

# GEOLOGÍA Y PALEOAMBIENTE DE LA CANTERA TLAYÚA, TEPEXI DE RODRÍGUEZ, ESTADO DE PUEBLA

Jerjes Pantoja-Alor\*

## RESUMEN

Por la abundancia, variedad y conservación de su paleobiota, la cantera Tlayúa constituye una de las localidades fosilíferas cretácicas (Albiano) más importantes de América del Norte. Se localiza muy cerca de Tepexi de Rodríguez, unos 60 km al SE de la ciudad de Puebla, en terrenos de la Mixteca Alta.

Para la caliza que aflora en la barranca sobre la que se desarrolla la cantera, se propone formalmente el nombre de Formación Tlayúa, la cual comprende una secuencia incompleta de unos 300 m de espesor, que fue dividida en tres miembros: Inferior, Medio y Superior. La edad de la formación en la localidad-tipo abarca desde el Albiano temprano hasta la parte más alta del Albiano tardío, límites cronológicos que pueden variar fuera del área en estudio.

Para el Albiano de la región, se propone un modelo sedimentológico y paleoambiental, que supone una amplia plataforma cubierta por un mar somero, de energía cinética de moderada a débil, con áreas positivas que generan ambientes litorales y lagunares de subplataforma interna, intermedia o de mar abierto, con islas, cayos o barras de relieve bajo, desarrolladas sobre un substrato calcáreo. El ambiente del Miembro Medio, el más importante desde el punto de vista paleontológico, corresponde a un medio lagunar postarrecifal, con una zona intermareal extensa, de relieve suave y superficie de inundación amplia, con arrastre de fauna alóctona durante las mareas y las tormentas, y de arrastre-deseccación con formación de albercas y zonas bajas (pozas donde queda atrapada la fauna) durante la marea baja.

Palabras clave: paleoambiente, sedimentología, Formación Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México.

## ABSTRACT

Due to the abundance, variety and preservation of the paleobiota, the Tlayúa quarry is one of the most important fossiliferous localities of the Albian of North America. It is located near Tepexi de Rodríguez, approximately 60 km SE of the city of Puebla, in the northern part of the Mixteca Alta region.

The name Tlayúa Formation is formally proposed for the limestone outcropping in the quarry and along the Barranca de Tlayúa. It consists of an incomplete sequence of 300 m in thickness, that was divided in three members: Lower, Middle and Upper. The age of the formation in the type locality ranges from early to late Albian, time limits that can vary outside of the study area. For the Albian of the Mixteca region a sedimentologic and paleoenvironmental model is proposed, consisting of a wide and extensive platform covered by shallow marine waters, with moderate to low energy. Some positive relief areas generate littoral and lagunar environments of internal, intermediate or open-sea subplatform with islands, shoals and bars resting on a calcareous substratum. The environment of the Middle Member, paleontologically the most important, corresponds to a shallow back-reef lagunar environment, with periodical intertidal flat zones of wide flooding surface, dragging allochthonous fauna during high tide and storms, and dragging-dissipation with development of shallow pools and small cavities (where the fauna is trapped) during low tide.

Key words: paleoenvironment, sedimentology, Tlayúa Formation, Tepexi de Rodríguez, Puebla, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

### ANTECEDENTES

La cantera Tlayúa fue descubierta en el año de 1959; es propiedad de la familia Aranguthy, que la concesionó bajo un convenio especial, en el año de 1989, a la Universidad Nacional Autónoma de México, quien es depositaria, a través del Museo de Paleontología del Instituto de Geología, de todos los especímenes y del material fosilífero que de ella se obtenga. Desde el

inicio de la explotación se empezó a encontrar algunos peces fosilizados, los cuales fueron obsequiados a coleccionistas o a personas interesadas en su estudio.

La primera noticia sobre una cantera de la que eran obtenidos ejemplares muy bien conservados fue publicada por Moller (1980). Con esta información, paleontólogos del Instituto de Geología de la UNAM visitaron la cantera y se interesaron en el estudio de la fauna de esta localidad.

Posteriormente, en 1981, el Instituto de Geología, por mediación del Dr. Shelton P. Applegate, firmó un convenio de cooperación científica con la National Geographic Society, la cual otorgó un apoyo económico para el desarrollo paleontológico de la localidad. En el año de 1985, la National Science Foundation proporcionó otra subvención para continuar con la exploración de

\* Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D. F.

la cantera. Actualmente, las investigaciones continúan bajo el patrocinio de un proyecto de investigación (CYT/1472) por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

A partir de la información sobre el descubrimiento, numerosas publicaciones sobre la paleobiota de la cantera y de la localidad han aparecido en la literatura paleontológica. Destacan los libretos-guía elaborados por Applegate y Espinosa-Arrubarrena (1982), Applegate y colaboradores (1984), y por Buitrón y Malpica-Cruz (1987), un estudio geológico realizado por Petróleos Mexicanos (Fernández-Becerra, 1985), otro por Applegate (1987) y uno sobre generalidades de la geología y del paleoambiente (Martill, 1989a). Antes de este último artículo, varios investigadores del Instituto de Geología iniciaron una serie de estudios sobre la geología, las facies y la tectónica de la cantera (Pantoja-Alor *et al.*, 1989; Malpica-Cruz *et al.*, 1989; Galguera-Rosas *et al.*, 1989), cuyos avances fueron publicados en la Memoria del Tercer Simposio sobre Geología Regional de México, organizado por el Instituto de Geología en mayo de 1990. El acervo paleontológico del área de estudio se ha incrementado con una tesis profesional sobre un nuevo género de la familia Macrosemiidae (González-Rodríguez, 1989) y la descripción de un nuevo género de holósteo de la familia Ophiopsidae (Applegate, 1989).

#### LOCALIZACIÓN Y ACCESO

La cantera Tlayúa está ubicada aproximadamente 2 km al SE de la Colonia Morelos, e inmediatamente al norte del pueblo de Tepexi de Rodríguez, que a su vez se localiza en la parte meridional del Estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son 97°54'W y 18°35'N.

La región cuenta con una infraestructura vial buena, que consiste en carreteras pavimentadas y caminos con revestimiento de grava. Partiendo de la ciudad de Puebla, el acceso se realiza por la antigua Carretera Federal núm. 150, en su tramo Puebla-Tehuacán, hasta llegar al entronque de La Colorada, pasando la población de Tepeaca, de donde parte la Carretera Estatal núm. 455, que conduce a San Juan Ixcaquixtla y cruza por los pueblos de Zacaola, Tepyahualco, Molcaxac y Tepexi de Rodríguez. Poco antes de llegar a esta última población (Km 42) parte de la Colonia Morelos una brecha que conduce a la cantera, la cual se sigue aproximadamente por 2 km (Figura 1).

#### GEOLOGÍA REGIONAL

Debido a la tectónica de bloques que desde el Paleozoico tardío afecta al elemento tectónico positivo conocido como "península de Oaxaca", las variaciones en los ciclos de depósito y erosión, aun en muy corta distancia, no permiten observar una secuencia continua del registro estratigráfico que caracteriza la región. La historia geológica únicamente se puede establecer con base en secciones compuestas o con interpolaciones estratigráficas de los diferentes bloques observados en el área.

La roca más antigua que aflora en los alrededores de Tepexi de Rodríguez, consiste en esquisto del Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978), de edad paleozoica temprana, que está cubierto en discordancia angular o contacto tectónico por filita y esquisto, de grado bajo de metamorfismo, de una unidad del Paleozoico tardío, a la cual tentativamente se le asigna el nombre de formación Romero por aflorar en la barranca de ese nombre, localizada a unos 7 km al SW de Tepexi de Rodríguez. Las secuencias paleozoicas están cubiertas, en discordancia angular, por capas rojas terrígenas y lentes calcáreas del Jurásico Medio-Superior, el Neocomiano y el Aptiano (Ortega-Guerrero, 1989).

Sobre las rocas paleozoicas yace una secuencia gruesa de caliza de plataforma, con bancos arrecifales, cuya edad varía del

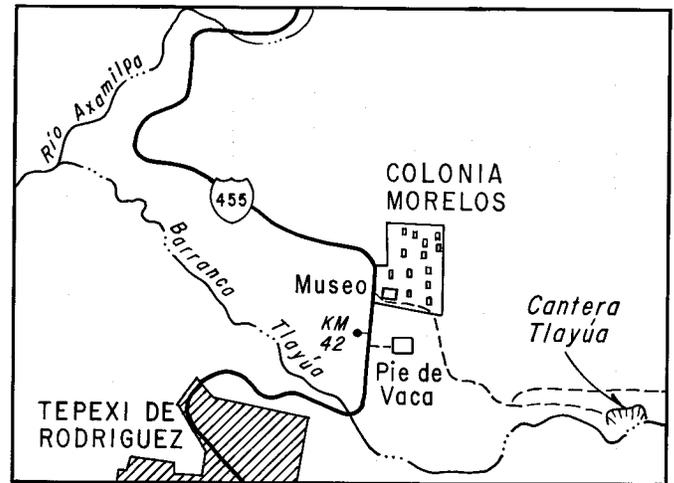
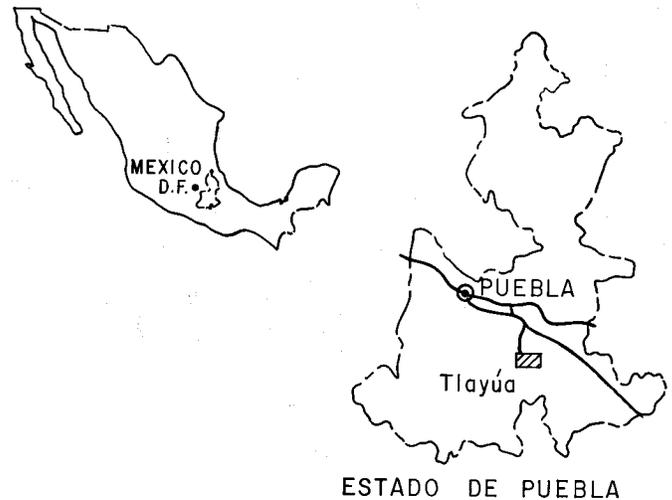


Figura 1.- Mapa de localización de la región de Tepexi de Rodríguez y de la cantera Tlayúa, Estado de Puebla.

