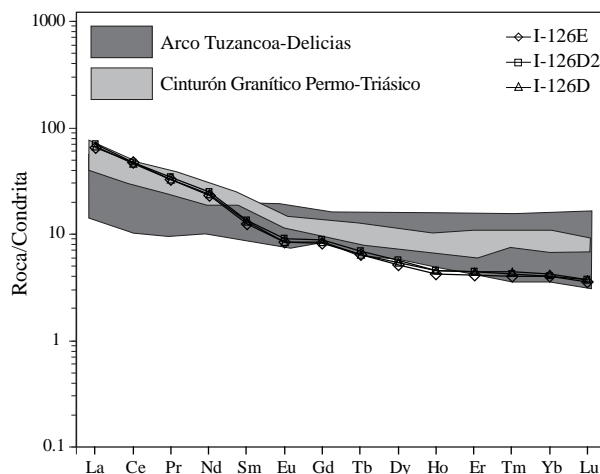


Figura 15. Comparación de los patrones de elementos de las Tierras Raras de la Toba Atolotitlán con los obtenidos por López (1997) y Rosales-Lagarde et al. (2005) en basaltos andesíticos del arco Delicias-Tuzancoa en Hidalgo y Coahuila y por Torres et al. (1999) y Solari et al. (2001) en granitoides que cortan al Complejo Oaxaqueño en el sur de México.

por U/Pb, con edades del Pérmico Temprano (287 y 275 Ma) (Torres-Vargas et al., 1999; Solari, 2001). La Toba Atolotitlán tiene una composición geoquímica más próxima a la de estos granitos, como lo sugiere la similitud en los patrones de tierras raras representados en la Figura 15.

Al oeste-suroeste de los afloramientos de la Formación Matzitzi se encuentra el cuerpo granítico milonitizado (Granito Cozahuico) cuyas edades isotópicas (U/Pb 275–270 Ma, Ar/Ar 268 Ma) (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 2002; Elías-Herrera et al., 2005). Evidencias de campo sugieren que dicho granito se emplazó, deformó y exhumó antes del depósito de la Formación Matzitzi (Elías-Herrera et al., 2005). Con los datos disponibles al momento, se puede concluir que el vulcanismo de la sucesión estudiada se traslapa en edad tanto con la Formación Tecomate, perteneciente al Complejo Acatlán, como con los granitos pérmicos del sur de México y las rocas volcánicas pérmicas (Arco Tuzancoa-Delicias) al norte del actual Cinturón Volcánico Transmexicano.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se inició con el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México a través del proyecto PAPIIT IN101095 y se finalizó gracias al proyecto PAPIIT IN109605. Un agradecimiento especial a M. en C. José Luis Sánchez Zavala por su colaboración en el trabajo de campo y discusión de los datos obtenidos. Agradecemos al Quím. Pablo Peñaflor de la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología por su apoyo en la preparación de las muestras para los análisis geoquímicos. En particular agradecemos a J. Patchett y a C. Isachsen por habernos permitido realizar los análisis de

isótopos de Sm/Nd en los laboratorios del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona. Agradecemos también a los pobladores de las comunidades de Los Reyes Metzontla, Xochiltepec, San Luis Atolotitlán, Coatepec, Caltepec y La Compañía las facilidades brindadas para realizar el trabajo de campo. Un especial agradecimiento al Dr. Dante Morán, a dos árbitros anónimos y al editor Dr. Carlos González León, cuyos comentarios enriquecieron y mejoraron el presente artículo.

