



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**RELACIÓN ENTRE LA TECTÓNICA Y SEDIMENTACIÓN DEL JURÁSICO,
SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO, OAXACA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA

María de los Ángeles Verde Ramírez

TUTORA

Dra. Elena Centeno García

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Martín Guerrero Suastegui-Universidad Autónoma de Guerrero

Dr. Rafael Antonio López Martínez-Instituto de Geología, UNAM

Dr. Michelangelo Martini-Instituto de Geología, UNAM

Dra. Claudia Cristina Mendoza Rosales-Facultad de Ingeniería, UNAM

México D.F., Diciembre 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente el apoyo de mi directora de tesis Dra. Elena Centeno García quien gracias a su interés y paciencia hizo posible la culminación de este estudio. Gracias por la confianza en mis capacidades y alentarme a continuar con mi crecimiento profesional.

Quiero expresar un reconocimiento especial a mi sinodal y maestro Dr. Michelangelo Martini quien mostró siempre un interés constante en el buen desarrollo de este trabajo. A la Dra. Claudia Cristina Mendoza Rosales le agradezco su exhaustiva revisión del borrador que ayudó a mejorar la calidad de esta tesis. Gracias al Dr. Rafael Antonio López Martínez, quien me brindó su apoyo en momentos de duda y me motivo constantemente para concluir esta etapa. Agradezco al Dr. Martín Guerrero Suastegui por sus valiosas aportaciones y comentarios.

Mi sincero agradecimiento a los pobladores de Santo Domingo Tianguistengo, por brindarme la oportunidad de estudiar su extraordinario y desafiante entorno. Gracias por recibir con los brazos abiertos a tantas generaciones de estudiantes del Instituto de Geología.

A mis profesores del posgrado cuya pasión por su trabajo nos invita a esforzarnos continuamente y superarnos.

Un reconocimiento especial a mis compañeros Betania Palacios García, Mildred del Carmen Zepeda Martínez, Bernardo García Amador y Alejandro Ortega Nieto por su apoyo durante el trabajo de campo. Gracias por hacerlo una experiencia gratificante, llena de emociones y descubrimientos.

Agradezco a Hilda López Soria por el apoyo brindado durante mi posgrado, por su comprensión, amabilidad y disposición a ayudarme sin reservas.

Al M. en C. Emiliano Campos Madrigal le agradezco el préstamo de mapas y láminas de la zona para la realización de esta tesis.

Doy las gracias al Instituto de Geología y a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de desarrollarme como ser humano y profesionista, por ser mi segundo hogar, donde encontré conocimiento y esas ansias inagotables de aprender y cultivarme.

María de los Ángeles Verde Ramírez

DEDICATORIA

A mis padres Isabel y Benjamín, porque sin su apoyo nada de esto sería posible. Gracias por ser un ejemplo de amor, esfuerzo y dedicación. Estaré agradecida eternamente con ustedes, es un privilegio ser su hija.

A Claudia, porque con su fortaleza me ha demostrado que todo es posible y que podemos encontrar belleza en el mundo que nos rodea.

A Israel, porque me ha enseñado que el trabajo tiene frutos dulces y que no debemos darnos por vencidos ante nuestros sueños.

A Daniel, por ayudarme a descubrir la naturaleza y mostrarme el camino que seguiré por siempre.

A mis sobrinos Brianda, Christopher, Imanol, Fernanda, Yahir, Gael y Regina por ser una fuente de inspiración, espero convertirme en una para ustedes.

A mis cuñadas Yamiled y Georgina, por alentarme a finalizar esta etapa y confiar en mis capacidades, gracias por ser parte de mi familia.

A mis tíos Elvia y Luis, por todo el apoyo y cariño que he recibido desde siempre.

A Alejandra y su familia, por el aliento brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores y compañeros del posgrado por hacer de esta una experiencia inolvidable. El conocimiento es más hermoso cuando se comparte.

A la familia Gamboa por recibirme con calidez en su hogar y hacerme sentir un miembro más del clan.

A mi familia montañera, con quienes comparto el apasionante mundo subterráneo, gracias por traer alegría a mi vida y por brindarme experiencias que me han marcado por siempre.

A Ramsés por ser mi compañero y fortaleza en momentos de duda, por su nobleza y bondad. Gracias por hacer de mí una mejor persona. Contigo de la sima a la cima.

María de los Ángeles Verde Ramírez

RESUMEN

“RELACIÓN ENTRE LA TECTÓNICA Y SEDIMENTACIÓN DEL JURÁSICO, SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO, OAXACA”

La cuenca Otlaltepec está localizada en el centro de la Sierra Mixteca, al sureste de México. En esta área se encuentra expuesto un basamento cristalino polideformado de edad paleozoica, representado por el Complejo Acatlán, esta unidad se encuentra sobreyacida por una sucesión sedimentaria Mesozoica, dividida en cinco formaciones sedimentarias informales, que de la base a la cima son las formaciones Tianguistengo (Triásico Superior-Jurásico Inferior), Piedra Hueca (Jurásico Inferior-Medio) y Otlaltepec (Jurásico Medio-Superior), y las formaciones cretácicas Magdalena y Caliza Coyotepec.

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización de la unidad sedimentaria clástica más antigua expuesta en la región, correspondiente a la formación Tianguistengo, así como determinar si existió actividad tectónica durante su depósito.

Dicha unidad se compone de una alternancia de limolita y arenisca de grano medio a fino, en las que predomina el cuarzo, feldespato y líticos ígneos. Estas rocas tienen una característica coloración rojiza o verdosa. Las estructuras sedimentarias más comunes son las laminaciones de tipo paralela, planar, festonada y convoluta, así como estratificación cruzada, grietas de desecación y rizaduras hacia la cima de los estratos. Hay presencia de marcas de carga, nódulos, lentes de limo e intraclastos. Su contenido fósil comprende marcas de raíces, troncos, moldes de troncos y plantas, intensa bioturbación, icnofósiles y ostrácodos. También pueden encontrarse horizontes de conglomerados con estratificación lenticular. De los análisis de facies y microfacies realizados, se concluyó que la sedimentación ocurrió en un ambiente de depósito aluvial que formó una planicie de inundación.

Se realizaron fechamientos de circones detríticos por el método U-Pb en dos muestras pertenecientes a la formación Tianguistengo, las cuales presentan un amplio rango de edades que comprenden desde el Mesoproterozoico hasta el Triásico Inferior-Medio. La información geocronológica y las relaciones estratigráficas observadas en campo sugieren que la edad de la formación Tianguistengo es Triásico Superior-Jurásico Inferior.

Dada la presencia de discordancias y fallas sinsedimentarias, se interpretó que la sucesión triásica-jurásica fue depositada en una cuenca tectónicamente activa, bajo un régimen extensional o transtensional. Se reconocieron dos campos de esfuerzos con diferentes orientaciones. De acuerdo con los análisis estructurales realizados se determinó: A) Un campo de esfuerzos que actuó durante el depósito de la formación Tianguistengo con orientación aproximada E-W y NE-SW que ocasionó la formación de fallas sinsedimentarias. B) Un segundo campo de esfuerzos con orientaciones N-S y NW-SE que causó el basculamiento de la formación Tianguistengo y actuó durante el depósito de las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec. A este campo de esfuerzos se le considera la causa de las discordancias que dividen estas unidades. Las rotaciones y discordancias que presenta el paquete sedimentario triásico-jurásico son muy similares a aquellas asociadas a una actividad de falla lítrica sinsedimentaria. De acuerdo a los estudios estructurales realizados en este trabajo, la estructura que controló el relleno de la cuenca Otlaltepec es la Falla Ameyaltepec.

Este cambio de orientación del régimen extensional podría representar el registro de una evolución tectónica relacionada al rompimiento del supercontinente Pangea y formación del Golfo de México.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Resumen..... | I |
| Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 1.3 Localización y vías de acceso..... | 3 |
| Capítulo 2. Marco geológico regional..... | 5 |
| 2.1 Estratigrafía local..... | 7 |
| 2.1.1 Paleozoico..... | 8 |
| Complejo Acatlán..... | 8 |
| Plutón Totoltepec..... | 12 |
| 2.1.2 Mesozoico..... | 16 |
| Formación Tianguistengo..... | 16 |
| Formación Piedra Hueca..... | 17 |
| Formación Otlaltepec..... | 21 |
| Formación Magdalena..... | 24 |
| Caliza Coyotepec..... | 26 |
| 2.1.3 Cenozoico..... | 28 |
| Unidad Pozo Hondo..... | 28 |
| 2.1.3.1 Rocas y sedimentos cenozoicos..... | 29 |
| Sedimentos del Pleistoceno..... | 29 |
| Rocas intrusivas..... | 31 |
| 2.2 Rasgos estructurales mayores del área de estudio..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 3. Metodología..... | 36 |
| 3.1 Recopilación bibliográfica..... | 36 |
| 3.2 Trabajo de campo..... | 36 |
| 3.3 Análisis petrográfico..... | 37 |
| 3.4 Fechamiento de circones detríticos..... | 37 |
| 3.5 Análisis estructural..... | 39 |
| 3.6 Trabajo de gabinete..... | 39 |
| Capítulo 4. Análisis de facies, microfacies y petrografía..... | 40 |
| 4.1 Facies de la formación Tianguistengo..... | 40 |
| 4.1.1 Facies de limo y arena con laminación paralela (Fl)..... | 48 |
| 4.1.2 Facies de limo y arena con raíces (Fr)..... | 48 |
| 4.1.3 Facies de limo y arena con estratificación cruzada planar (Sp)..... | 48 |
| 4.1.4 Facies de arenas con estratificación cruzada curva (St)..... | 50 |
| 4.1.5 Facies de arena con rizaduras y estratificación cruzada (Sr)..... | 52 |
| 4.1.6 Facies de arenas masivas (Sm)..... | 53 |
| 4.1.7 Facies de grava matriz soportadas masivas (Gmm)..... | 54 |
| 4.1.8 Facies de grava con gradación incipiente (Gmg)..... | 54 |
| 4.1.9 Facies de grava clásto soportadas con gradación inversa (Gci)..... | 55 |
| 4.1.10 Facies de arenas con intraclastos (Bi)..... | 56 |
| 4.1.11 Facies de carbón (C)..... | 57 |
| 4.1.12 Facies lacustres (LMF6)..... | 57 |
| 4.2 Microfacies de la formación Tianguistengo..... | 57 |
| 4.2.1 Microfacies LMF6..... | 58 |
| 4.2.2 Edad de contenido fósil..... | 61 |