Aptiano tardío al Turoniano. Fuera del área, el levantamiento de la parte meridional y occidental de la región proporcionó, hacia el norte y fuera del área, el *flysch* de la Formación Mexcala, del Coniaciano-Santoniano (Padilla y Sánchez, 1973; Monroy-Fernández y Sosa-Patrón, 1984).

Sobre las rocas cretácicas, descansan en marcada discordancia angular los conglomerados continentales eocénico-oligocénicos de la formación Tepexi Viejo (unidad recién descubierta; Pantoja-Alor, en preparación) y de la Formación Balsas, a los que también cubren sedimentos continentales fluviolacustres y aluviales de las formaciones Pie de Vaca y Agua de Luna (Pantoja-Alor *et al.*, 1989), a las cuales se asigna una edad del Plioceno y Pleistoceno, respectivamente. Los mejores afloramientos de esta sección están expuestos en el cauce del río Axamilpa, fuera del área cartografiada.

#### GEOLOGÍA DE LA CANTERA TLAYÚA

Para proporcionar un marco estratigráfico y tectónico de apoyo a los estudios paleontológicos, a finales de 1987 se inició el levantamiento geológico-estratigráfico de la cantera Tlayúa, con brújula y cinta. Durante el trabajo de campo, se levantó un mapa de escala 1:1,000, que cubre una superficie aproximada de 1 km<sup>2</sup>, parte del cual corresponde a la Figura 2; también se levantó una sección de apoyo para el control del muestreo y para estudios

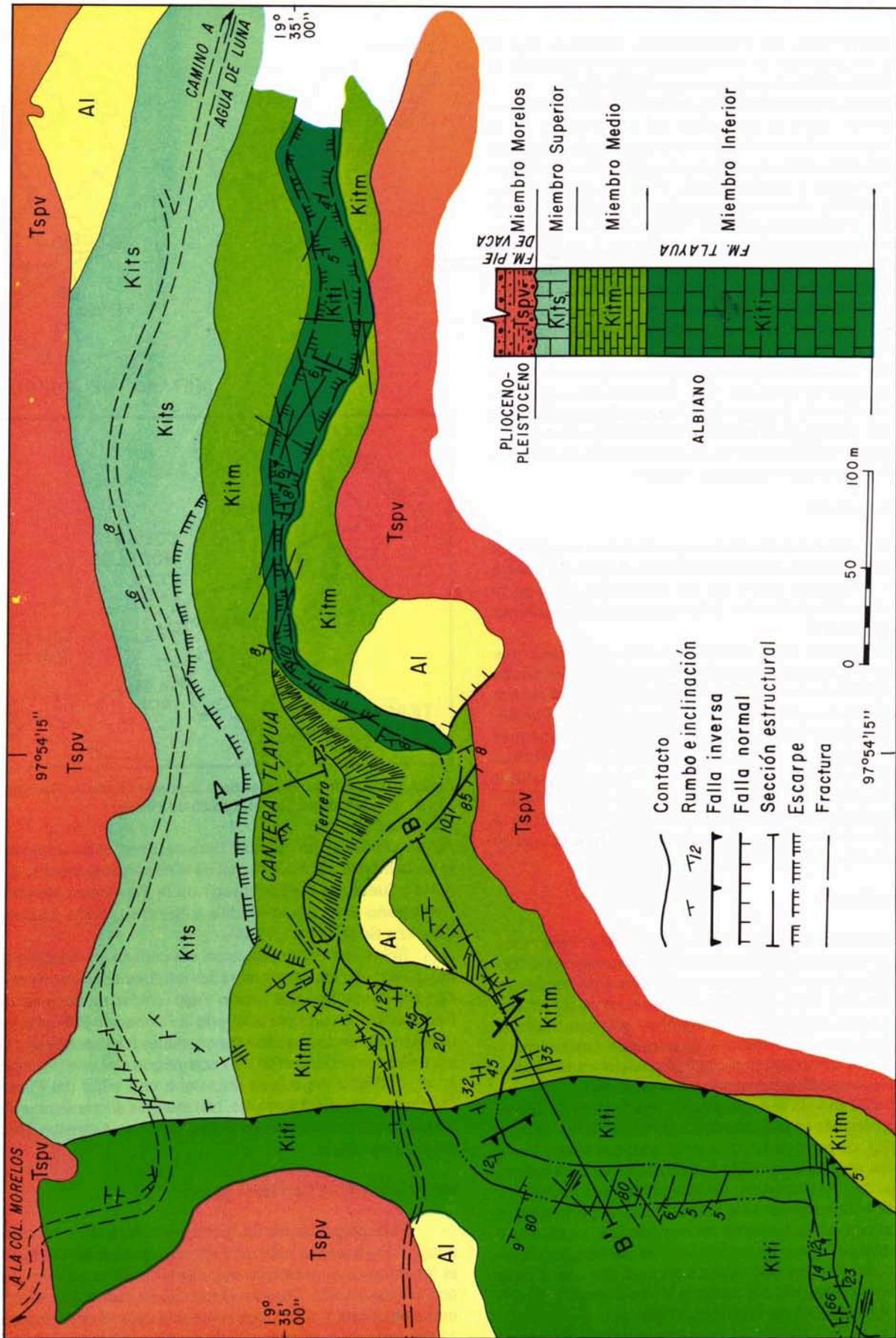


Figura 2.- Mapa geológico de la cantera Tlayúa.

La separación de colores por Esteban Monroy-Soto

de microfácies, además de secciones transversales para indicar la estructura. En la Figura 3, se puede observar el desarrollo de los trabajos que están llevándose a cabo en la cantera.

Se dividió la cubierta terciaria que cubre a las rocas cretácicas que afloran en los alrededores de la barranca de Tlayúa, en dos unidades litoestratigráficas: la Formación Pie de Vaca y la Formación Agua de Luna (Pantoja-Alor *et al.*, 1989). Dentro del área que cubre la cartografía geológica de la Figura 2, aflora únicamente la primera unidad.

#### FORMACIÓN PIE DE VACA

Se da el nombre de Formación Pie de Vaca (Pantoja-Alor *et al.*, 1989) a una secuencia de 53 m de espesor en su localidad-tipo de la barranca Tlayúa, ubicada unos 500 m al este de la cantera Tlayúa, que consiste en sedimentos terrígenos continentales fluvio-lacustres y aluviales, formados por conglomerado, grava, arena, limo, arcilla, marga, caliza y travertino, que descansan sobre cualquiera de los tres miembros de la Formación Tlayúa. El famoso afloramiento con huellas de rumiantes, reptiles y aves, conocido como Pie de Vaca (Plioceno [?]) se localiza cerca de la Colonia Morelos y fuera del área del mapa.

#### Formación Tlayúa

Se designa formalmente a la caliza albiana que aflora en la barranca de Tlayúa, en este artículo con el nombre de Formación Tlayúa, la cual comprende una secuencia incompleta de aproxi-

madamente 300 m de espesor, dividida en Miembro Inferior, Miembro Medio y Miembro Superior (Pantoja-Alor *et al.*, 1989, p. 61). En el área cartografiada no aflora la base de la formación y la cima se encuentra erosionada, estando cubierta, discordante y tectónicamente, por los clásticos continentales del Terciario superior.

Las razones que existen para asignar un nombre distinto a esta unidad litoestratigráfica cretácica son principalmente su importancia paleontológica, su depósito sobre un terreno tectónico diferente (península de Oaxaca) y su paleoambiente característico.

Tomando como base el estudio de 26 láminas delgadas de una sección, transversal al rumbo de las capas, que comprende la cima del Miembro Inferior, el Miembro Medio y la base del Miembro Superior, medida a lo largo de la cañada que se encuentra en la entrada occidental de la cantera, Malpica-Cruz y colaboradores (1989, p. 56) postularon el desarrollo de siete microfácies, desde el fondo de la barranca de Tlayúa hasta la parte alta que ocupa el camino a la ranchería de Agua de Luna (Figura 2). Dichas microfácies sedimentológicas permiten proponer un ambiente poco profundo con zonas fluctuantes de mareas (supra-, inter- y submarea), lo que correspondería a un medio somero de tipo lagunar postarrecifal, oxigenado, con circulación libre.

#### Miembro Inferior

Este miembro consiste en una secuencia de caliza micrítica (*mudstone* a *wackestone*), con algunos intraclastos y abundantes