REFERENCIAS

- Aguilera, J.G., 1896, Bosquejo geológico de México: Instituto Geológico de México, Boletines 4, 5 y 6.
- Alencaster, G., 1956, Pelecipodos y gasterópodos de la región de San Juan Raya, Estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 2, 47 p.
- Buitrón-Sánchez, B.E., Barceló-Duarte, J., 1980, Nerineidos (Mollusca-Gastropoda) del Cretácico Inferior de la región de San Juan Raya, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología 4(1), 46-55.
- Busby, C.J., Ingersoll, R.V., 1995, Tectonics of Sedimentary Basins: Cambridge, Massachusetts, Blackwell Science, 579 p.
- Calderón-García, A., 1956, Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Puebla, en XX Congreso Geológico Internacional, Libro guía Excursión A-11: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 9-27.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V., 1987, Volcanic Successions: London, Allen and Unwin, 450 p.
- Centeno-García, E., Sanchez-Zavala J.L., Patchett J., Isachsen C., Sour-Tovar F., Ortega-Gutiérrez F., 1997, Stratigraphy, Nd isotopes, sediment provenance, and paleogeography of Paleozoic sequences in Southern Mexico (abstract), en Terrane Dynamics-97, International Conference on Terrane Geology: Christchurch, New Zealand, 42-45.
- Davis, B.K., Henderson, R.A., 1994, Rift-phase extensional fabrics of the back-arc Drummond Basin, eastern Australia: Basin Research, 8, 371-381.
- De Cserna, Z., 1970, Lower Cretaceous pelecypods and gastropods from the San Juan Raya-Zapotitlan region, State of Puebla, Mexico, en Libro Guía de la excursión México-Oaxaca: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, 37-50.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., 2002, Caltepec fault zone: an Early Permian dextral transpressional boundary between the Proterozoic Oaxacan and Paleozoic Acatlán complexes, southern Mexico, and regional tectonic implications: Tectonics, 21(3), 4-19.
- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sánchez-Zavala J.L., Macías-Romo C., Ortega-Rivera, A., Iriondo, A., 2005, La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales del sur de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, 42(1), 83-109.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., 2004, A Geologic Time Scale 2004: Cambridge University Press, 500 p.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision zone magmatism, in Coward, M.P., Reis, A.C. (eds.), Collision Tectonics: Oxford, Blackwell Scientific, Geological Society Special Publication, 19, 67-81.
- Hernández-Láscares, D., 2000, Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la Formación Matzitzi, área Los Reyes Metzontla-Santiago Coatepec, extremo suroriental del estado de Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, tesis de maestría, 117 p.
- Hernández-Láscares, D., Buitrón-Sánchez, B., 1992, Bioestratigrafía del Cretácico inferior (Aptiano) en el Cerro Matzitzi, región de San Luis Atolotitlan, estado de Puebla: Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología 5(1), 55-69.
- Keppie, J.D., Ortega-Gutiérrez, F., 1999, Middle American Precambrian basement: A missing piece of reconstructed I-Ga Origen: Geological Society of America, Special Paper 336, 199-210.
- Keppie, J.D., Sandberg, C.A., Miller, B.V., Sánchez-Zavala, J.L., Nance, R.D., Poole, F.G., 2004, Implications of latest Pennsylvanian to Middle Permian paleontological and U-Pb SHRIMP data from the Tecamate Formation to re-dating tectonothermal events in the Acatlán Complex, southern Mexico: International Geology Review, 46(8), 745-754.
- López, R., 1997, High-Mg andesites from the Gila Bend Mountains, southwestern Arizona; evidence for hydrous melting of lithosphere during Miocene extension; the pre-Jurassic geotectonic evolution of the Coahuila Terrane, northwestern Mexico; Grenville basement, a late Paleozoic arc, Triassic plutonism, and the events south of the Ouachita suture: University of California, Santa Cruz, tesis doctoral, 147 p.
- Magallón-Puebla, S.A. 1991, Estudio sistemático y biométrico de helechos del tipo Pecopteris (Marattiales; Pteridophyta) de la Formación Matzitzi (Permo-Carbonífero), estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis licenciatura, 110 p.
- Malone, J.R., Nance, R.D., Keppie, J.D., Dostal, J., 2002, Deformational history of part of the Acatlán Complex: Late Ordovician-Early Silurian and Early Permian orogenesis in southern Mexico: Journal of South American Earth Sciences, 15(5), 511-524.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Anderson, T.H., 1999, Late Paleozoic and early Mesozoic history of the Las Delicias Terrane, Coahuila, Mexico in Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico: Geological Society of America, Special Paper 340, 161-189.
- Miall A.D., 1996, The Geology of Fluvial Deposits: Springer, 582 p.
- Morán-Zenteno, D.J., Caballero-Miranda, C.I., Silva-Romo, G., Ortega-Guerrero, B., González-Torres, E. 1993, Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, southern Mexico: Geofísica Internacional, 32(3), 453-473.
- Nance, R.D., Miller, B.V., Keppie, J.D., Murphy J.B., Dostal, J., 2006, Comment on "U-Pb geochronology of the Acatlán Complex and implications for the Paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern Mexico" by O. Talavera-Mendoza, J. Ruiz, G.E. Gehrels, D.M. Meza-Figueroa, R. Vega-Granillo and M.F. Campa-Uranga [Earth Planet. Sci. Lett. 235 (2005) 682-699]: Earth and Planetary Science Letters, 245(1-2) 471-475.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978, Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados de Puebla y Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 2(2), 112-131.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., López, R., 1999, Late Ordovician-Early Silurian continental collision orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections: Geology, 27(8), 719-722.
- Patchett, P.J., Ruiz, J., 1987, Nd isotopic ages of crust formation and metamorphism in the Precambrian of eastern and southern México: Contributions to Mineralogy and Petrology, 96, 523-528.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, in Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (eds.), Continental Basalts and Mantle Xenoliths: Nantwich, Shiva, 230-249.
- Reyerros-Navarro, M. M., 1963, Corales del Cretácico Inferior de San Juan Raya, Estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 17, 21 p.
- Rosales-Lagarde L., Centeno-García E., Dostal J., Sour-Tovar F., Ochoa-Camarillo H., Quiroz-Barroso S., 2005, The Tuzancoa Formation of Hidalgo State: evidence of a Carboniferous-Permian submarine arc built on continental crust in eastern Mexico: International Geology Review, 47(9), 901-919.