| | |
|--|--------|
| 4.3 Asociaciones de facies..... | 62 |
| 4.3.1 Asociaciones de facies AF1: Diques (Levee)..... | 62 |
| 4.3.2 Asociaciones de facies AF2: Depósitos de avenida (canal) (Crevasse Chanel)..... | 63 |
| 4.3.3 Asociaciones de facies AF3: Depósito de avenida (lóbulo) (Crevasse Splay)..... | 63 |
| 4.3.4 Asociaciones de facies AF4: Planicie de inundación..... | 63 |
| 4.3.5 Asociaciones de facies AF6: Flujos de sedimentos por gravedad..... | 67 |
| 4.3.6 Asociaciones de facies AF7: Canales..... | 67 |
| 4.4 Correlación sedimentaria de las columnas medidas..... | 68 |
| 4.5 Análisis petrográfico..... | 70 |
| 4.5.1 Resultados del análisis petrográfico..... | 83 |
| Capítulo 5. Tectónica sinsedimentaria..... | 84 |
| 5.1 Discordancias entre las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec..... | 85 |
| 5.1.1 Modelo de sedimentación sintectónica basado en datos de estratificación..... | 86 |
| 5.1.2 Resultados obtenidos del análisis de datos de estratificación..... | 93 |
| 5.2 Fallas sinsedimentarias en la formación Tianguistengo..... | 96 |
| 5.2.1 Análisis estructural de fallas sinsedimentarias en la formación Tianguistengo..... | 96 |
| 5.3 Discordancias internas en la formación Tianguistengo..... | 99 |
| 5.4 Familias de fallas en las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec..... | 102 |
| 5.5 Brechas y deformación sinsedimentaria..... | 104 |

| | |
|--|---------|
| Capítulo 6. Geocronología U-Pb de Circones detríticos..... | 105 |
| 6.1 Análisis geocronológico muestra P.50..... | 105 |
| 6.2 Análisis geocronológico muestra P.53..... | 110 |
| 6.3 Conclusiones del análisis geocronológico..... | 113 |
| 6.4 Edad de la formación Tianguistengo..... | 115 |
| Capítulo 7. Discusión de los resultados..... | 117 |
| 7.1 Modelo de paleoambiente de depósito de la formación Tianguistengo..... | 117 |
| 7.2 Edad de la formación Tianguistengo..... | 118 |
| 7.3 Tectónica sinsedimentaria..... | 119 |
| 7.4 Ambiente tectónico..... | 120 |
| Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones..... | 123 |
| Referencias..... | 125 |
| Apéndice I. Tectónica sinsedimentaria..... | 135 |
| Apéndice II. Análisis geocronológico de circones detríticos..... | 162 |
| Mapa Geológico anexo | |

TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Coordenadas de los vértices que delimitan la zona de estudio..... | 4 |
| Tabla 2.1. Tabla estratigráfica comparativa que muestra las unidades propuestas por autores anteriores en la región de estudio y las definidas en este trabajo..... | 7 |
| Tabla 4.1. Lista de columnas estratigráficas medidas..... | 40 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.2. Alcance estratigráfico específico de las superfamilias que conforman el orden Podocopida y sus preferencias ambientales..... | 61 |
| Tabla 4.3. Características de las asociaciones de facies reconocidas en la formación Tianguistengo..... | 68 |
| Tabla 5.1. Valores promedio de rumbo y buzamiento para las sucesiones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en cada uno de los cinco sectores..... | 90 |
| Tabla 5.2. Estratificación, planos de falla y esfuerzos que influyeron en la inclinación de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec..... | 94 |
| Tabla. 5.3. Datos de rumbo y echado colectados en el afloramiento Xiotillo-Magdalena y sus orientaciones originales al restaurarlos a la paleohorizontal..... | 100 |

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1. Imagen satelital de la cuenca Otlaltepec..... | 2 |
| Fig. 1.2. Mapa de localización del área de estudio y vías de acceso principales..... | 4 |
| Fig. 2.1. Mapa de terrenos tectonoestratigráficos del sur de México..... | 6 |
| Fig. 2.2. Imágenes de afloramientos de la Formación Tecomate..... | 10 |
| Fig. 2.3. Contactos tectónicos entre los esquistos de bajo grado y los de alto grado de metamorfismo diferenciados en el Complejo Acatlán..... | 11 |
| Fig. 2.4. Contactos tectónicos entre el Plutón Totoltepec y el Complejo Acatlán..... | 12 |
| Fig. 2.5. Relación de intrusión entre las rocas de composición félsica y composición gabraica presentes en el Plutón Totoltepec..... | 14 |
| Fig. 2.6. Estructuras sedimentarias en conglomerados y areniscas de la formación Piedra Hueca..... | 19 |
| Fig. 2.7. Areniscas de grano medio con fallas normales sinsedimentarias..... | 20 |
| Fig. 2.8. Relación de discordancia entre las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec..... | 21 |
| Fig. 2.9. Alternancia de areniscas y lodolitas en la formación Otlaltepec..... | 24 |
| Fig. 2.10. Depósitos de la formación Magdalena..... | 26 |
| Fig. 2.11. Esquema estructural de la zona de estudio..... | 34 |
| Fig. 4.1. Simbología utilizada en las columnas estratigráficas..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Fig. 4.2. Columna I Santo Domingo..... | 42 |
| Fig. 4.3. Columna II Magdalena..... | 43 |
| Fig. 4.4. Columna III Cazahuate..... | 44 |
| Fig. 4.5. Columna IV Tedigno..... | 45 |
| Fig. 4.6. Columna V Alegría..... | 46 |
| Fig. 4.7. Características sedimentológicas de la facies Fl..... | 49 |
| Fig. 4.8. Evidencias de crecimiento de vegetación en la facies Fr..... | 50 |
| Fig. 4.9. Características sedimentológicas de la facies Sp..... | 51 |
| Fig. 4.10. Estratificación cruzada curva..... | 52 |
| Fig. 4.11. Características sedimentológicas de la facies Sr..... | 53 |
| Fig. 4.12. Características sedimentológicas de las facies Sm y Gmm..... | 54 |
| Fig. 4.13. Características sedimentológicas de las facies Gmg y Gci..... | 55 |
| Fig. 4.14. Características sedimentológicas de las facies Ai, C y la microfacies LMF6.... | 56 |
| Fig. 4.15. Características petrológicas de las rocas carbonatadas de la formación Tianguistengo Textura 1..... | 59 |
| Fig. 4.16. Características petrológicas de las rocas carbonatadas de la formación Tianguistengo Textura 2..... | 60 |
| Fig. 4.17. Distribución esquemática de los tipos de microfacies comunes de calizas lacustres de agua dulce..... | 65 |
| Fig. 4.18. Correlación estratigráfica de las columnas I, II, III, IV y V..... | 69 |
| Fig. 4.19. Fotomicrografías de muestras de roca de la facies Fl..... | 71 |
| Fig. 4.20. Fotomicrografía de la muestra SDT-56 de la facies Fr..... | 73 |
| Fig. 4.21. Fotomicrografías de la facies Sp..... | 73 |
| Fig. 4.22. Muestras de clástos en los lentes conglomeráticos de la facies Sp..... | 75 |
| Fig. 4.23. Fotomicrografías de la facies St..... | 76 |
| Fig. 4.24. Fotomicrografías de la facies Sr..... | 77 |
| Fig. 4.25. Areniscas de grano medio pertenecientes a la facies Sm..... | 78 |
| Fig. 4.26. Areniscas de grano grueso presentes en la facies Gmm..... | 79 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4.27. Clástos de los conglomerados de la facies Gmg..... | 81 |
| Fig. 4.28. Muestra petrográfica de la facies Gci..... | 82 |
| Fig. 4.29. Fotomicrografía de la facies Bi..... | 82 |
| Fig. 5.1. Modelo experimental de falla lístrica mostrando el secuencial desarrollo de grabens y sucesiva inclinación de las capas..... | 85 |
| Fig. 5.2. Sectores 1, 2, 3, 4 y 5 ubicados en el mapa geológico de área de estudio..... | 87 |
| Fig. 5.3. Diagramas estereográficos en los que se observan de los datos estructurales de cada una de las sucesiones sedimentarias jurásicas..... | 89 |
| Fig. 5.4. Polos que representan las variaciones promedio de los datos de rumbo y buzamiento para las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec al ser restauradas a la horizontal..... | 92 |
| Fig. 5.5. Mapa geológico con las orientaciones de la falla asociada al depósito de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en los Sectores 1, 2, 3, 4 y 5..... | 95 |
| Fig. 5.6. Esquema de una falla sinsedimentaria..... | 96 |
| Fig. 5.7. Afloramientos que muestran la presencia de fallas sinsedimentarias..... | 97 |
| Fig. 5.8. Diagramas de densidad de polos que muestran los esfuerzos asociados al desarrollo de las fallas sinsedimentarias..... | 98 |
| Fig. 5.9. Afloramiento Xiotillo-Magdalena, los números indican la zona de colecta de los datos de rumbo y echado..... | 99 |
| Fig. 5.10. Diagramas estereográficos del afloramiento Xiotillo-Magdalena..... | 101 |
| Fig. 5.11. Sistemas de fallas presentes en la formación Tianguistengo..... | 102 |
| Fig. 5.12. Sistemas de fallas observados en las rocas de la formación Tianguistengo..... | 102 |
| Fig. 5.13. Sistemas de fallas presentes en las rocas jurásicas de la cuenca Otlaltepec..... | 103 |
| Fig. 5.14. Brechas tectónicas sinsedimentarias y pliegues sinsedimentarios..... | 104 |
| Fig. 6.1. Imagen de catodoluminiscencia de los cristales de la muestra P.50..... | 106 |
| Fig. 6.2. Diagrama acumulativo de las edades U-Pb y diagrama de concordia Tera-Wasserburg que muestra las edades U-Pb obtenidas para los cristales de la muestra P. 50..... | 107 |
| Fig. 6.3. Poblaciones principales de circones de la muestra P.50..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 6.4. Tabla que relaciona las morfologías y las edades presentes en la muestra P. 50..... | 109 |
| Fig. 6.5. Imagen de catodoluminiscencia de los cristales de la muestra P.53..... | 111 |
| Fig. 6.6. Diagrama acumulativo de las edades U-Pb y diagrama de concordia Tera-Wasserburg que muestra las edades U-Pb obtenidas para los cristales de la muestra P. 53..... | 112 |
| Fig. 6.7. Poblaciones principales de circones de la muestra P.53..... | 114 |
| Fig. 6.8. Tabla que relaciona las morfologías y las edades presentes en la muestra P. 53..... | 115 |
| Fig. 7.1. Modelo de facies esquemático para la formación Tianguistengo, depositada en un sistema aluvial asociado a una falla sinsedimentaria..... | 118 |
| Fig. 7.2. Modelo esquemático que representa el relleno sedimentario de la cuenca Otlaltepec del Triásico Superior al Jurásico Superior. Región de Santo Domingo Tianguistengo..... | 121 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este estudio se presentan el análisis de facies y microfacies, así como datos petrográficos, geocronológicos y estructurales de la formación Tianguistengo, la cual está expuesta en las cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, Oaxaca. Dichos datos fueron obtenidos con la finalidad de determinar el contexto de depósito de la unidad anteriormente mencionada, la cual representa el registro estratigráfico sedimentario mesozoico más antiguo de la cuenca Otlaltepec.