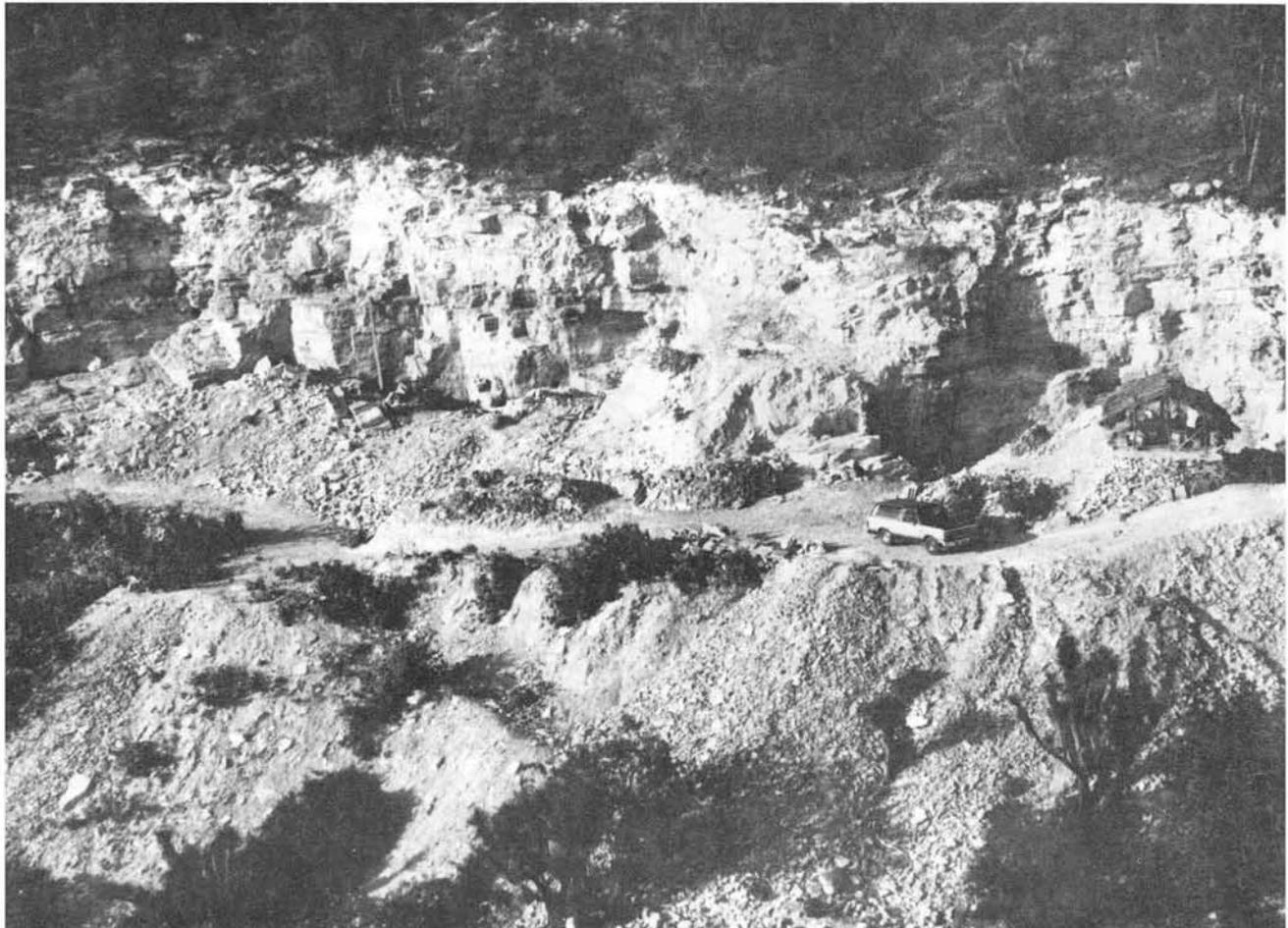


Figura 3.- Vista panorámica de la cantera Tlayúa, en la que se muestra las obras actuales de explotación.

milióidos. Su estratificación varía de masiva a gruesa, con bios-tromas de 20 a 50 cm de espesor, formados por rudistas de la especie *Toucasia polygyra* Alencáster (Alencáster, 1973) e inocerámidos del género *Chondrodonta*. Dentro de la caliza aparecen concreciones de sílice blanca y negra y lentes de pedernal oscuro. En algunas partes, los fósiles están completamente silicificados, como se observa en la barranca de Tlayúa y en la ladera septentrional del Cerro del Tepenextli, inmediatamente al norte y fuera del área cartografiada.

#### Miembro Medio

Este miembro está formado por una secuencia de caliza micrítica (*mudstone*), de 48 a 50 m de espesor, de estratificación delgada, laminada y de color crema con tonalidades rojizas.

La estratificación varía desde unos cuantos milímetros hasta 15 cm de espesor. Dentro de las capas hay lentes de pedernal oscuro, que pueden tener desde unos cuantos milímetros hasta 15 cm de espesor y hasta 70 cm de longitud. En algunos planos de fractura, la laminación destaca de manera notable, fenómeno que se observa claramente en las paredes de la cantera.

Esta laminación, característica de los sedimentos micríticos del Miembro Medio (Figura 4), se considera desarrollada por flujos laminares de marea, ocasionados por los vaivenes de las olas a muy poca profundidad y muy cerca de la línea de playa. Confirma lo anterior la escasa bioturbación y la carencia de un sustrato lodoso con materia orgánica abundante, que posiblemente no haya sido depositado o bien pudo ser barrido por la intensa acción de las olas. La falta de material clástico grueso, dentro de la secuencia de la Formación Tlayúa, se podría explicar por la presencia de una topografía cárstica incipiente, dominada por corrientes subterráneas, sin arroyos o ríos de corrientes fuertes que desemboquen al mar.



Figura 4.- Textura laminar del tercio superior del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

La presencia de estratos medianos dentro de la secuencia, de 30 a 50 cm de espesor, con estructura laminar poco desarrollada, hace suponer variaciones del nivel del mar sobre la plataforma, como reflejo de las variaciones tectónicas que ocurrían en esa época en un arco volcánico insular (Campa y Coney, 1983) que se desarrollaba en los bordes sudoccidental y occidental de la placa de América del Norte. Este criterio no lo comparten otros investigadores (Morán-Zenteno *et al.*, 1988), quienes argumentan que dada la naturaleza casi totalmente sedimentaria de la secuen-

cia jurásico-cretácica que descansa sobre el terreno Mixteco, excluyen la posibilidad de una relación de proximidad con algún arco magmático, asociado al límite convergente de placas. Intercaladas dentro de los estratos laminares calcáreos, fueron observadas capas delgadas de arcilla verdosa a crema, de composición montmorillonítica (Fernández-Becerra, 1985), lo que indica la presencia de un volcanismo distante durante esta época. Varios estudios describen un período de actividad volcánica intenso durante casi todo el Albiano en la parte central del Estado de Guerrero y en el sur del Estado de México (de Cserna *et al.*, 1978), y a lo largo de la parte meridional de la Sierra Madre del Sur, el cual ha sido bien documentado en las formaciones Mal Paso (Pantoja-Alor, 1959), Encino y Vallecitos (Pantoja-Alor y Estrada-Barraza, 1986) y Xochipala (de Cserna *et al.*, 1978), las cuales, al igual que la Formación Tlayúa, se caracterizan por la intercalación de estratos volcánicos y, coincidentemente, por una preservación excelente de su paleofauna.

La presencia, en algunas capas, de grietas o polígonos de desecación, con lados de entre 1 y 3 cm de longitud y con profundidad de corte de 1 a 1.5 cm (Figura 5) es evidencia clara de la exposición superficial de la playa —superficie intermareal— por períodos de tiempo cortos. En las obras de la cantera desarrolladas en el tercio superior del Miembro Medio, aflora una superficie con abundantes polígonos de desecación, de los cuales algunas muestras son exhibidas en el museo paleontológico de la Colonia Morelos. La escasa concavidad o levantamiento de los bordes de los polígonos puede indicar períodos cortos de exposición subaérea o mantenimiento de una humedad alta. Otras marcas de piso (*sole marks*), tales como la presencia de costras de caliche en las superficies de playa expuestas a meteorización subaérea, junto con marcas de canales o cunetas de escurrimiento (Figura 6) y encalichamiento de la superficie expuesta de playa, también son comunes en la cantera.

La conservación de un insecto del orden de los dípteros (familia Tipulidae), con alas desplegadas a las que se observa las nervaduras (Figura 7), supone —para su preservación— un medio de energía baja con exposición superficial corta y rápido cubrimiento por sedimento calcáreo fino, tal vez correspondiente a una zona de intermarea en un ambiente lagunar. El ejemplar, que se encuentra en la colección paleontológica de la ENEP-Zaragoza (EZB-TL-12), fue clasificado por el Dr. Yuri Popov, de la Academia de Ciencias de la entonces U.R.S.S. (comunicación escrita a la Dra. Blanca Estela Buitrón, 20-11-91).

El origen de la sedimentación arcillosa rojiza, que cubre los planos de estratificación de las lajas y de las láminas del Miembro Medio, ha sido explicado (Seibert y Buitrón, 1987a; Applegate, 1987) por la asimilación y precipitación bioquímica del hidróxido férrico efectuadas por carpetas de algas o, bien, por la presencia de natas del mismo compuesto químico, producto de acción bacterial. Estas carpetas cianobacteriales, por lo general, presentan un espesor de menos de 1 mm, algunas de ellas con evidencia de exposición subaérea. Para Martill (1989a, p. 25), las capas rojas arcillosas que recubren las láminas representan la aportación de polvo rojo transportado a la laguna por el viento, hipótesis que no cuenta con soporte climático ni sedimentológico, de acuerdo con las evidencias mostradas en la cantera.

El origen de la pigmentación rojiza en los sedimentos marinos y clásticos continentales ha sido ampliamente discutido en la literatura geológica, resumiéndose en dos hipótesis: (1) de origen diagenético, en la cual se sostiene que la coloración rojiza fue adquirida *in situ* por la deshidratación de los hidróxidos de hierro detriticos, de color amarillo o café, derivados de suelos con meteorización profunda (Houten, 1964, 1968; Walker, 1967, 1974, 1976; Schluger, 1976); y (2) de origen detritico, con la

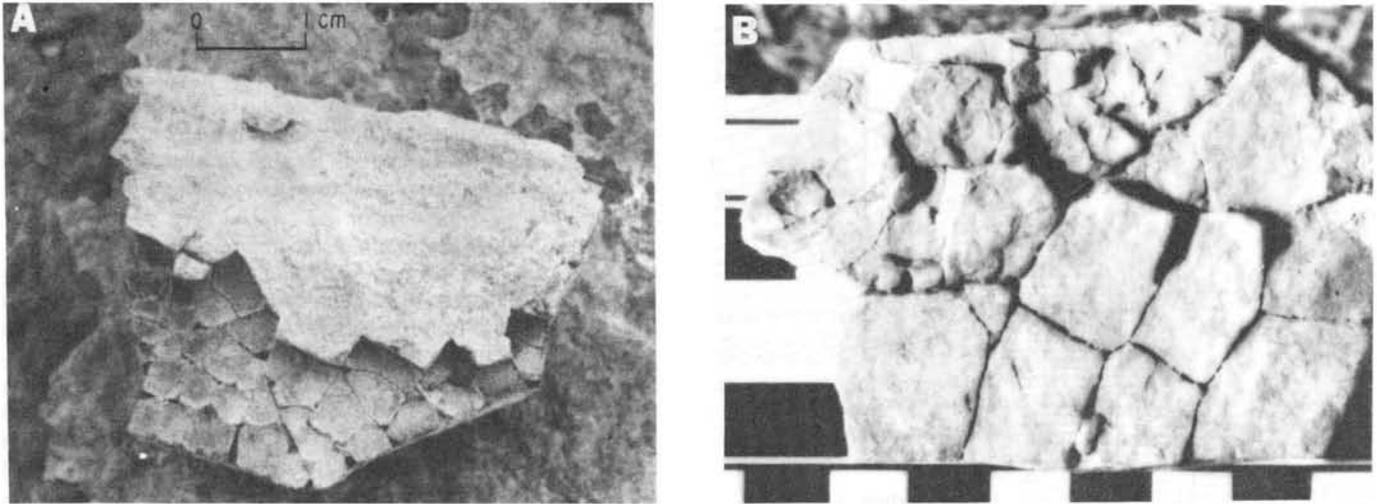


Figura 5.- Grietas o polígonos de desecación, presentes en algunos horizontes del tercio superior del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

partícula acarreada desde su fuente original (Hubert y Reed, 1978; McPherson, 1980), llegándose a considerar que el pigmento se deriva de suelos rojos tropicales (Krynine, 1949). En el caso de la cantera Tlayúa, las evidencias paleoambientales indican un origen más afín con la hipótesis diagenética, combinada con períodos cortos de oxidación por exposición subaérea.