- Ruiz, J., Patchett, P.J., Ortega-Gutierrez, F., 1988, Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of México from Nd isotopic studies: *Geological Society of America, Bulletin*, 100(2), 247-281.
- Silva, P.A., 1970, Plantas del Pensilvánico de la región de Tehuacan: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana*, 29, 108 p.
- Solari, L.A., Dostal J., Ortega-Gutiérrez F., Keppie, J.D., 2001, The 275 Ma arc-related La Carbonera stock in the northern Oaxacan Complex of southern Mexico: U-Pb geochronology and geochemistry: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 149-161.
- Solari, L.A., Keppie, J.D., Ortega-Gutierrez, F., Cameron, K.L., Lopez, R., Hames, W.E., 2003, 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico; roots of an orogen: *Tectonophysics*, 365(1-4), 257-282.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, *in* Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*: Oxford, Geological Society of London, Blackwell Scientific, 42, 313-345.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G.E., Meza-Figueroa, D.M., Vega-Granillo, R. Campa-Uranga, R.M.F., 2005, U-Pb geochronology of the Acatlán Complex and implications for the Paleozoic paleogeography and tectonic evolution of southern Mexico: *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 682-699.
- Torres, R., Murillo, G., Grajales, M., 1986, Estudio petrográfico y radiométrico de la porción norte del límite entre los complejos Acatlán y Oaxaca (resumen), *en* VIII Convención Geológica Nacional, Resúmenes, Sociedad Geológica Mexicana, 148-149.
- Torres-Vargas, R., Ruiz, J., Patchett, P.J., Grajales-Nishimura, J.M., 1999, Permo-Triassic continental arc in eastern Mexico: Tectonic implications for reconstructions of southern North America, *in* Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico*: Geological Society of America, Special Paper 340, 191-196.
- Vogel, T.A., Patino, L.C., Alvarado, G.E., Gans, P.B., 2004, Silicic ignimbrites within the Costa Rican volcanic front: evidence for the formation of continental crust: *Earth and Planetary Science Letters*, 226(1-2), 149-159.
- Weber, B., Köhler, H., 1999, Sm-Nd, Rb-Sr and U-Pb geochronology of a Grenville Terrane in Southern Mexico: origin and geologic history of the Guichicovi Complex: *Precambrian Research*, 96, 245-262.
- Weber, R., 1997, How old is the Triassic flora of Sonora and Tamaulipas, and news on Leonardian floras in Puebla and Hidalgo, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(2), 225-243.
- Weber, R., Centeno-García, E., Magallón-Puebla, S.A., 1987, La Formación Matzitzzi tiene edad permocarbonífera (resumen), *en* II Simposio sobre la Geología Regional de México, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 57-59.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*: London, Unwin Hyman Ltd, 465 p.
- Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*, 20, 325-343.

Manuscrito recibido: Marzo 4, 2008

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 9, 2008

Manuscrito aceptado: Octubre 9, 2008