En el relleno sedimentario de la cuenca Otlaltepec se han reconocido tres discordancias mayores que sugieren la existencia de actividad tectónica sinsedimentaria. El entendimiento de los procesos geológicos que influyeron en el relleno de esta cuenca puede ayudar a determinar el ambiente tectónico prevaleciente durante la acumulación de sus sedimentos y hacer inferencias acerca de si existe una relación entre la formación de la cuenca Otlaltepec y la apertura del Golfo de México.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sur de México se encuentra compuesto por un mosaico de terrenos tectono-estratigráficos (Campa y Coney, 1983), diferenciados por su estratigrafía e historia tectónica. El Terreno Mixteca forma parte de esta región, considerada como una zona compleja con problemas geológicos sin resolver y cuya evolución tectónica aún no ha sido comprendida totalmente (Elías-Herrera, *et al.*, 2005).

La cuenca Otlaltepec se encuentra en el sector norte-centro del Terreno Mixteca, y en ella aflora una sucesión clástica depositada desde Triásico hasta el Jurásico Superior (Ortega-Guerrero 1989; Ramos-Leal, 1989) que sobreyace al basamento metamórfico representado por el Complejo Acatlán y que es a su vez está cubierta por depósitos marinos cretácicos (Fig. 1.1).

En 1993, Morán-Zenteno propone una evolución paleogeográfica del Terreno Mixteca basada en la información estratigráfica y sedimentológica de diversos autores. En dicho trabajo se reporta que la sedimentación presente durante el Jurásico Medio en la zona central del Terreno Mixteca es de tipo fluvial (incluyendo la región de Santo Domingo Tianguistengo).

En la zona de estudio la sucesión sedimentaria triásica-jurásica está subdividida por tres discordancias mayores que se paran a las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec (Ortega-Guerrero, 1989; Ramos-Leal, 1989). Estas rocas presentan variaciones litológicas y composicionales que reflejan cambios en el ambiente sedimentario y en la procedencia de las mismas. La presencia de las discordancias ha sido reportada con anterioridad (Ortega-Guerrero, 1989; Ramos-Leal, 1989) sin embargo, no existe una cartografía detallada de ellas ni de las unidades clásticas que dividen y por lo tanto su significado geológico no se ha comprendido plenamente. El ambiente tectónico prevaleciente durante el depósito de las rocas triásicas y jurásicas tampoco ha sido discutido en los trabajos realizados en la región.

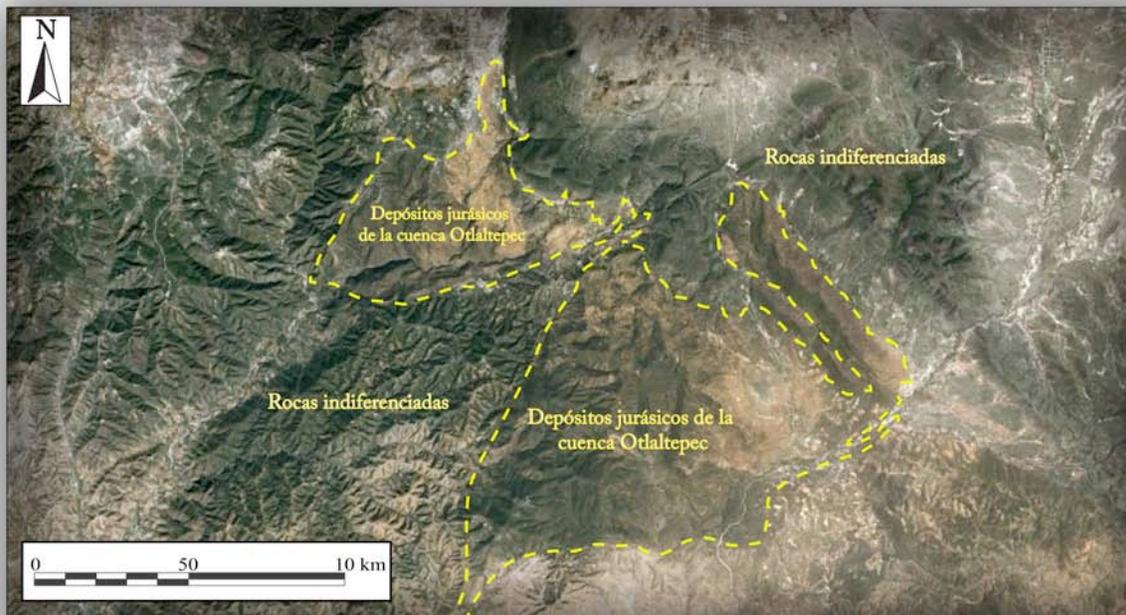


Fig. 1.1. Imagen satelital de la cuenca Otlaltepec, se observa la ubicación de los depósitos jurásicos mencionados en este trabajo (área central) y los depósitos jurásicos expuestos al norte. Modificado de Google Earth.

El presente estudio es una investigación a detalle de la unidad denominada como formación Tianguistengo la cual fue propuesta por Ramos-Leal (1989) en su tesis de licenciatura de manera informal para referirse a litarenitas y limolitas de grano fino de color rojizo y pardo expuestas en la

región de Santo Domingo Tianguistengo. En dicho trabajo se consideró que estas rocas tenían una posible edad triásica. El interés por esta unidad surge del desconocimiento de su estratigrafía, composición y ambiente depósito, que son claves para determinar la naturaleza de la formación e historia geológica de la cuenca Otlaltepec.

1.2 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo principal caracterizar la evolución tectonosedimentaria de la formación Tianguistengo, ubicada en la cuenca Otlaltepec, con base en sus características sedimentológicas, estratigráficas, estructurales y petrográficas.

Objetivos específicos

- Definir la estratigrafía general de la región e integrarla con los datos estratigráficos previos.
- Proponer un modelo de facies y paleoambiental para los depósitos de la formación Tianguistengo.
- Conocer la relación espacio-temporal entre las unidades jurásicas depositadas en la cuenca Otlaltepec.
- Entender la relación entre la sedimentación y la deformación en la zona de estudio.
- Proponer una edad máxima de depósito para la formación Tianguistengo con base en análisis de circones detríticos.
- Proponer el tipo de tectónica existente durante el relleno sedimentario de la cuenca.

1.3 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La zona de estudio se ubica al norte del estado de Oaxaca, en el límite con el Estado de Puebla, al sur de México. Comprende una superficie de 320 km², la cual queda incluida dentro de las cartas San Juan Ixcaquixtla (E14B74) y Petlalcingo (E14B84) escala 1:50,000 de INEGI (2012, a y b).

| Vértice | Coordenadas UTM | |
|----------|-----------------|---------|
| | m E | m N |
| A | 612000 | 2031000 |
| B | 632000 | 2031000 |
| C | 612000 | 2015000 |
| D | 632000 | 2015000 |

- Elipsoide GRS80. Datum ITRF92.

Tabla 1.1. Coordenadas de los vértices que delimitan la zona de estudio (Figura 1.2).

Esta área es accesible desde la Ciudad de México por la autopista N° 150D “México-Puebla” hasta la desviación hacia Tepexi de Rodríguez, Puebla, en donde se toma la carretera federal 455 hacia el sur. Pasando el poblado de Ixcaquixtla, Puebla, se continúa hacia el sur para arribar al área de estudio. También es posible llegar por la carretera 190, hacia Acatlán de Osorio, Puebla, poblado del cual se toma la carretera estatal 455 en dirección noreste hacia Ixcaquixtla (Fig. 1.2).

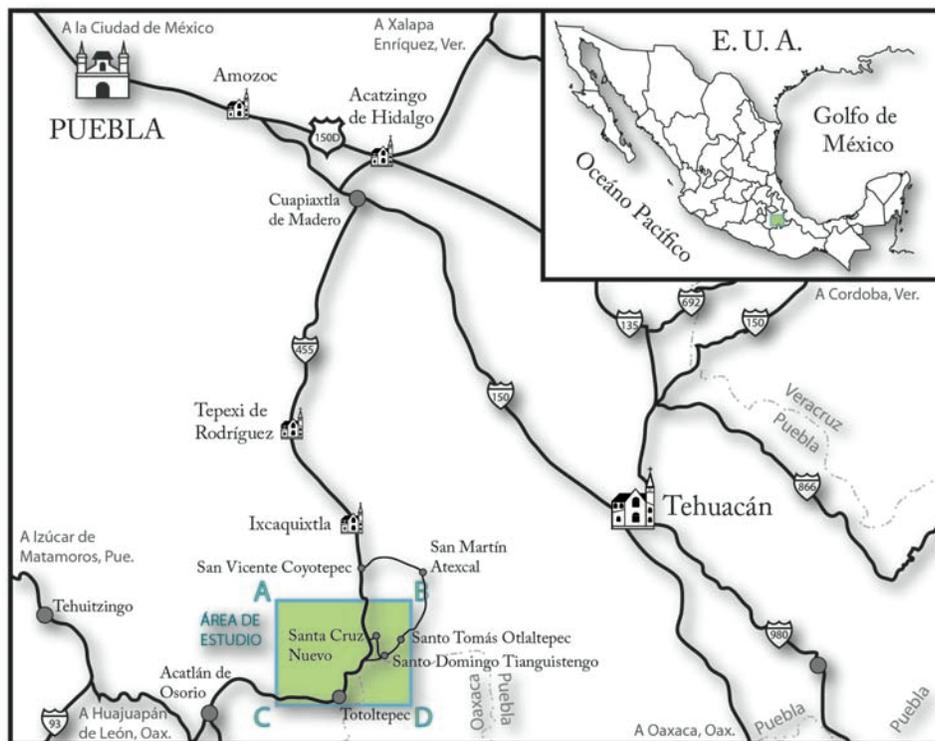


Fig. 1.2. Ubicación del área de estudio y vías de acceso principales desde la Ciudad de Puebla.

CAPÍTULO 2

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El territorio mexicano ha sido considerado desde mediados de 1980's como el resultado de la acreción de distintos bloques corticales. Dicha acreción ocurrió durante gran parte de la historia mesozoica, paleozoica y proterozoica del país (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993; Centeno-García *et al.*, 2008). A fin de entender la relación espacio-temporal entre estos bloques han sido propuestas algunas subdivisiones de terrenos tectonoestratigráficos, que se definen como bloques corticales con una estratigrafía e historia tectónica particular, separados entre sí por estructuras de carácter regional y diferenciados especialmente por la edad y evolución tectónica de sus basamentos. Debido a la gran cantidad de estudios al respecto, se ha replanteado continuamente la ubicación y tipo de algunos límites de los terrenos, así como el carácter alóctono de los mismos, lo cual ha suscitado un intenso debate alrededor de estos tópicos.