El mejor afloramiento del Miembro Medio está expuesto en la barranca de Tlayúa (Figura 8), donde ha sido labrada la cantera del mismo nombre, siendo la parte media superior de la sección donde se ha recolectado la mayor parte del material fosilífero. La edad de este miembro queda establecida por amonites y belemnites. Seibertz y Buitrón (1987b, p. 285) describen las especies siguientes de *Neohibolites*: *N. praeultimus* Spaeth, *N. aff. minimus* Stolley, *N. minimus* y una nueva especie, *N. clavaformis*, las cuales indican una edad albiana medio-tardía. Cantú-Chapa (1987, p. 159) identificó algunos ejemplares de amonoideos del

género *Mortonicerias* sp., *Hysterocheras* sp. y *Anisoceras* sp., también del Albiano medio-tardío.

#### Miembro Superior

Este miembro consiste en una secuencia incompleta, de capas medianas a gruesas, de dolomía y caliza dolomítica de color gris con tonalidades claras y oscuras, cuyos afloramientos mejores están expuestos inmediatamente arriba de la cantera, sobre la ladera septentrional de la barranca de Tlayúa.

La dolomía pasa transicionalmente a una caliza micrítica, de estratificación mediana a delgada, que se observa en el camino a Agua de Luna. El estudio petrográfico muestra que dos microfacies constituyen esta unidad: una, formada por cristales de dolomita con intraclastos y miliólidos abundantes, y otra, por cristales de dolomita en una matriz micrítica (Malpica-Cruz *et al.*, 1989). En ambos casos, la dolomita es secundaria. La precoz dolomitización se efectúa, generalmente, en la interfase agua dulce-agua marina debido a la transformación, por disolución y reprecipitación, del carbonato de calcio en dolomita y por la recristalización originada por difusión iónica en estado sólido, que

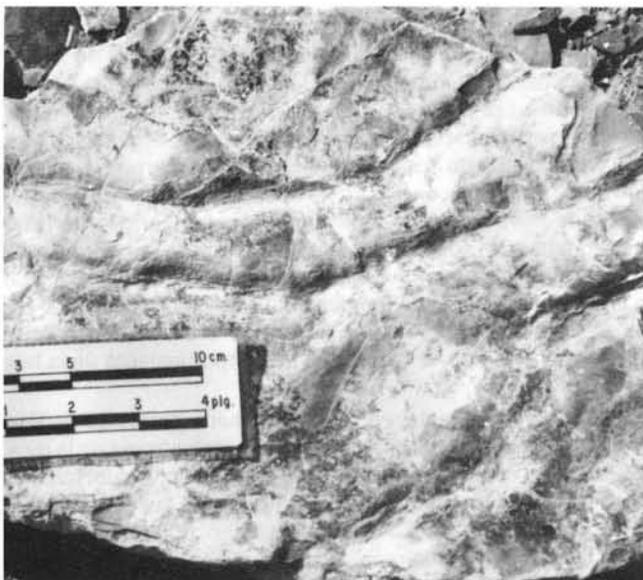


Figura 6.- Marcas de piso (*sole marks*) sobre un plano de estratificación que muestra canales o cunetas de escurrimiento en el tercio superior del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

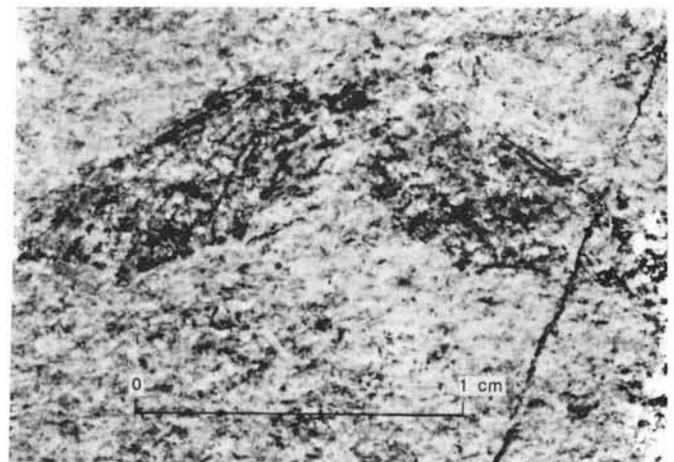


Figura 7.- Alas desplegadas de un insecto díptero de la familia Tupulidae, fosilizado en los sedimentos finos del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

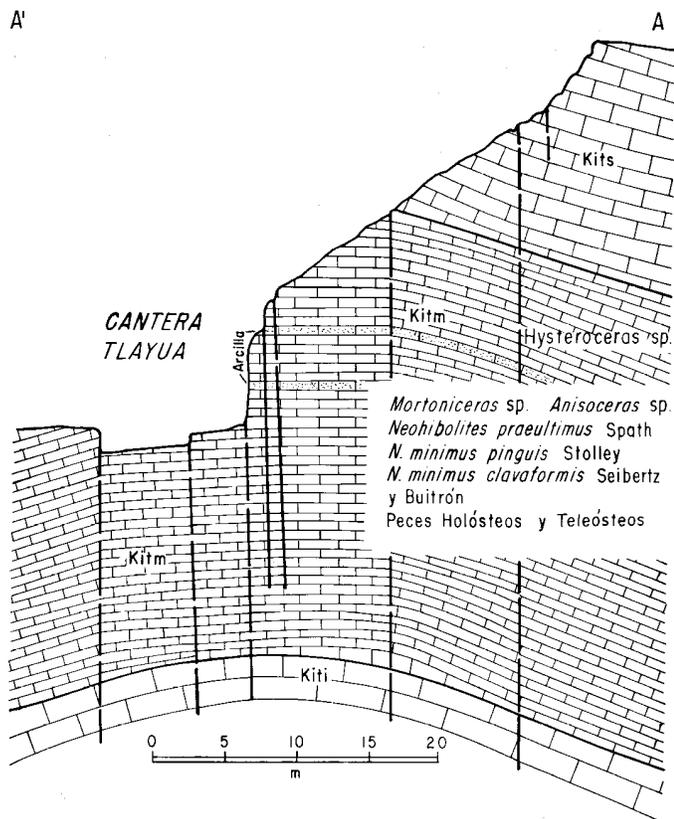


Figura 8.- Sección transversal a la cantera Tlayúa, que corta las capas fosilíferas con peces, belemnites y amonites del Albiano medio-tardío. Explicación: Kiti, Miembro Inferior; Kitm, Miembro Medio; Kits, Miembro Superior.

ocasiona una reducción del volumen de la aragonita y de la calcita original (Friedman y Sanders, 1967).

La presencia de *Dicyclina schlumbergeri* Munier Chalmas, en algunos de sus estratos, permite asignarle una edad cenomaniense (Fernández-Becerra, 1985, p. 23); sin embargo, en el mapa geológico (Figura 2) se le considera por ahora dentro de la parte más alta del Cretácico Inferior (Kits), dependiendo de que los estudios microfósilíficos que son llevados a cabo actualmente permitan confirmar lo indicado en el informe de Petróleos Mexicanos (Fernández-Becerra, *op. cit.*). Esta consideración se basa en que la mencionada especie de foraminífero ha sido encontrada, en otras partes de México, acompañando fauna definitivamente diagnóstica del Albiano tardío.

La Formación Tlayúa se puede correlacionar con la Formación Morelos (Fries, 1960; Pérez-Ibargüengoitia *et al.*, 1965), con la Caliza Orizaba (Padilla y Sánchez, 1973) de la Sierra del Tentzo, con parte de la Caliza Teposcolula (Ferrusquía-Villafranca, 1976) de la Mixteca Alta y con la Caliza Cipiapa (Calderón-García, 1956, p. 23) de la región de Tehuacán, Puebla. La relación gráfica se explica en la tabla de correlación (Figura 9).

#### MARCO TECTÓNICO

Las rocas del Paleozoico superior y toda la secuencia mesozoica y terciaria de la región descansan sobre el basamento metamórfico del Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978), que constituye la estructura básica del terreno Mixteco (Campa y Coney, 1983). En una investigación anterior de carácter regional, López-Ticha (1985) propuso la existencia de un elemento tectó-

nico positivo desarrollado durante el Triásico y el Jurásico, que fue denominado de manera informal como "península de Oaxaca", el cual, con la presente investigación queda confirmado plenamente. La tectónica de bloques que desde el Paleozoico tardío afecta la zona, no permite observar un registro completo de la secuencia sedimentaria y de los eventos tectónicos. La historia geológica únicamente se puede establecer con base en secciones compuestas o interpolaciones estratigráficas de los microbloques cercanos.

En el área de la cantera, están impresos los rasgos estructurales de dos grandes eventos tectónicos de carácter regional, con varios subeventos diastróficos de carácter local. El primero está representado por una tectónica compresiva que originó el fallamiento, corrimiento y plegamiento de las unidades mesozoicas. Sus lineamientos tienen direcciones NW-SE, que indican un sentido de SW a NE para los esfuerzos compresivos de edad laramídica. Como segundo evento tectónico, se tiene la actuación de esfuerzos distensivos que originaron un fallamiento normal que produce lineamientos NE-SW y desarrollo de fosas tectónicas dentro del contexto regional; asociadas a estas fallas, se desarrollan otras, de carácter conjugado, de dirección NW-SE.