En particular, el sur de México se caracteriza por ser una región con una gran cantidad de problemas geológicos sin resolver, compuesta por cinco principales terrenos, que son: Guerrero, Mixteca, Oaxaca, Juárez y Xolapa (según Campa y Coney, 1983), que en conjunto conservan el registro de la historia geológica de más de 1,000 Ma, en los cuales han ocurrido eventos tectónicos importantes como la formación del sistema orogénico Greenvilliano, la interacción entre Gondwana y Laurentia y el rompimiento y dispersión del supercontinente Pangea. Estos procesos se reflejan en la deformación, exhumación y sepultamiento de las rocas que conforman esta región (Elías-Herrera *et al.*, 2005, Centeno-García, 2005) (Fig. 2.1).

El Terreno Mixteca es diferenciado, por su basamento cristalino paleozoico, el Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978). En sus límites se encuentran los terrenos Oaxaca, Guerrero y Xolapa (Campa y Coney, 1983), cuyos contactos son la falla Caltepec (Elías-Herrera *et al.*, 2005), la falla Papalutla (Sedlock *et al.*, 1993) y la falla La Venta, respectivamente (Ortega-Gutiérrez, 1981; Ruíz *et al.*, 1988; Yáñez *et al.*, 1991) (Fig. 2.1).

El basamento cristalino de este terreno ha sido descrito como un complejo metamórfico polideformado que incluye esquistos pelíticos, esquistos verdes, metagranitoides, migmatitas y

porciones ofiolíticas eclogitizadas (Ortega-Gutiérrez, 1981; Ruíz *et al.*, 1988; Yáñez *et al.*, 1991); y está sobreyacido discordantemente por sucesiones marinas y continentales expuestas en diversas localidades de la región. El alcance estratigráfico de estas unidades comprende desde el Paleozoico (e.g. formaciones Matzizi y Patlanoaya) (Vachard *et al.*, 2000; Centeno-García *et al.*, 2009), el Mesozoico (e.g. formaciones Tecomazúchil y Tianguistengo) (Caballero-Miranda *et al.*, 1990; Ramos-Leal, 1989) y el Cenozoico.

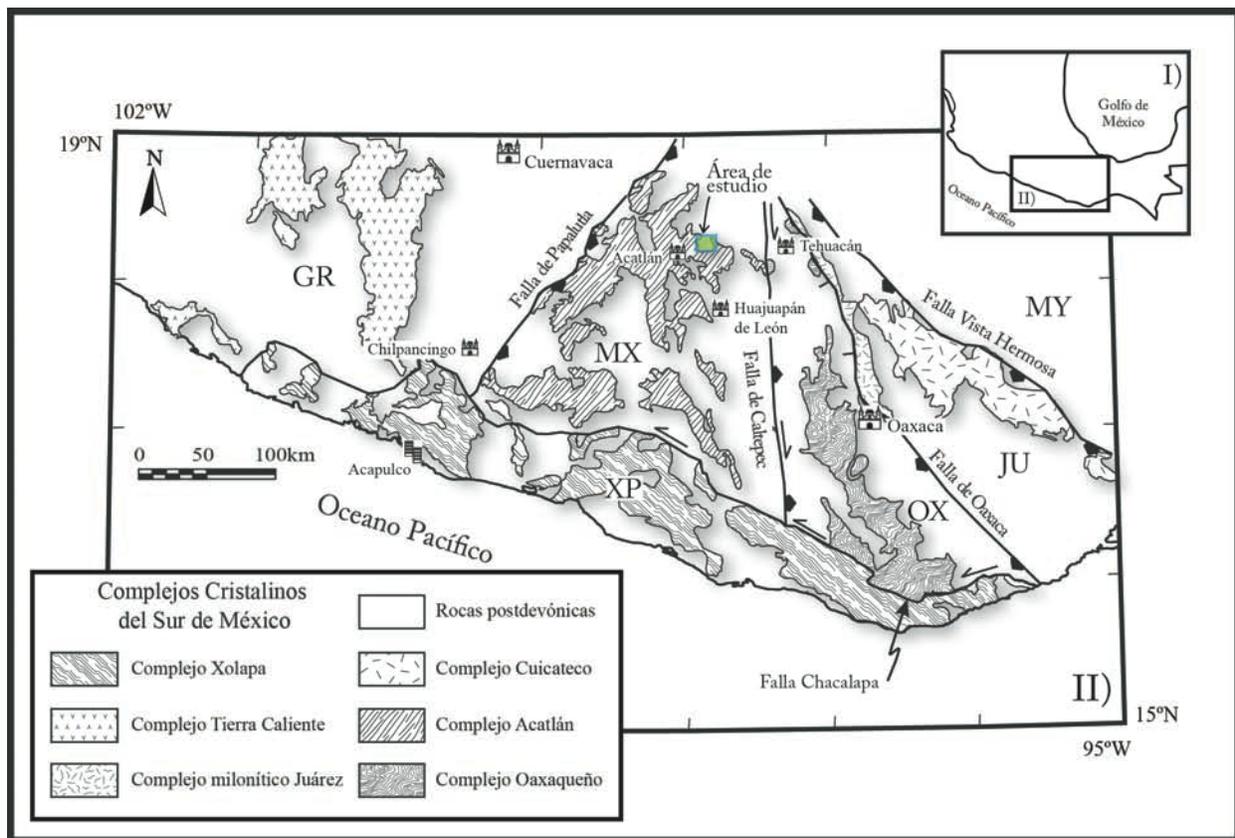


Fig. 2.1. I) Ubicación del mapa II en el territorio nacional. II) Terrenos tectonoestratigráficos y complejos cristalinos del sur de México, de acuerdo a la subdivisión propuesta por Campa y Coney (1983). Las regiones representadas incluyen los terrenos Guerrero (GR), Mixteca (MX), Xolapa (XP), Oaxaca (OX), Juárez (JU) y Maya (MY). La zona de estudio se encuentra al norte del Terreno Mixteca, cuyo basamento es el Complejo Acatlán. Modificado de Tolson (2005).

2.1 ESTRATIGRAFÍA LOCAL

Las unidades estratigráficas que afloran en el área de estudio comprenden desde rocas metamórficas e ígneas, que conforman el basamento de la cuenca Otlaltepec, hasta rocas sedimentarias, cuerpos intrusivos y sedimentos (Tabla 2.1). A continuación se presenta un resumen de las características estratigráficas más sobresalientes de cada unidad expuesta en la región.

| Erosión o no depósito | | | | | ESTRATIGRAFÍA CUENCA OTLALTEPEC | | | |
|-----------------------|----------------|--------------|----------------|-------------|---------------------------------|------------------------------|---|------------------------|
| | | | | | BEATRIZ ORTEGA GUERRERO 1989 | JOSÉ ALFREDO RAMOS LEAL 1989 | ESTE TRABAJO Y SUS REFERENCIAS 2015 | |
| ERATEMA | SISTEMA | SERIE | PISO | EDAD [Ma] | UNIDADES | UNIDADES | UNIDADES | |
| Cenozoico | Cuaternario | Holoceno | | 0.0117 | Aluvión | Aluvión | Aluvión | |
| | | Pleistoceno | | 2.588 | | | Depósitos Cuaternarios y cuerpos intrusivos no diferenciados. | |
| | Neogeno | Plioceno | | 5.332 | | | | |
| | | Mioceno | | 23.03 | | | | |
| | Paleogeno | Oligoceno | | 33.9 | Formación Agua de Luna | | | |
| | | Eoceno | | 55.8 ± 0.2 | | | | |
| | | Paleoceno | | 65.5 ± 0.3 | Unidad Pozo Hondo | | Unidad Pozo Hondo | |
| Mesozoico | Cretácico | Superior | Maestrichtiano | | 70.6 ± 0.6 | | Cipiapa | Caliza Coyotepec |
| | | | Campaniano | | 83.5 ± 0.7 | | | |
| | | | Santoniano | | 85.8 ± 0.7 | | | |
| | | | Coniaciano | | 88.6 | | | |
| | | | Turoniano | | 93.6 ± 0.8 | | | |
| | | | Senoniano | | 99.6 ± 0.9 | | | |
| | Inferior | Albiano | | 112 ± 1 | Caliza Coyotepec | | Caliza Coyotepec | |
| | | Aptiano | | 125 ± 1 | Unidad Magdalena | Formación San Juan Raya | Formación Magdalena | |
| | | Barremiano | | 130 ± 1.5 | | Formación Agua del Cordero | | |
| | | Hauteriviano | | 133.9 | | | | |
| | | Valanginiano | | 140.2 ± 3 | | | | |
| | | Berriasiano | | 145.5 ± 4 | | | | |
| | Titoniano | | 150.8 ± 4 | | | | | |
| | Kimmeridgiano | | 155.6 | | | | | |
| | Jurásico | Superior | Oxfordiano | | 161.2 ± 4 | Unidad Otlaltepec | Miembro Otlaltepec | Formación Otlaltepec |
| | | | Calloviano | | 164.7 ± 4 | | | |
| | | Medio | Bathoniano | | 167.7 ± 3.5 | Unidad Piedra Hueca | Miembro Santa Cruz | Formación Piedra Hueca |
| | | | Bajociano | | 171.6 ± 3 | | | |
| | | | Aeleniano | | 175.6 ± 2 | | | |
| | | | Toarciano | | 183 ± 1.5 | | | |
| Inferior | Pliensbaquiano | | 189.6 ± 1.5 | | Miembro Piedra Hueca | | | |
| | Sinemuriano | | 196.5 ± 1 | | | | | |
| | | Hettangiano | | 199.6 ± 0.6 | | | | |
| Triásico | Superior | Rhaetiano | | | Tronco de Totoltepec | Formación Tianguistengo | Formación Tianguistengo | |
| | | Norianiano | | | | | | |
| | | Carniano | | | | | | |
| | Medio | Ladiniano | | | | | | |
| | | Anisiano | | | | | | |
| | Inferior | Olenikiano | | | | | | |
| | | Induano | | 252 ± 0.06 | | | | |
| Paleozoico | Pérmico | | | 299 ± 0.8 | | | Plutón de Totoltepec | |
| | Carbonífero | | | 359.2 ± 2.5 | | | | |
| | Devónico | | | 416 ± 2.8 | | | | |
| | Silúrico | | | 443.7 ± 1.5 | Complejo Acaatlán | Complejo Acaatlán | | |
| | Ordovícico | | | 488.3 ± 1.7 | | Gabo Santo Domingo | | |
| | Cámbrico | | | 542 ± 1 | | Tronco de Totoltepec | | |

Tabla 2.1. Tabla estratigráfica comparativa que muestra las unidades propuestas por otros autores y las definidas en este trabajo en la región de estudio.

2.1.1 PALEOZOICO

Complejo Acatlán

Antecedentes

El nombre de Formación Acatlán fue utilizado por Ordóñez (1905, 1906) para designar a las rocas metamórficas que afloran en las cercanías del poblado de Acatlán, Puebla; las cuales fueron consideradas por este autor como “arcaicas”. Estos trabajos son una de las primeras referencias que se tienen de estas rocas y hacen hincapié en su diferencia con otros afloramientos metamórficos ubicados en el estado de Oaxaca, que actualmente corresponden a los complejos Oaxaqueño y Xolapa, posteriormente, fueron descritas y renombradas (Esquistos Acatlán, Complejo Acatlán) por diversos autores (Salas, 1949; Fries y Rincón-Orta, 1965; Ortega-Gutiérrez, 1970) hasta que finalmente Ortega-Gutiérrez (1978) propone formalmente el rango litodémico de complejo y las subdivide en los subgrupos litoestratigráficos Petlalcingo y Acateco, y en tres unidades intrusivas conocidas como Diques San Miguel, Granitoides Esperanza y el Tronco de Totoltepec. Este último intrusivo fue considerado por Ortega-Gutiérrez (1978) como un cuerpo ajeno al Complejo Acatlán, sin embargo estudios recientes (Kirsch, 2012; Kirsch *et al.*, 2012; Kirsch *et al.*, 2013), han propuesto su integración al complejo. En este trabajo se considera a estas rocas intrusivas como parte del Complejo Acatlán, pero se describen de manera independiente debido a su importancia geológica en el área de estudio.

Localidad tipo

Su localidad tipo son los afloramientos expuestos en la Mixteca en los estados de Puebla y Oaxaca y su sección tipo va a lo largo de la carretera federal 190 México-Oaxaca en el segmento ubicado entre el entronque con el camino a Tecamatlán y el poblado Chila de las Flores (Ortega-Gutiérrez, 1978).

Distribución

El Complejo Acatlán aflora en el área de estudio hacia el oeste, donde ha sido descrito por Morales-Gómez (2011). Puede accederse a esta región por la carretera 455 que va de Ixcaquixtla a Acatlán. También aflora al este del área de estudio donde puede observarse en la terracería que va del

poblado Santo Domingo Tianguistengo a Santo Tomas Otlaltepec y en las cañadas aledañas a esta región, especialmente sobre el lecho del Río Magdalena. Hacia el sureste aflora en las cañadas cercanas al Cerro Amarillo y en el camino al rancho El Limón, donde fue descrito por Sánchez-Zavala (2008).

Descripción litológica

El Complejo Acatlán es un complejo cristalino compuesto por rocas polideformadas que incluye: esquistos pelíticos, esquistos verdes, meta-granitoides, migmatitas y porciones ofiolíticas eclogitizadas (Ortega-Gutiérrez, 1978; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1999; Talavera *et al.*, 2005), cuya evolución geológica y subdivisión es aún un tema de debate.

En la región oeste del área de estudio Morales-Gómez (2011) subdividió al complejo en litodemas y los describió como paquetes de rocas limitados por fallas N-S formados por a) metapsamitas y metapelitas en facies metamórficas de esquistos verdes (Unidad Huerta); b) psamitas y arcosas en facies de esquistos verde-anfibolita (Unidad Amate); c) mármoles y areniscas y conglomerados de bajo grado metamórfico (Formación Tecomate) y d) metapsamitas, metapelitas y diques máfico toleíticos con metamorfismo en facies de esquistos verdes (Unidad Salada).

Hacia el sureste de la región de estudio el Complejo Acatlán se presenta en dos unidades, reconocidas como la Formación Tecomate (Sánchez-Zavala, 2008) y la Unidad Amarillo (Keppie *et al.*, 2012). La Formación Tecomate ha sido descrita como una sucesión turbidítica metasedimentaria compuesta por arcosa, grauvaca, litarenita, pizarra, conglomerado, caliza y rocas volcanoclásticas (Sánchez-Zavala, 2008) (Fig. 2.2).

La Unidad Amarillo, recientemente propuesta por Keppie *et al.* (2012), se caracteriza por ser una sucesión de rocas metasedimentarias de grado medio a alto, localmente intrusionadas por diques de anfíbolita, estos últimos muy similares a los documentados por Morales-Gómez, *et al.* (2009) en la Unidad Salada. Estudios recientes de circones detríticos indican una edad máxima de deposición de 337 ± 4 Ma (Missisipico). El contacto entre los litodemas Unidad Amarillo y Tecomate se presenta como una cabalgadura en la cual las rocas de alto grado de metamorfismo (Unidad Amarillo) sobreyace a las de bajo grado (Formación Tecomate) (Fig. 2.3).



Fig. 2.2. Imágenes de afloramientos de la Formación Tecomate. A) Esquistos verdes de clorita. Afloramiento en el lecho de la Barranca El Amate. B) Metaconglomerados expuestos en las cercanías del Cerro Tencolamani, aún se observan algunos de los clastos (línea azul). Dimensión del martillo 41 cm. Localidad ubicada a 1 km al E del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, ver Mapa Geológico anexo. Fotografía: Adriana Miranda Martínez.

Relaciones estratigráficas y edad

En el área de estudio, el Complejo Acatlán se encuentra sobreyacido discordantemente por la formación Otlaltepec y los depósitos cenozoicos no diferenciados de la región. El contacto con la formación Otlaltepec es observable hacia el noreste del área de estudio en el Cerro La Cruz, sin embargo también se encuentra en contacto por falla normal (Falla Tianguistengo) con esta misma unidad hacia el borde nororiental sobre la Barranca Mogote Colorado. El contacto discordante con los depósitos cuaternarios es observable sobre el lecho del Río Magdalena al suroeste del poblado de Santo Tomas Otlaltepec.

El Complejo Acatlán también se encuentra en contacto tectónico con el Plutón Totoltepec por medio de una cabalgadura (Fig. 2.4), por falla lateral izquierda y falla normal (Falla Tianguistengo). La cabalgadura es el contacto estructural más antiguo, sin embargo se ha reportado que existe un contacto de tipo intrusivo entre el paquete metamórfico y los cuerpos ígneos. También se encuentra en contacto tectónico por falla normal (Falla Tianguistengo) con la formación Tianguistengo sobre el lecho del Río Magdalena. La Falla Ameyaltepec a su vez representa el límite tectónico entre el basamento y las

unidades Tianguistengo y Piedra Hueca.



Fig. 2.3. Contactos tectónicos entre los esquistos de bajo grado y los de alto grado de metamorfismo diferenciados en el Complejo Acatlán, reconocidos como la Formación Tecamate y Unidad Amarillo respectivamente. A) Cabalgadura. Afloramiento en la Barranca El Amate. B) Cabalgadura. Localidad ubicada en la Barranca Salto El Agua a 1 km al SE del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, ver Mapa Geológico anexo. Fotografías: Betania Palacios García.

Hacia el norte del área de estudio se encuentra en contacto por falla lateral izquierda (Falla Gavilán) con las formaciones Piedra Hueca y Magdalena. Esta última unidad también cubre discordantemente al basamento paleozoico.

La edad del Complejo Acatlán ha sido ampliamente discutida por diversos autores (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1999; Keppie *et al.*, 2004; Talavera-Mendoza *et al.*, 2005) los cuales la sitúan de manera general entre el Cámbrico y Devónico (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1999) y el Ordovícico y Pérmico (Morales-Gámez, 2011).

Historia tectónica

Estudios recientes (e.g. Barley, 2006; Nance *et al.*, 2006; Keppie *et al.*, 2008; Morales-Gámez, 2011) han permitido una reconstrucción más detallada de la evolución tectónica de las rocas del Complejo Acatlán que se han interpretado como el registro de un rift del Ordovícico-Silúrico y del

consecuente cierre del océano Reico.

De acuerdo con Nance *et al.* (2006), los eventos orogénicos que influenciaron la formación del Complejo Acatlán están relacionados a una interacción entre los supercontinentes Laurentia y Gondwana antes y durante la conformación del super continente Pangea.



Fig. 2.4. Contactos tectónicos entre el Plutón Totoltepec y el Complejo Acatlán (línea). A) Cabalgadura. Localidad ubicada en el camino de terracería entre Santo Domingo Tianguistengo y el rancho El Limón, ver Mapa Geológico anexo. B) Falla normal. Afloramiento en la Barranca Salto El Agua. Fotografías: Betania Palacios García.

Plutón Totoltepec

Antecedentes

Fries *et al.*, (1970) definieron con el nombre de Tronco de Totoltepec al batolito granítico expuesto en los alrededores del poblado de Totoltepec de Guerrero, en el estado de Puebla. Este intrusivo fue considerado como una unidad independiente al Complejo Acatlán durante muchos años (Ortega-Gutiérrez, 1978), sin embargo estudios recientes (Kirsch, 2012; Kirsch *et al.*, 2012; Kirsch *et al.*, 2013) han demostrado que es el resultado de una intrusión sintectónica, por lo cual lo incorporan al complejo metamórfico y cambian su nombre a Plutón Totoltepec. Ramos-Leal (1989) lo dividió en dos unidades: Tronco de Totoltepec y Gabrodiorita Santo Domingo, debido a que en su porción norte el intrusivo presenta una franja de rocas de composición esencialmente gabraica que presentan diques de

composición granítica (Tabla 2.1). En este trabajo se considera a las rocas máficas como parte del Plutón Totoltepec, sin embargo algunas porciones de las mismas han sido delimitadas en el Mapa Geológico anexo. Para fines puramente descriptivos en este trabajo se exponen las características del Plutón Totoltepec de manera independiente al Complejo Acatlán.

Distribución

Este plutón se encuentra expuesto al sur del área de estudio, su eje mayor es de aproximadamente 15 km y su eje menor de 5 km, cubriendo un área de 75 km² (Kirsch, 2012). Su región norte expone rocas gabrodioríticas. Puede accederse a sus afloramientos por la carretera 455 que va de Ixcaquixtla a Acatlán y por las cañadas hacia la parte sur del área de estudio, algunos de los afloramientos importantes se observan a lo largo de la terracería hacia el poblado El Limón y en las barrancas Agua del Coco y Tehuixtle.

Descripción Litológica

La composición de este cuerpo es muy variada y diversos autores lo clasificaron de manera diferente; Calderón-García (1956) lo describió como una cuarzodiorita, Fries *et al.*, (1970) como una tonalita. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que su composición es muy variada, pues posee rocas con las siguientes composiciones: gabro de hornblenda, diorita, tonalita, trondhjemita, granodiorita y monzogranito (Kirsch, 2012). En campo es posible encontrar diques félsicos y gabrodioríticos intrusionando a las rocas de composición máfica (Fig. 2.5), lo cual sitúa a las rocas graníticas como más jóvenes.

Gran parte del plutón está afectado por asimilaciones de la roca encajonante, procesos de fraccionamiento y mezcla de magmas. De acuerdo a las observaciones de campo de Sánchez-Zavala (2008), es posible que el plutón se haya emplazado como un cuerpo tabular inclinado hacia el norte, por lo que se observa en su parte norte una deformación frágil-dúctil, que se incrementa hacia el sur.