El área cartografiada se ubica en el extremo noroccidental de un anticlinal parcialmente erosionado y sepultado, cuyo eje tiene una dirección N30°W, siendo el rasgo estructural más importante una falla inversa, cuya traza tiene un rumbo ondulado N5-20°W. Más de 100 datos estructurales de fallas y fracturas desarrolladas en la Formación Tlayúa fueron graficados en un diagrama de tipo roseta (Figura 10, A), donde se puede apreciar la orientación dominante de los esfuerzos de compresión. Los clásticos continentales neogénicos exponen tres sistemas de fracturamiento y fallamiento distensivo: N60-70°E, N10°W y N70-80°W, además de dispersiones menos importantes (Figura 10, B).

Tanto en los afloramientos de la barranca como en la cantera, se observa el desarrollo de una deformación diferencial asociada al fallamiento inverso provocado por la compresión y separación de la cobertura sedimentaria del basamento, a lo largo de los planos de estratificación. Mediante el análisis estadístico de los datos estructurales obtenidos en el área, se determinó que la dirección predominante de los lineamientos es NW-SE, ligeramente coincidente con la dirección del eje del anticlinal y ligeramente divergente con el rumbo de la traza N5-10°W de la falla inversa principal que conforma el límite occidental de la cantera (Galguera-Rosas *et al.*, 1989, p. 49). La mecánica de la deformación es el resultado de la acción de esfuerzos compresivos a no gran profundidad, de edad laramídica, que originaron el desprendimiento y transporte de la carpeta sedimentaria a lo largo de sus planos de estratificación (*décollement*) y el desarrollo de fallas que produjeron el sobrecorrimiento del Miembro Inferior sobre el Miembro Medio, formando en sus frentes asociaciones complejas de pliegues y fracturas de rompimiento por flexión (Galguera-Rosas *et al.*, *op. cit.*, p. 49). La Figura 11 muestra, en sección transversal al rumbo de las capas, el comportamiento de la falla antes descrita.

El Miembro Medio, estando constituido por caliza laminar con intercalaciones arcillosas, ocasiona la anisotropía de la roca, reflejando un estilo de deformación disarmónico, el cual también es un índice de la incompetencia del miembro. Una característica importante de esta unidad es su plasticidad, que da origen a un fuerte plegamiento de la roca, misma que absorbe gran parte de la energía disipada en el frente de sobrecorrimiento, el cual se extiende aproximadamente 120 m en el bloque autóctono, disminuyendo su intensidad conforme se aleja del frente. El patrón de deformación consiste en pliegues de empuje que alojan micro-

PERIODO	EDAD	CANTERA TLAYÚA	REGIÓN DE TEHUACÁN	SIERRA DEL TENTZO	REGIÓN DE PETLALCINGO	MIXTECA ALTA	Ma	
CRETÁCICO	MAASTRICHTIANO			?			66.4	
	CAMPANIANO			FM. MEXCALA		FM. YUCUNAMA	74.5	
	SANTONIANO					?	84.0	
	CONIACIANO					?	87.5	
	TURONIANO				FM. MALTRATA		88.5	
	CENOMANIANO						91.0	
	ALBIANO	MIEMBRO SUPERIOR	FM. TLAYUA	FM. MAHUATEPEC				97.5
		MIEMBRO MEDIO		FM. CIIAPA	FM. ORIZABA	FM. MORELOS		
		MIEMBRO INFERIOR						
	APTIANO			FM. SAN JUAN RAYA			113	
	BARREMIANO			FM. ZAPOTITLÁN			119	
	HAUTERIVIANO						124	
	VALANGINIANO			BASAMENTO DE LA PENÍNSULA DE OAXACA				131
BERRIASIANO						138		
							144	

Figura 9.- Correlación estratigráfica regional.

pliegues y microfallas que reflejan el estado de deformación mesoestructural. Estas estructuras definen pliegues policlinales en caja, abanico, *chevron* y recostados, según sea su relación con el campo de esfuerzos del pliegue que los contiene. Las microfallas tienen el mismo carácter que las cabalgaduras; sin embargo, éstas se originan por el rompimiento de los pliegues al continuar los esfuerzos.

Como representación más reciente de los efectos de los esfuerzos distensivos, en ambas laderas de la barranca y sobre la cubierta del Terciario superior y del Cuaternario, se observa el desarrollo o reactivación de planos de deslizamiento que, al profundizar, ocasionan fallas lítricas. También son comunes los deslizamientos por gravedad, a lo largo de los planos de falla preexistentes, a la vez que se tiene fallamiento normal, en pequeña escala, provocado por el asentamiento del terreno o por la carga de las unidades que yacen sobre dichos planos.

Con los datos de campo se puede establecer para la región una neotectónica distensiva (NNW-SSE), con un campo de esfuerzos  $s_v > s_{h1} > s_{h2}$ , con la ligera componente transpresiva caracterizada por corrimientos tanto diestros como siniestros.

## PALEOAMBIENTE

### CONTENIDO FAUNÍSTICO

La importancia de la cantera Tlayúa estriba en lo fortuito de los hechos que le dan origen y en la conjunción, hace aproximadamente unos 105 Ma, de ciertos factores con muy escasa probabilidad de repetición o de que ocurran simultáneamente dentro del registro geológico: ambiente somero de depósito con granulometría fina de los sedimentos, presencia y abundancia ocasional de biota arrecifal en ambiente lagunar de postarrecife con fluctuaciones intermareales, fenómenos causales de tanatocenosis, acciones preservadoras de los fósiles y, finalmente, una meteorización reciente que permite el lajeamiento de la roca sin destrucción de la paleofauna al extraerla de su lecho rocoso.

Por la abundancia, variedad y conservación de su paleobiota, la cantera Tlayúa constituye una de las localidades fosilíferas más importantes del Cretácico (Albiano) de América del Norte. De ella, han sido recolectados cerca de 5,000 especímenes, los cuales han sido estudiados o están en proceso de investigación, tanto en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional

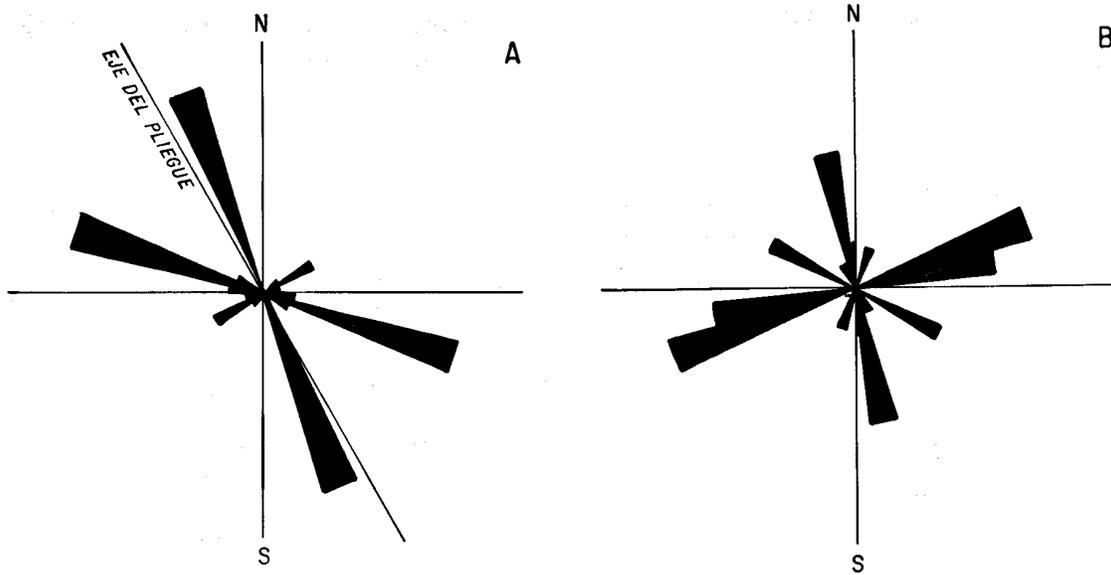


Figura 10.- Distribución de frecuencia de rumbos, fallas y fracturas de la barranca Tlayúa. (A) Formación Tlayúa (en sus tres miembros), (B) cubierta terciaria.

Autónoma de México como en varias instituciones extranjeras. El material que se ha conservado mejor corresponde a los vertebrados, representados por peces y reptiles. Hasta finales de 1989, el número total de peces recolectados en la cantera Tlayúa, llegaba al número de 2,246, los cuales fueron clasificados en 14 familias (González-Rodríguez, 1990, p. 6), de las cuales se cuenta con cuatro géneros y dos especies nuevas, quedando otros ejemplares de peces aún sin identificación. En la Tabla 1 se lista los taxones identificados, incluyendo el número de peces de cada uno de ellos, depositados actualmente en el Museo de Paleontología del Instituto de Geología, UNAM.