Relaciones estratigráficas y edad

El contacto de este intrusivo con la formación Tianguistengo se reconoció como una inconformidad en una cañada adyacente al Cerro La Matanza, donde se encontró un paleosuelo que indica que las rocas sedimentarias de la formación Tianguistengo se depositaron sobre rocas gabroicas del Plutón Totoltepec, y que por ende, éste actuó como un límite de la cuenca Otlaltepec. El contacto estratigráfico original fue posteriormente afectado por la Falla Totoltepec que tiene un rumbo aproximado N70°W.

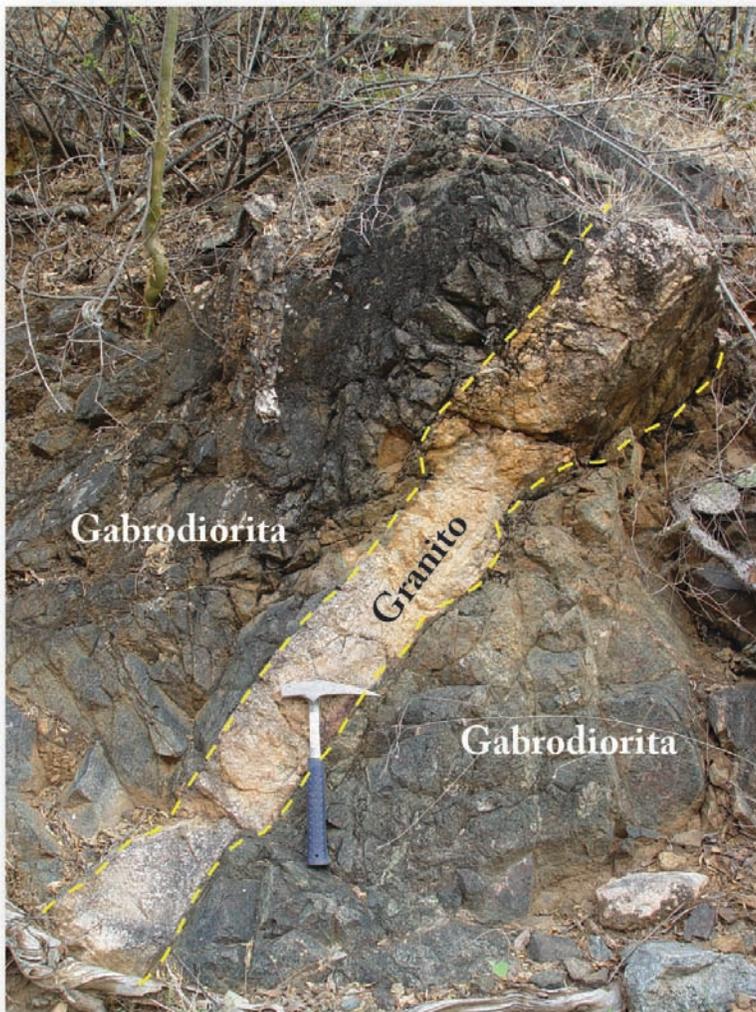


Fig. 2.5. Relación de intrusión entre las rocas de composición félsica y composición gabroica presentes en el Plutón Totoltepec (línea). Afloramiento de la Barranca Tedigno, localidad ubicada a 5 km al NW del poblado de Totoltepec de Guerrero, ver Mapa Geológico anexo. Dimensión del martillo 41 cm. Fotografía: Adriana Miranda Martínez.

Hacia el sureste del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, el Plutón Totoltepec se encuentra en contacto por inconformidad con depósitos de la formación Otlaltepec que lo cubren discordantemente.

El contacto con el Complejo Acatlán se presenta en varias formas: 1) por cabalgadura al sureste del área de estudio, que varía en orientación de S10°W-46° a NS-28° al W (Fig. 2.6); 2) por medio de fallas normales (Falla Tianguistengo y otras fallas menores no denominadas); 3) fallas laterales izquierdas; y 4) fallas laterales izquierdas con las unidades Tianguistengo y Piedra Hueca sobre el lecho del Río Magdalena.

Respecto a su edad, Ramos-Leal (1989) menciona que en la zona de estudio existen evidencias de intrusión con el Complejo Acatlán y Sánchez-Zavala (2008) reporta metareniscas del Complejo Acatlán intrusionadas por cuerpos pegmatíticos, que sugerirían una relación primaria de intrusión. Estas evidencias sugieren una edad Post-Devónico.

Estudios recientes de fechamientos de U-Pb en circones por ablación láser (LA-Q-ICPMS) han arrojado edades concordantes de intrusión para las rocas ultramáficas de 306 ± 2 Ma (Carbonífero Superior) y 289 ± 2 Ma (Pérmico Inferior) para la cristalización de las rocas félsicas (Kirsch *et al.*, 2012).

Significado tectónico

Este plutón ha sido considerado como parte de un arco magmático continental Permo-Carbonífero a lo largo de la margen occidental de Pangea que se extiende desde Guatemala hasta California y con base en su comparación con arcos magmáticos contemporáneos, se sugiere que fue emplazado en una corteza delgada. Otra interpretación indica que una falla actuó como conducto del magma derivado del manto. Se estima que el plutón sufrió un levantamiento y exhumación entre 287 y 283 Ma (Kirsch *et al.*, 2012).

2.1.2 MESOZOICO

Formación Tianguistengo

Definición

La formación Tianguistengo fue propuesta por Ramos-Leal (1989) en su tesis de licenciatura de manera informal para referirse a litarenitas y limolitas de grano fino de color rojizo y pardo expuestas en la región de Santo Domingo Tianguistengo. En dicho trabajo se consideró que estas rocas tenían una posible edad triásica. Ramos-Leal (1989) estipuló que la unidad estaba en contacto tectónico con el intrusivo Plutón Totoltepec y en contacto discordante con la formación Piedra Hueca del Jurásico Temprano. Ortega-Guerrero (1989) en su tesis de licenciatura estudió esta región e interpretó a las rocas continentales de la formación Tianguistengo como parte de la Unidad Piedra Hueca.

Distribución y localidad tipo

Esta formación aflora al sur y centro del área de estudio sobre el lecho del río Magdalena, en el tramo que va desde las cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, de donde toma su nombre, hasta el Cerro La Matanza. Hacia el suroeste la formación Tianguistengo aflora sobre el tramo carretero entre Ixcaquixtla y Totoltepec de Guerrero y sus alrededores. Al oeste de la región se ubica en las cercanías del rancho La Huertilla (ver Mapa Geológico anexo). Hacia el este del área de estudio hay un pequeño afloramiento ubicado en el norte del poblado de Santo Tomás Otlaltepec.

La localidad tipo fue propuesta informalmente por Ramos-Leal (1989) y se encuentra en la sección que aflora a lo largo del Río Magdalena al suroeste del poblado de Santa Cruz Nuevo.

Descripción litológica y espesor

La formación Tianguistengo se compone de una alternancia de areniscas de tipo arcosa laminadas de grano medio a fino en las que predomina el cuarzo y el feldespato y limolitas. Tienen una coloración general rojiza y se presentan en estratos delgados y medianos. Sus estructuras sedimentarias típicas son: laminación paralela, cruzada planar, lenticular y convoluta, grietas de desecación y rizaduras hacia la cima de los estratos, así como marcas de carga, nódulos, lentes de limolita, intraclastos de lutita e

intensa bioturbación. Su contenido fósil comprende marcas de raíces, troncos, moldes de troncos y plantas e icnofósiles. Presenta discordancias internas. En esta sucesión sedimentaria se encuentran lentes de 10 cm de espesor de calizas micríticas con ostrácodos. Hacia el occidente del área de estudio consiste en conglomerados masivos con matriz de arenas gruesas y clastos redondeados y subredondeados de gabro, esquistos, granito y arenisca. Ramos-Leal (1989) estimó un espesor aproximado de 200 m.

Relaciones estratigráficas y edad

El contacto inferior es una inconformidad con las gabrodioritas del Plutón Totoltepec en los alrededores del Cerro La Matanza, esta discordancia registra una sección de la cuenca Otlaltepec; también puede encontrarse en contacto por falla normal con este mismo cuerpo ígneo por medio de la Falla Totoltepec sobre el lecho del Río Magdalena. El contacto superior es de tipo discordante con los conglomerados de la formación Piedra Hueca y la formación Otlaltepec sobre el lecho del Río Magdalena. También puede encontrarse en contacto por fallas laterales izquierdas con las unidades mencionadas anteriormente. Los sedimentos cuaternarios la cubren discordantemente. Claramente se observa que el contacto con el Complejo Acatlán es tectónico (Falla Ameyaltepec). Su edad fue estimada por Ramos-Leal (1989) como Triásico, sin embargo en este trabajo se concluyó que su posible edad es Triásico Superior-Jurásico Inferior, en el Capítulo 5 referente a geocronología se explica a detalle esta conclusión.

Formación Piedra Hueca

Definición

Ramos-Leal (1989) nombró informalmente como Miembro Piedra Hueca de la Formación Tecmazúchil a la sucesión compuesta de conglomerados y areniscas que aflora en la región de Santo Domingo Tianguistengo. Mientras que Ortega-Guerrero (1989) denominó informalmente como “Unidad Piedra Hueca” a los conglomerados, areniscas y limolitas y lutitas de color predominantemente rojo que cubren discordantemente al Complejo Acatlán y el Plutón Totoltepec, en esta misma región (Tabla 2.1). La diferencia esencial entre estas dos descripciones es que Ramos-Leal

(1989) no consideró a los depósitos de areniscas y lutitas rojizas de la base como parte del Miembro Piedra Hueca, a estas rocas las llamó formación Tianguistengo; mientras que Ortega-Guerrero (1989) las agrupó en una misma unidad. Cruz-Cruz (2012) en su tesis de licenciatura nombra informalmente a las formaciones Tianguistengo y Piedra Hueca, por lo que retoma la división propuesta por Ramos-Leal (1989) debido a las diferencias litológicas, paleontológicas y composicionales notables entre las dos unidades mencionadas. Sin embargo, en este trabajo no se considera a la Unidad Piedra Hueca como una parte de la Formación Tecomazúchil, ni como depósitos de edad paleozoica.

Distribución y localidad tipo

La formación Piedra Hueca se encuentra distribuida hacia el suroeste de la región de estudio en las barrancas Piedra Hueca y Cazahuate; también se ubica hacia el centro del área de estudio sobre el lecho del Río Magdalena (ver Mapa Geológico anexo). Esta formación también aflora al norte de la Falla Gavilán (Ortega-Guerrero, 1989).

La localidad tipo propuesta para la formación Piedra Hueca se ubica en la barranca del mismo nombre, donde aflora un espesor importante de la formación y se observan sus contactos primarios discordantes con otras unidades.