Al inicio de los hallazgos ictiofaunísticos, resultaba paradójico el poder explicar la tanatocenosis y la presencia de una abundante fauna de ambiente arrecifal en un medio definitivamente intramareal. Hasta la fecha, no se ha realizado estudio alguno que explique las causas de la excelente conservación de la fauna vertebrada; sin embargo, Mabesoone y Tinoco (1973, p. 66), para explicar la magnífica conservación de los peces fósiles de la Formación Santana (Aptiano), del noreste de Brasil, por la

horizontalidad de los cuerpos, suponen que los mismos fueron expuestos —al menos en períodos cortos— a una fuerte desecación subaérea; también sugieren que la plasmólisis de los órganos internos haya creado un ambiente diferente dentro de los cuerpos y que la exudación de los lípidos haya causado la adherencia de los sedimentos finos a los restos orgánicos. Por otra parte, Martill (1989b) considera que la calcificación y fosfatización de la ictiofauna de esa formación constituyen un fenómeno diagenético que implica descomposición abajo de la capa o nata cianobacterial; sin embargo, posteriormente, el mismo autor (Martill, 1990) concluye que, aunque la importancia de la acción bacterial no se puede pasar por alto, existe razonable evidencia que apoya la idea de que los estados iniciales de la mineralización ocurrieron antes del sepultamiento, y son fundamentalmente necrolíticos antes que diagenéticos. Los fenómenos causales de la tanatocenosis de la ictiofauna de la cantera Tlayúa aún no han sido estudiados adecuadamente. Los estudios sedimentológicos y del comportamiento de la paleofauna —que son discutidos más adelante— indican un carácter alóctono para la paleobiota arre-

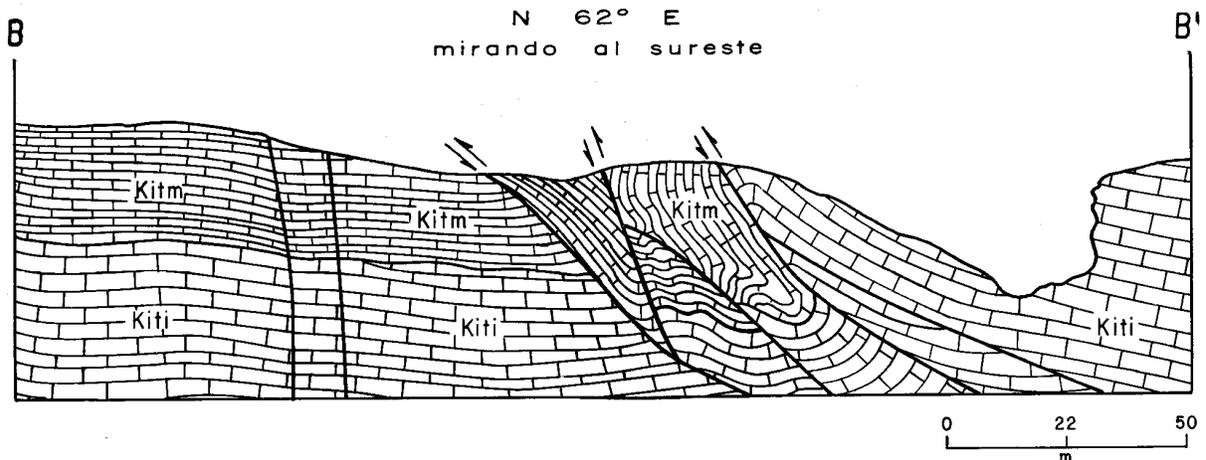


Figura 11.- Sección transversal a la falla inversa (laramídica) que afecta a los Miembros Inferior (Kiti) y Medio (Kitm) de la Formación Tlayúa en la barranca del mismo nombre.

Tabla 1.- Contenido ictiofaunístico de la Formación Tlayúa (tomado de González-Rodríguez, 1990, tabla 1).

Localidad	Hibodontidae	Heterodontidae	Semionotidae	Picnodontidae	Amiidae	Ophiopsidae	Macrosemiidae	Aspidorhynchidae	Holosteos indeterminados	Pholidophoridae	Ichthyodectidae	Clupeidae	Elopidae	Plethodontidae	Teleosteos indeterminados	Fragmentos de peces	Núm. total de organismos por localidad
370	2	3	3	166	19	3	37	111	7	4	59	337	33	3	34	279	1100
1970	-	-	-	16	1	1	8	17	4	2	1	119	27	-	8	81	285
1971	1	-	-	38	1	1	10	3	-	-	4	28	-	-	4	8	98
1995	-	-	-	7	-	-	4	-	1	-	-	6	-	-	1	5	24
2280	-	-	-	4	-	-	4	2	-	-	3	10	3	-	3	7	36
2405	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	1	3
2432	-	-	-	39	2	1	2	19	1	-	23	97	18	-	19	16	237
Núm. total de organismos por taxón	3	3	3	270	23	6	65	152	13	6	90	559	81	3	69	397	1783

cifal encontrada en el Miembro Medio de la Formación Tlayúa, considerando que la posición del arrecife se encontraba inmediatamente al norte y al este, en lo que hoy es la Sierra del Tentzo.

Debido a las características de las facies y a las condiciones ambientales, los invertebrados no son abundantes; entre ellos han sido recolectados gasterópodos (casiopeidos) y cefalópodos (amonites de los géneros *Hysterocheras*, *Mortoncheras* y *?Anisocheras*, así como belemnoides del género *Neohibolites*)

Los equinodermos del Miembro Medio están representados por los crinoides (Buitrón, 1991), conocidos comúnmente como lirios de mar (subclase Asteroidea de Brainville, 1830), estrellas serpientes (subclase Ophiuroidea Gray, 1840), los erizos (clase Equinoidea de Brainville, 1834) y holoturias (clase Holoturoidea de Brainville, 1834), a las cuales se conoce como pepinos de mar. Los ejemplares completos han permitido su clasificación, en algunos casos, hasta el nivel de género. El hallazgo de la holoturia, el quinto en el mundo, resalta la importancia de la cantera de Tlayúa (Buitrón y Malpica-Cruz, 1987). Entre los artrópodos se tiene a crustáceos y arácnidos. También, fue recolectado un insecto (EZB-TL-12; Figura 7) del orden de los dípteros y de la familia Tipulidae (Y. Popov, comunicación escrita a la Dra. Blanca E. Buitrón, 20-11-91), el cual se encuentra actualmente en estudio. Los reptiles, de acuerdo con los informes de Applegate y colaboradores (1984, p. 71), están representados por lagartijas terrestres del grupo de los scincónidos (Lacertilia) obteniéndose una con falanges muy largas y membranas interdigitales que indican su carácter acuático. También aparecen ocasionalmente restos de rincocéfalos y se ha obtenido cocodrilos completos y varias tortugas, que están en proceso de estudio para su clasificación taxonómica. En algunos estratos, fueron recolectados dientes de plesiosaurio y fragmentos de otros reptiles aún no identificados (Applegate *et al.*, 1984, p. 71).

Desde el punto de vista regional, un modelo sedimentológico y paleoambiental adecuado para todo el Albiano supone una plataforma amplia, cubierta por un mar somero, de energía ciné-

tica moderada a débil, con áreas positivas que generan ambientes litorales y lagunares, de plataforma interna, intermedia o de mar abierto, con barras, cayos e islas de poco relieve sobre un substrato calcáreo en condiciones de depósito muy similares a las que se desarrollan actualmente en las Bahamas o en el borde costero de la península de Yucatán (Figura 12).

El Miembro Inferior de la Formación Tlayúa corresponde a un depósito de plataforma interna, de energía cinética moderada a débil, cercana a la línea de costa, la cual se encontraba probablemente a pocos kilómetros al sur del área estudiada. Las facies de este miembro se caracterizan por la presencia de micrita con algunos intraclastos y foraminíferos bentónicos. Intercaladas en la sección, existen zonas de *packstone* biógeno de requiñidos y *packstone* biógeno de inocerámidos, que representan barras o cayos que delimitan la plataforma interna de la zona de mar abierto. En las facies cercanas al contacto litológico con el Miembro Medio, se observó un cambio transicional entre micrita y microespátita, con algunas franjas de recristalización de calcita en forma de cristales de diente de perro y de menisco, que indican procesos diagenéticos en la zona vadosa, con predominio de agua dulce sobre marina.

El Miembro Medio fue depositado en una zona lagunar postarrecifal, con pulsaciones epeirogénicas cortas y variaciones eustáticas de pequeña magnitud, que permitieron exposiciones subaéreas ocasionales del piso marino, como lo demuestra la abundancia de estructuras primarias en los sedimentos de intermarea. Es conveniente resaltar la presencia, en algunos estratos, de huellas tridactilares pequeñas, que bien pudieran representar icnofósiles de invertebrados o de pequeños vertebrados (Figura 13).

Las láminas del Miembro Medio están formadas principalmente por micrita y, en porcentaje menor, microespátita. Están presentes tres facies: una, predominante, de micrita con intraclastos y miliólidos; otra, de intraespátita con foraminíferos biseriados, multiseriados, planiseriados y, en general, con una fauna bentó-

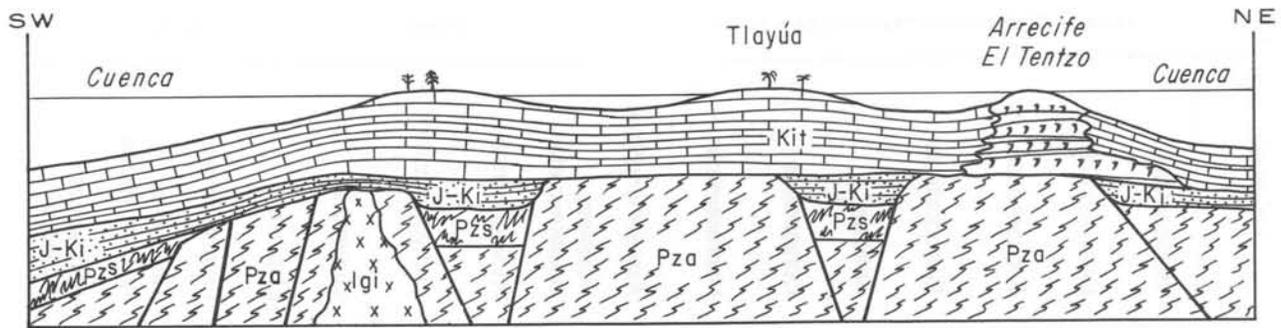


Figura 12.- Sección esquemática (no a escala) de los paleoambientes de la Formación Tlayúa durante el Albiano. Explicación: Pza, Complejo Acatlán, del Paleozoico inferior; Pzs, formación Morales, del Paleozoico superior; J-Ki, secuencia del Jurásico-Cretácico inferior; Kit, Formación Tlayúa, del Cretácico inferior.

nica de medios lagunares; y una última, que contiene microestrolitos incipientes; se aprecia en ellas cambios transicionales entre micrita y microespatita (Malpica-Cruz *et al.*, 1989). La estratificación horizontal laminar que se observa en la Figura 4, también se produce bajo la influencia de una dinámica elevada (por tracción) y de cambios de salinidad, temperatura, pH y velocidad de sedimentación. Se supone que durante el depósito de los carbonatos, en algunas zonas de la parte meridional y occidental de México, haya tenido lugar una fuerte actividad volcánica, cuyas manifestaciones explosivas están representadas por las cenizas actualmente convertidas en delgados estratos de arcilla montmorillonítica que afloran en la cantera. Aún no se ha determinado el efecto de esta actividad en el clima de la época y en el paleoambiente en general. Hasta la fecha, los mejores afloramientos del Miembro Medio de la Formación Tlayúa están en la antigua cantera Tlayúa y en la nueva cantera CONACyT, ambas en explotación, de las cuales únicamente se ha explorado la parte media superior, zona de donde se ha recolectado la mayor parte del material fosilífero. La presencia de carpetas de algas (Seibertz

y Buitrón, 1987a) indica, en general, profundidades muy someras; y la roca se presenta como un *mudstone* de algas laminado y con intercalaciones de placas, muy delgadas y esponjosas, con *pellets*. Esta microfacies es típica de laguna o bahía muy somera, de circulación lenta o de baja energía cinética. Asevera lo anterior la presencia, en algunas capas, de galerías resultantes de la actividad de *Ophiomorpha nodosa*, que es indicadora de playas y zonas intermareales con areniscas finas sublitorales someras (Selley, 1988), lo que permite concluir que la profundidad debió ser baja, probablemente correspondiente a la zona de intermarea. Debido a la baja población de esta especie, se deduce la existencia de áreas de corrientes intermitentes o cíclicas, puesto que esta especie incrementa su población en aguas calmadas, situación que no ocurre en Tlayúa. Por otro lado, Applegate (1987) mencionó la presencia de peces pequeños en el mismo estrato y en la misma laja con las cabezas alineadas en la misma dirección, interpretándose, en este estudio, que son corrientes de arrastre con dirección definida (flujos regresivos de marea) las que ocasionan este arreglo.