Descripción litológica y espesor

Esta sucesión en su parte basal consiste en un conglomerado y arenisca de grano muy grueso intercalada con lodolita. Los estratos de conglomerado presentan una textura clásto soportada y tienen un espesor variable de 0.4 a 1.2 m; presentan fragmentos subredondeados de líticos de granito, esquisto, cuarzo lechoso, gabrodiorita y arenisca de grano fino de diámetro variable entre 1 y 20 cm. Puede presentar algunos horizontes de arena y lodolita de coloración castaña claro y verdoso. Este conglomerado tiene un espesor variable de 30 a 80 m (Ortega-Guerrero, 1989). Los conglomerados se presentan como estratos subparalelos con estratificación cruzada, gradación normal y marcas de carga a la base de color castaña claro al fresco. Los clastos de granito posiblemente correspondan a fragmentos del Plutón Totoltepec, ya que su composición es similar, mientras que los fragmentos de esquistos

podrían proceder del Complejo Acatlán, lo cual sitúa las fuentes de procedencia de estas rocas cercanas al lugar de depósito. Las lodolitas tienen un espesor máximo de 0.30 m (Fig. 2.6).

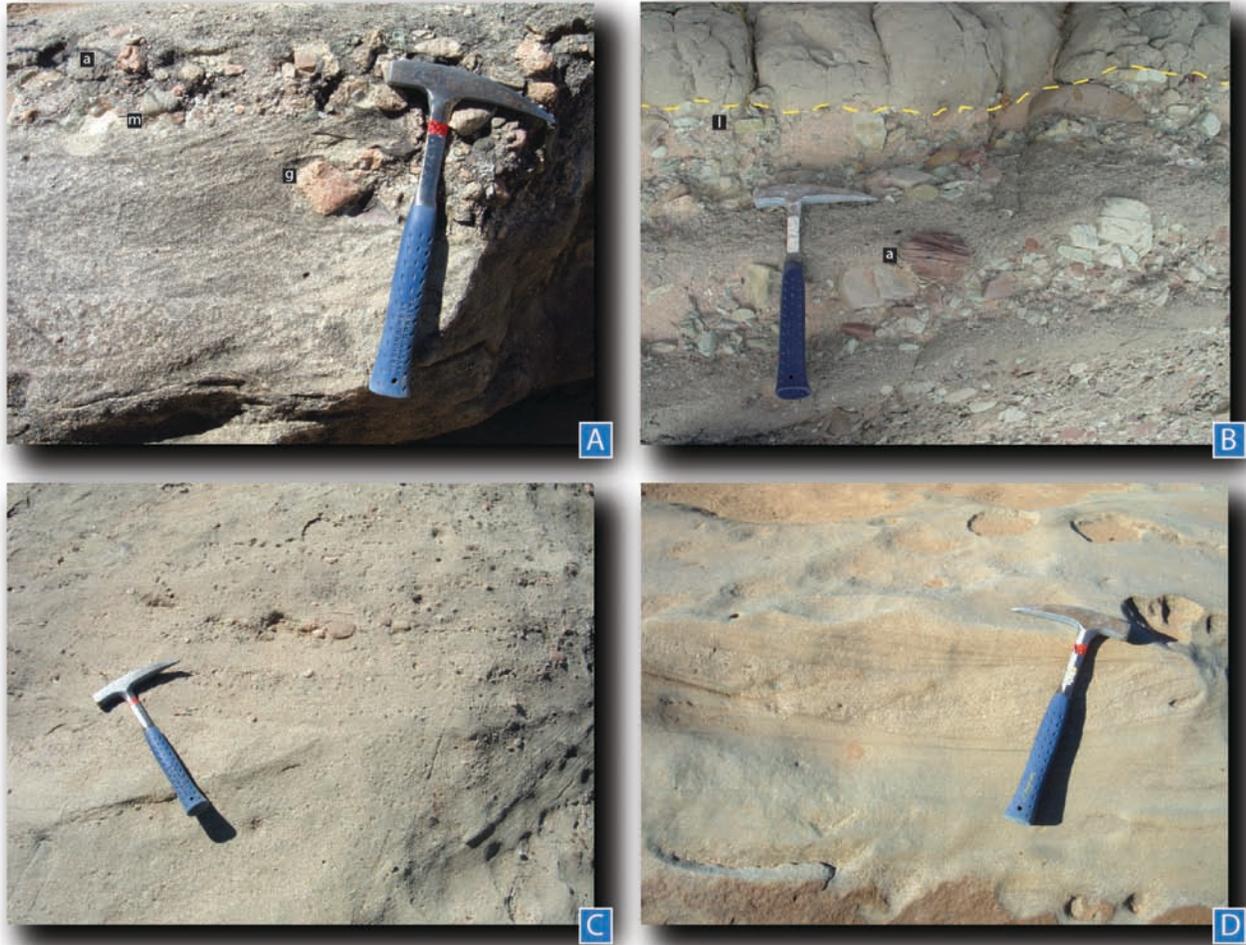


Fig. 2.6. A) Conglomerados de la formación Piedra Hueca, se observan los clastos de granito (g) areniscas (a) y líticas metamórficas (m) que lo conforman. B) Conglomerados con líticas de areniscas (a) y limolitas (l) de composiciones variadas. Sobre la línea se observa una disminución en el tamaño de grano con respecto a la parte inferior de la fotografía que presenta gradaciones sucesivas. Afloramientos sobre el lecho del Río Magdalena. C) Areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada, algunos de los clastos se encuentran alineados. D) Areniscas de grano medio con estratificación cruzada amplia. Afloramientos ubicados en la Barranca Rincón El Coco localidad ubicada a 1 km al NE del poblado de Santo Domingo Tianguistengo, ver Mapa Geológico anexo. Dimensión del martillo 41 cm.

Sobre estos depósitos basales descansa un paquete de areniscas de grano grueso a medio de composición cuarzo feldespática. Sus granos se presentan como angulosos y subredondeados en una textura moderadamente clasificada. Los estratos tienen máximo 2 m de espesor, son de cima y base irregulares y su coloración varía de castaño claro a castaño oscuro. Sus estructuras sedimentarias son: estratificación cruzada simple y planar; concreciones de arena, bioturbación, canales de corte y relleno; y lentes de conglomerados compuestos de fragmentos de granito, cuarzo lechoso, esquisto y gneis (Fig. 2.6). En las areniscas se encuentran pequeñas fallas normales sinsedimentarias, como evidencia de actividad tectónica durante la sedimentación. Su espesor ha sido estimado en 800 m (Ortega-Guerrero, 1989) (Fig. 2.7).



Fig. 2.7. Areniscas de grano medio con fallas normales sinsedimentarias. Afloramiento en la Barranca Piedra Hueca, localidad ubicada a 2 km al W del poblado de Santa Cruz Nuevo, ver Mapa Geológico anexo. Dimensión del martillo 41 cm.

Relaciones estratigráficas y edad

Esta unidad sobryace de manera discordante a la formación Tianguistengo y es a su vez sobryacida discordantemente por la formación Otlaltepec (Fig. 2.8). Ramos-Leal (1989) reportó estos contactos sedimentarios como fallas. Se encuentra en contacto tectónico por fallas laterales izquierdas

con el Plutón Totoltepec y la formación Tianguistengo y con el basamento de la región por la Falla Ameyaltepec.

La edad de la formación Piedra Hueca ha sido estimada como Jurásico Inferior-Medio, de acuerdo a sus relaciones estratigráficas con la formación Otlaltepec del Jurásico Medio-Superior, sin embargo no se ha encontrado información paleontológica concluyente.



Fig. 2.8. La línea indica la discordancia entre las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec. Afloramiento sobre el lecho del Río Magdalena, ver Mapa Geológico anexo.

Ambiente de depósito

De acuerdo con Ortega-Guerrero (1989) estas rocas fueron depositadas probablemente como abanicos y corrientes entrelazadas en un sistema fluvial trenzado, mientras que los depósitos más finos podrían corresponder a pequeñas planicies de inundación.

Formación Otlaltepec

Definición

La Unidad Otlaltepec fue propuesta informalmente por Ortega-Guerrero (1989) y fue descrita como una sucesión alternante de areniscas, lutitas y limolitas expuesta en la región de Santo Domingo Tianguistengo. Ramos-Leal (1989) nombra a estas rocas como Miembro Santa Cruz y Miembro Otlaltepec de la Formación Tecomazúchil (Tabla 2.1). Recientemente, Cruz-Cruz (2012), en su tesis de licenciatura, hizo un análisis estratigráfico de esta unidad, la cual separó en dos miembros que no

corresponden a los propuestos en este trabajo. Posiblemente, los límites entre las unidades propuestas en este trabajo (formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca, Otlaltepec) y los límites marcados por los autores mencionados no correspondan entre sí con exactitud (Tabla 2.1).

Ramos-Leal, 1989 dividió a la sucesión sedimentaria como formación Tianguistengo y formación Tecamazúchil (que comprende Miembro Piedra Hueca, miembro Santa Cruz y miembro Otlaltepec). Mientras que Ortega-Guerrero, 1989 dividió a la sucesión como unidad Piedra Hueca y unidad Otlaltepec.

Distribución y localidad tipo

La formación Otlaltepec se encuentra distribuida en el norte y noroeste del área de estudio; sus afloramientos son accesibles por la carretera que va de Ixcaquixtla a Acatlán y por las cañadas aledañas a esta vía de comunicación. Esta formación también aflora al norte de la Falla Gavilán (Ortega-Guerrero, 1989).

Descripción litológica, espesor y registro fósil

La formación Otlaltepec consta de dos miembros (Ortega-Guerrero, 1989 consideró a Otlaltepec como una Unidad), que se describen a continuación:

- Miembro Otlaltepec Inferior. Esta sucesión se compone de una alternancia de subarcosa y lodolita. Las areniscas son de color castaño claro, de grano medio a grueso de forma subangular a angular. Se presentan en estratos que se acuñan, cuyo espesor varía de 2.5 a 0.5 m. Los límites inferiores de los estratos pueden llegar a presentar marcas de carga; también pueden encontrarse gradaciones normales, estratificación cruzada y lentes de arenisca conglomerática. En ocasiones se encuentran clastos de granitoide y gabrodiorita. Su composición promedio es de 80% cuarzo, 15% de feldespatos y 5% de líticos oscuros no identificados (Fig. 2.9).

Las lodolitas son de coloración gris, morada y verdosa en estratos que se acuñan con un espesor entre 1.5 y 0.5 m. Se encontraron diversos restos de hojas, tallos y plantas. La vegetación fósil encontrada en este miembro es muy similar a aquella que reportó Ortega-Guerrero (1989) en la unidad Piedra Hueca como representantes de cicadofitas del género *Otozamites*, de posible edad

jurásica; *Otozamites hespera* Wieland del Jurásico Medio y restos de *Ptilophyllum acutifolium* Morris del Jurásico Inferior y Medio (los límites entre las unidades descritas anteriormente y las unidades descritas en este trabajo pueden variar).

- Miembro Otlaltepec Superior. El miembro superior se compone de areniscas de coloración rojiza de grano grueso compuesta principalmente de cuarzo y feldespatos. Se presenta en estratos de 0.5 m, en promedio, cuya superficie es uniforme. Estas areniscas se encuentran alternadas con horizontes conglomeráticos. Su clasificación es mala. En ocasiones pueden encontrarse estratos delgados de arena fina de coloración verdosa.