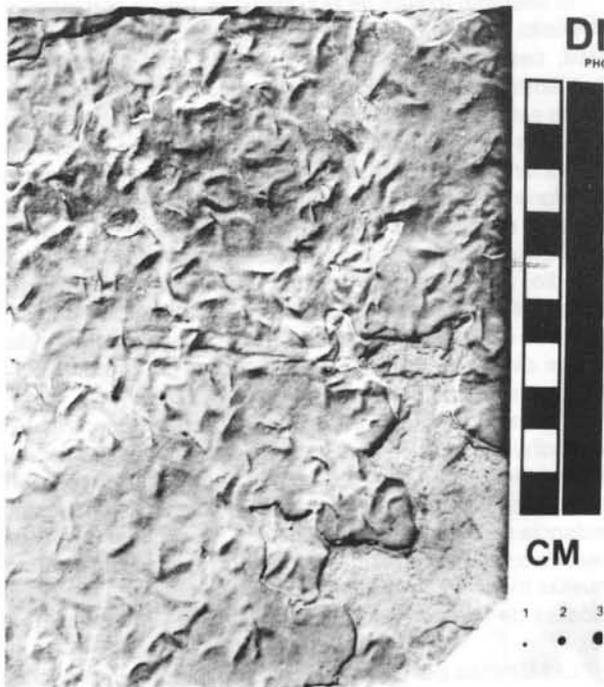


Figura 13.- Huellas de invertebrados o de pequeños vertebrados (icnofósiles) en capas de sedimentos finos del tercio superior del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

#### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desde el inicio de las investigaciones se ha propuesto varios modelos para explicar las características sedimentológicas y paleoambientales de la Formación Tlayúa.

Para Fernández-Becerra (1985, p. 17), las características litológicas y paleontológicas de la Formación Tlayúa (Formación Morelos, en su informe) indican un depósito originado en una plataforma interna, de aguas someras, dentro de la zona eufótica en mares cálidos, transparentes y abiertos, que permitió en sus bordes —zonas de alta energía— el crecimiento inusitado de arrecifes; la dolomía de la parte superior se atribuye a la acción de aguas cargadas de magnesio, derivadas de salmueras formadas en la zona lagunar, y se establece una comparación de las características litológicas y paleontológicas existentes entre las calizas laminadas de Tlayúa y las calizas litográficas de Solnhofen, sin llegar a conclusiones definitivas del tipo de ambiente (anóxico u oxigenado).

Para otros autores, la actual evidencia paleobiológica y geológica sugiere un modelo similar al de la caliza litográfica de Solnhofen. Según Applegate (1987, p. 40), el paleoambiente debe interpretarse como una cuenca marina cercana a la costa, de baja circulación, con profundidades de entre 10 y 50 m, y las capas rojas de Tlayúa se deben a la hematita aportada y sedimentada dentro de la cuenca por corrientes tormentosas producidas por lluvias tropicales. De acuerdo con el mismo autor (Applegate, *op. cit.*), la naturaleza de la barrera que circundaba a la cuenca restringió la circulación, causando una deficiencia de oxígeno.

Las evidencias de un medio de normal a altamente oxidante, discutidas en este artículo, invalidan el modelo de un medio anóxico. Un estudio geoquímico realizado por Veizer (1977) considera que las concentraciones de Fe y Mn en las calizas litográficas de Solnhofen no son consistentes con su depósito y precipitación en un ambiente euxínico.

Con base en los estudios de microfacies y paleoambientales, y a las evidencias paleobiológicas presentadas en este artículo, se propone un modelo conceptual, de carácter muy local, para el Miembro Medio. El ambiente de depósito corresponde a una zona lagunar postarrecifal con variaciones verticales a ambientes de intermarea en las que hay desarrollo de superficies de inundación-desección, con arrastre de fauna alóctona (proveniente de arrecifes, lagunas o mar abierto) durante la marea alta y las tormentas, y de arrastre hacia el mar y desecación, con formación de bajos y quedades donde queda atrapada la fauna, durante la marea baja (Figura 14). La presencia de grietas de desecación, canales o polígonos de desecación, canales o marcas de arrastre y otras estructuras primarias subaéreas, confirma las oscilaciones eustáticas y epeirogénicas durante el Albiano medio y superior, que son características de toda la costa meridional de México.

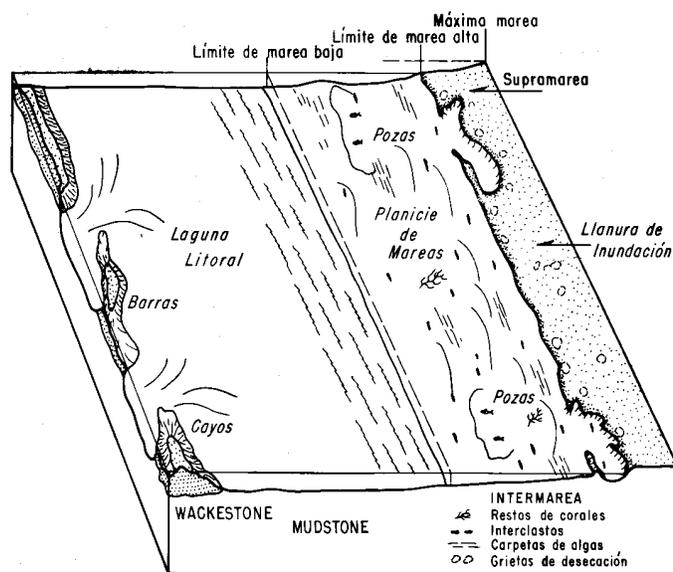


Figura 14.- Bloque diagramático (no a escala) del modelo paleoambiental del Miembro Medio de la Formación Tlayúa.

Este modelo conceptual, ya presentado en estudios anteriores (Malpica-Cruz *et al.*, 1989; Pantoja-Alor *et al.*, 1989), necesita de un apoyo geoquímico integrado a las investigaciones sedimentológicas y paleontológicas que se pretende llevar a cabo en la explotación de la nueva cantera auspiciada por el CONACYT.

El levantamiento tectónico regional durante el Albiano propicia un marco arrecifal que rodea al extremo septentrional de la península de Oaxaca, cuya expresión más cercana al área de estudio queda evidenciada por la Sierra del Tentzo.

El volcanismo distal, representado por las capas delgadas de arcillas montmorilloníticas intercaladas entre los estratos finos del Miembro Medio, probablemente confirma la presencia, hacia el sur y el sudoeste de la península de Oaxaca, del arco magmático insular Teloapan-Alisitos (Campa y Coney, 1983).

En cuanto al medio continental adyacente, la presencia de un insecto díptero perteneciente al infraorden Tipulomorfa, en el cual los miembros, en su mayoría, son hematófilos, pero con

algunas familias adaptadas para alimentarse de néctares, permite suponer un clima cálido y húmedo en la tierra cercana a esta localidad. También el hallazgo de *Podozamites* (gimnosperma), que forma parte de la flora de Tlayúa, es congruente con la distribución de estas plantas durante el Cretácico Temprano, pues no obstante la radiación adaptativa de las angiospermas en el Albiano, todavía estas gimnospermas ocuparon nichos ecológicos hidrófilos de climas tropicales a subtropicales (A. Silva-Pineda, comunicación escrita, 20/02/91).

Finalmente, se propone, de manera formal, el nombre de Formación Tlayúa para los sedimentos calcáreos que fueron depositados durante todo el Albiano y parte del Cenomaniano, sobre el elemento tectónico positivo de la península de Oaxaca.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su reconocimiento al Dr. Fernando Ortega-Gutiérrez, Director del Instituto de Geología de la UNAM, por las facilidades brindadas para la realización de este estudio; asimismo, patentiza su más sincero agradecimiento al M. en C. Fidel Soto-Jaramillo y a los ingenieros Barbara Martiny y Arturo Gómez-Caballero por la revisión del manuscrito.

También extiende su agradecimiento a los doctores James Lee Wilson, Sr., y Keith Young, por el justo arbitraje del estudio y las atinadas recomendaciones. En el campo se contó con la valiosa ayuda del pasante de ingeniero geólogo, Sr. Gerardo Galguera-Rosas, y los dibujos preliminares del texto fueron elaborados por el también pasante de ingeniero geólogo, Sr. Vicente Páez-Juárez. Algunas de las fotografías que ilustran el artículo fueron preparadas por el Sr. Antonio Altamira-Gallardo. Parte de los fondos para la investigación de campo fueron obtenidos del apoyo económico CYT/1472 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), cuyo investigador responsable es el Dr. Shelton P. Applegate, a quien el que esto escribe le está ampliamente reconocido.

Finalmente, se desea agradecer la valiosa colaboración de todos los miembros de la familia Aranguthy, de Tepexi de Rodríguez, Puebla, sin la cual no hubiera sido posible la realización de esta investigación.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencáster, Gloria, 1973, Una nueva especie de *Toucasia* en el Cretácico medio de los Estados de Oaxaca y Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 36, p. 4-20.
- Applegate, S. P., 1987, A preliminary study of the Tlayúa quarry near Tepexi de Rodríguez, Puebla: Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología, v. 1, p. 40-54.
- , 1989, A new genus and species of a holostean belonging to the family Ophiopsidae, *Teoichthys kallistos*, from the Cretaceous, near Tepexi de Rodríguez, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 7, p. 200-205.
- Applegate, S. P., y Espinosa-Arrubarrena, Luis, 1982, Lithographic limestone like deposits in Tepexi de Rodríguez, Puebla, in Espinosa-Arrubarrena, Luis, ed., Field guide for the excursion: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Society of Vertebrate Paleontology Annual Meeting, 42, México, D. F., 39 p.
- Applegate, S. P., Espinosa-Arrubarrena, Luis, y López-Neri, Pompeyo, 1984, Las calizas litográficas de la cantera Tlayúa en Tepexi de Rodríguez, Puebla, México: Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 7, México, D. F., Libro-guía de la excursión a Tepexi de Rodríguez, Estado de Puebla, p. 1-83.
- Buitrón, B. E., 1991, Los equinodermos del Cretácico Temprano: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Información Científica y Tecnológica, v. 13, núms. 179-180, p. 15-18.

- Buitrón, B. E., y Malpica-Cruz, Rodolfo, 1987, *Tepexi de Rodríguez, Puebla, una localidad fosilífera de México*: Sociedad Mexicana de Paleontología, Congreso Nacional de Paleontología, 1, México, D. F., Libro-guía de la excursión, 15 p.
- Calderón-García, Alejandro, 1956, *Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Puebla*: Congreso Geológico Internacional, 20, México, D. F., Libro-guía de la excursión A-11, p. 9-33.
- Campa, M. F., y Coney, P. J., 1983, Tectonostratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico: *Canadian Journal of Earth Science*, v. 26, p. 1040-1051.
- Cantú-Chapa, Abelardo, 1987, Las amonitas del Albiano superior de Tepexi de Rodríguez, Puebla: *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología*, v. 1, p. 159-160.
- Cserna, Zoltan de, Palacios-Nieto, Miguel, y Pantoja-Alor, Jerjes, 1978, Relaciones de facies de las rocas cretácicas en el noroeste de Guerrero y en áreas colindantes de México y Michoacán: *Sociedad Geológica Mexicana, Libro-guía de la excursión a Tierra Caliente*, p. 33-44.
- Fernández-Becerra, Salvador, 1985, Levantamiento a detalle de columnas estratigráficas en el área de Tepexi de Rodríguez, Puebla—"Cantera Tlayúa": *Petróleos Mexicanos, Superintendencia General de Exploración, Zona Centro, Distrito Poza Rica*, 31 p. (inédito).
- Ferrusquía-Villafranca, Ismael, 1976, Estudios geológico-paleontológicos en la región mixteca; parte 1, Geología del área Tamazulapan-Teposcolula-Yanhuatlán, Mixteca Alta, Estado de Oaxaca, México: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 97*, 185 p.
- Friedman, G. M., y Sanders, J. E., 1967, Origin and occurrence of dolostones, in Chilingar, G. V., Bissell, H. J., y Fairbridge, R. W., eds., *Carbonate rocks*: Amsterdam, Elsevier, p. 267-348.
- Fries, Carl, Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 60*, 236 p.
- Galguera-Rosas, Gerardo, Pantoja-Alor, Jerjes, y Malpica-Cruz, V. M., 1989, Análisis estructural en la cantera Tlayúa, Estado de Puebla: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre Geología Regional de México*, 3, México, D. F., Memoria, p. 48-50.
- González-Rodríguez, K. A., 1989, Descripción preliminar de un nuevo holósteo (Macrosemiidae) del Cretácico Temprano (Albiano) de la cantera Tlayúa en Tepexi de Rodríguez, Puebla: *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis profesional*, 101 p. (inédita).
- 1990, Los peces cretácicos de México: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, informe*, 9 p. (inédito).
- Houten, F. B. van, 1964, Origin of red beds—some unresolved problems, in Nairn, A. E. M., ed., *Problems in Paleoclimatology*: Nueva York, John Wiley and Sons, p. 647-661.
- 1968, Iron oxides in red beds: *Geological Society of America Bulletin*, v. 79, p. 339-416.
- Hubert, J. F., y Reed, A. A., 1978, Red-bed diagenesis in the East Berlin Formation, Newark Group, Connecticut Valley: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 48, p. 175-184.
- Krynine, P. D., 1949, The origin of red beds: *New York Academy of Sciences Transactions*, v. 2, p. 60-68.
- López-Ticha, David, 1985, Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la cuenca de Tlaxiaco: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, v. 37, p. 49-92.
- Mabesoone, J. M., y Tinoco, I. M., 1973, Paleogeology of the Aptian Santana Formation (northeastern Brazil): *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, v. 14, p. 60-72.
- Malpica-Cruz, V. M., Pantoja-Alor, Jerjes, y Galguera-Rosas, Gerardo, 1989, Microfacies de la cantera Tlayúa, Puebla, México: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre Geología Regional de México*, 3, Memoria, p. 53-56.
- Martill, D. M., 1989a, A new Solenhofen in Mexico: *Geology Today* (Londres), January-February, p. 25-28.
- 1989b, The medusa effect—instantaneous fossilization: *Geology Today*, noviembre-diciembre, p. 201-205.
- 1990, Macromolecular resolution of fossilized muscle tissue from an elopomorph fish: *Nature*, v. 346, p. 171-172.
- McPherson, J. G., 1980, Genesis of variegated redbeds in the fluvial Aztec Siltstone (Late Devonian), southern Victoria Land, Antarctica: *Sedimentary Geology*, v. 27, p. 119-142.
- Moller, Harry, 1980, Bellezas y misterios por la Alta Mixteca poblana—las huellas del misterio: *México Desconocido*, núm. 39, 65 p.
- Monroy-Fernández, M. G., y Sosa-Patrón, A. A., 1984, Geología de la Sierra del Tentzo, Puebla, borde norte del terreno Mixteco: *Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional*, 7, México, D. F., Resúmenes, p. 50 (resumen).
- Morán-Zenteno, D. J., Böhnell, Harald, Urrutia-Fucugauchi, Jaime, 1988, Paleomagnetismo de rocas jurásicas del norte de Oaxaca y sus implicaciones tectónicas: *Geofísica Internacional (México)*, v. 27, p. 485-518.
- Ortega-Guerrero, Beatriz, 1989, Paleomagnetismo y geología de las unidades clásticas mesozoicas del área Totoltepec-Ixcaquixtla, Estados de Puebla y Oaxaca: *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría*, 134 p. (inédita).
- Ortega-Gutiérrez, Fernando, 1978, Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, v. 2, p. 112-131.
- Padilla y Sánchez, R. J., 1973, Estudio geológico general de la Sierra del Tentzo, Estado de Puebla: *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional*, 78 p. (inédita).
- Pantoja-Alor, Jerjes, 1959, Estudio geológico de reconocimiento de la región de Huetamo, Estado de Michoacán: *Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México)*, Boletín 50, 36 p.
- 1983, Geocronometría del magmatismo cretácico-terciario de la Sierra Madre del Sur: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 44, p. 1-20.
- Pantoja-Alor, Jerjes, y Estrada-Barraza, Samuel, 1986, Estratigrafía de los alrededores de la mina de hierro de El Encino, Jalisco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 48, p. 33-46.
- Pantoja-Alor, Jerjes, Malpica-Cruz, V. M., y Galguera-Rosas, Gerardo, 1989, Geología de los alrededores de la cantera Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, Puebla: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre Geología Regional de México*, 3, México, D. F., Memoria, p. 61-69.
- Pérez-Ibargüengoitia, J. M., Hokuto-Castillo, Alfonso, y Cserna, Zoltan de, 1965, Reconocimiento geológico del área de Petlalcingo-Santa Cruz, Municipio de Acatlán, Estado de Puebla, in Alencáster, Gloria, ed., *Estratigrafía y paleontología del Jurásico Superior de la parte centromeridional del Estado de Puebla*: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 21*, parte 1, p. 1-22.
- Selley, R. C., 1988, *Applied Sedimentology*: Londres, Academic Press, 446 p.
- Schluger, R. P., 1976, Petrology and origin of the red beds of the Perry Formation, New Brunswick, Canada, and Maine, U. S. A.: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 46, p. 22-37.
- Seibert, Ekbert, y Buitrón, B. E., 1987a, Investigaciones paleontológicas y su aplicación bioestratigráfica de los *Neohibolites* de Tepexi de Rodríguez, Estado de Puebla (Albiano, Cretácico medio, México), in Barbarín-Castillo, J. M., Gursky, H. J., y Meiburg, Peter, eds., *El Cretácico de México y América Central*: Linares, Universidad Autónoma de Nuevo León, Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, v. 2, Simposio Internacional, Resúmenes, p. 121-124 (resumen).
- 1987b, Paleontología y estratigrafía de los *Neohibolites* del Albiano de Tepexi de Rodríguez, Estado de Puebla (Cretácico medio, México): *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología*, v. 1, p. 285-299.
- Veizer, J., 1977, Geochemistry of lithographic limestones and marls from the Jurassic of southern Germany: *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, v. 153, p. 129-146.
- Walker, T. R., 1967, Formation of red beds in modern and ancient deserts: *Geological Society of America Bulletin*, v. 78, p. 353-368.
- 1974, Formation of red beds in moist tropical climates—a hypothesis: *Geological Society of America Bulletin*, v. 78, p. 353-368.

———1976, Diagenetic origin of continental red beds: Dordrecht, D. Reidel Pub. Co., The continental Permian in west, central and south Europe, NATO Advance Study Institute Series, Series C, Mathematical and Physical Sciences, Main, Alemania, 1975, Proceedings, p. 240–282.

Manuscrito presentado: 2 de octubre de 1990.  
Manuscrito corregido devuelto por el autor: 10 de marzo de 1992.  
Manuscrito aceptado: 20 de marzo de 1992.