Este miembro presenta estratificación cruzada planar; tiene abundantes nódulos de arena gruesa de 12 a 3 cm de diámetro e impresiones de troncos.

Ambos miembros en promedio tienen N68°W-25° de rumbo y echado y su espesor total se ha estimado en 1500 m (Ortega-Guerrero, 1989).

El contenido fósil de esta unidad ha sido reportado por diversos autores y consiste esencialmente en restos de plantas, tales como hojas, ramas, troncos y corteza. Existen reportes de contramoldes de icnitas de saurópodos y de terópodos (Mendoza-Rosales y Silva-Romo, 1998) en la unidad, pero se desconoce a qué miembro pertenecen estas icnitas. También se ha colectado un ejemplar de *Williamsonia nezahualcoyotli* Wieland reportada como del Jurásico Inferior-Medio (Ramos-Leal, 1989). Cruz-Cruz (2012), reporta restos de Bennetiales, ramas de *Brachyphyllum*, helechos del género *Todites* y restos de *Williamsonia Tlazolteotl* Wieland y otros fósiles no identificados de cícadas, impresiones de madera y semillas.

Relaciones estratigráficas y edad

Descansa en discordancia angular sobre los depósitos de las formaciones Tianguistengo (al norte de Santo Tomás Otlaltepec) y Piedra Hueca (Barranca Piedra Hueca), así como del Complejo Acatlán (Loma Encinera y Cerro La Cruz). Al sureste del poblado de Santo Domingo Tianguistengo se ubica un pequeño afloramiento de conglomerados y areniscas compuestos principalmente de cuarzo en que descansan horizontalmente sobre Plutón Totoltepec .

La edad de la formación Otlaltepec ha sido estimada como Jurásico Medio-Superior, de acuerdo a su contenido paleontológico (Ramos-Leal, 1989).



Fig. 2.9. Alternancia de areniscas (A) y lodolitas (L) la formación Otlaltepec afectadas por una falla normal. Nótese la variación en los espesores y las marcas de carga en la base de los estratos de areniscas. Camino entre los poblados de Santa Cruz Nuevo y Santo Domingo Tianguistengo, ver Mapa Geológico anexo.

Ambiente de depósito

Esta unidad por sus estructuras sedimentarias y características texturales se ha interpretado como los depósitos de un ambiente fluvial o de un ambiente aluvial (Ortega-Guerrero, 1989). Cruz-Cruz (2012) concluyó en su tesis de licenciatura que el depósito de esta unidad se llevó a cabo en un ambiente fluvial dentro de un graben orientado en dirección NW-SE, donde se generaron depósitos aluviales que pasaron a un ambiente de fluvial de tipo trenzado.

Formación Magdalena

Definición

Ortega-Guerrero (1989) denominó informalmente como Unidad Magdalena a los conglomerados, areniscas, lutitas y margas que afloran en el arroyo Magdalena a 3.5 km al noreste de Santo Tomás Otlaltepec y en las cercanías de San Felipe Otlaltepec.

Distribución y localidad tipo

Se ubica al norte y noreste de área de estudio y es accesible por la carretera que va de Ixcaquixtla hacia Acatlán. También puede accederse a sus afloramientos desde los poblados de San Felipe Otlaltepec y San Pablo Ameyaltepec y por las numerosas cañadas de la región. No se ha propuesto localidad tipo para esta unidad.

Descripción litológica, espesor y registro fósil

Esta formación hacia la base consta de cuerpos conglomeráticos de color blanco y rosáceos con clastos de granodiorita, esquisto, cuarzo blanco y negro; todos subredondeados, intercalados con horizontes arenosos. Hacia la parte media se vuelve predominantemente arenosa con sublitarenitas con clastos de rocas volcánicas subangulares, intercaladas con horizontes de conglomerados de 0.2 m de espesor y con horizontes bentoníticos de 0.3 m de espesor. Las areniscas se clasifican como sublitarenitas con fragmentos de rocas volcánicas. Finalmente, hacia la cima predominan las margas. Tiene un espesor total de 200 m. No se ha reportado hasta ahora la presencia de fósiles (Ortega-Guerrero, 1989) (Fig. 2.10).

Relaciones estratigráficas y edad

Descansa en discordancia angular sobre las unidades jurásicas Piedra Hueca y Otlaltepec. Ortega-Guerrero (1989) reportó que en la región de Temoapa se observa claramente la naturaleza discordante de este contacto. También descansa discordante sobre el Complejo Acatlán; se infiere que el contacto con la Caliza Coyotepec pudiera ser transicional, por la naturaleza de la litología (margas vs. calizas), aunque actualmente es por falla inversa, mediante un *detachment*.

La edad ha sido estimada, de acuerdo a sus relaciones estratigráficas, como Aptiano-Albiano, por relaciones de contacto, dado que subyace a la Caliza Coyotepec de edad Albiano-Cenomaniano. No hay registro paleontológico que sustente o contradiga esta teoría.



Fig. 2.10. Depósitos de la Formación Magdalena en las cercanías del poblado San Felipe Otlaltepec.

Caliza Coyotepec

Definición

Se conoce como Caliza Coyotepec a los afloramientos de carbonatos expuestos al sur y oeste del poblado de San Vicente Coyotepec que Ortega-Guerrero (1989) propuso informalmente en su tesis de maestría. Otros autores la han denominado como Formación Cipiapa (Aguilera, 1906; Calderón-García, 1956; Morán-Zenteno, 1987; Ramos-Leal, 1989). Ortega-Guerrero (1989) decidió denominarla como una unidad nueva y no utilizar los nombres de otras formaciones de carbonatos (Cipiapa, Caliza Petlalcingo, Formación Morelos) de la zona por no poder demostrar la continuidad física entre esas unidades y la Caliza Coyotepec.

Distribución y localidad tipo

En la zona de estudio se encuentra florando al norte y noreste, donde puede accederse por la carretera que va de Ixcaquixtla hacia Acatlán. También puede accederse a sus afloramientos desde el poblado de San Felipe Otlaltepec y por las numerosas cañadas de la región. No existe una localidad tipo establecida para esta unidad.

Descripción litológica, espesor y registro fósil

La Caliza Coyotepec consta de tres miembros, no siempre diferenciables, que Ortega-Guerrero (1989) denominó y describió como:

- Miembro Inferior. Consta de estratos de 0.3 a 1 m de espesor de color beige de biomicrita. Esta presenta nódulos, lentes de pedernal, restos de ostreas y bancos de rudistas. También existen reportes de miliólidos, fragmentos de moluscos y equinodermos identificados en lámina delgada (Ramos-Leal, 1989). Se estimó un espesor de 150 m.

- Miembro Medio. Está constituido por estratos de caliza de 0.5 a 2 m de espesor de color beige. Presenta horizontes dolomitizados, brechas intraformacionales y coquinas con restos de gasterópodos, pelecípodos y miliólidos identificados como *Nummuloculina heimi* Bonet. Además, en lámina delgada se identificaron miliólidos, foraminíferos bentónicos, fragmentos de moluscos y equinodermos (Ramos-Leal, 1989). En la carretera que va de Santa Cruz Nuevo a Ixcaquixtla se identificaron rizadura. Su espesor estimado es de 150 m.

- Miembro Superior. Compuesto por calizas en estratos de 0.05 a 0.3 m con intercalaciones de horizontes de margas de 0.2 m de espesor promedio. La cima se encuentra cubierta por caliche. Presenta pedernal rosa. No hay contenido fósil reportado para esta unidad. Se estimó un espesor mínimo de 100 m.

Se le ha calculado que el espesor total de los tres miembros es de 400 m mínimo (Ortega-Guerrero, 1989; Ramos-Leal, 1989). Parte de estos depósitos pudieron haberse perdido por la acción de la erosión.

Relaciones estratigráficas y edad

Sobreyace por contacto tectónico (*detachment*) a la Formación Magdalena y está sobreyacida discordantemente por los depósitos cuaternarios. Se encuentra en contacto discordante y por falla normal con la Unidad Pozo Hondo.

De acuerdo a su contenido fósil se han establecido las siguientes edades para algunos de los miembros de la Caliza Coyotepec: A) Miembro Inferior: Albiano Tardío-Cenomaniano. B) Miembro Medio: Albiano-Cenomaniano (Ortega-Guerrero, 1989).

Ambiente de depósito

Basada en la presencia de bancos de rudistas en su Miembro Inferior, Ortega-Guerrero (1989) interpretó estos depósitos como bancos de arrecifes en una plataforma carbonatada.

2.1.3 CENOZOICO

Unidad Pozo Hondo

Definición

La Unidad Pozo Hondo fue propuesta informalmente por Ortega-Guerrero (1989) para nombrar a los conglomerados y areniscas que descansan discordantemente sobre los depósitos de la Caliza Coyotepec al noreste del área de estudio.

Distribución y localidad tipo

Se ubica entre los poblados de San Vicente Coyotepec, Santa Catarina Tehuixtla y San Martín Atexcal. Es posible acceder a sus afloramientos por las terracerías entre estos poblados y sus cañadas aledañas. No existe una localidad tipo propuesta para estos depósitos.

Descripción litológica, espesor y registro fósil

La Unidad Pozo Hondo está compuesta de conglomerados con clastos de cuarzo, pedernal, arenisca rojiza, caliza micrítica y caliza biomicrítica con miliólidos. El diámetro de los clastos varía de 30 a 0.2 cm que van de subangulares a subredondeados. La matriz es de arcilla y arena. Las areniscas de esta unidad son conglomeráticas de coloración verdosa y rosácea, cuyos clastos son de cuarzo, esquisto y arenisca rojiza. El espesor total se ha estimado en 600 m (Ortega-Guerrero, 1989). No existe registro fósil reportado en esta unidad.

Relaciones estratigráficas y edad

Sobreyace discordantemente a los depósitos de la Caliza Coyotepec. Ortega-Guerrero (1989) reportó además un contacto tectónico entre estas unidades por medio de una falla normal. El contacto superior se desconoce.

Debido a la falta de registro paleontológico no ha sido posible establecer la edad de esta unidad. Se ha considerado como un depósito formado posterior a los eventos tectónicos de deformación del Cretácico y principios del Cenozoico, por lo cual se le ha asignado una posible edad paleógena.

2.1.3.1 ROCAS Y SEDIMENTOS CENOZOICOS

En este apartado se hace una breve descripción de tres unidades rocosas que no han sido estudiadas a fondo en el área de estudio. 1) Sedimentos arenosos (ubicados en los alrededores del poblado de Santo Domingo Tianguistengo) y 2) Intrusivos de composición riolítica (ubicados en la cima del Cerro La Cuchara). En el Mapa Geológico sólo se diferenció entre las rocas ígneas y los sedimentos.

Sedimentos del Pleistoceno

Definición

Los sedimentos pleistocénicos son muy abundantes en la República Mexicana y albergan el registro fósil de grandes vertebrados, sin embargo una buena parte de estos depósitos permanecen sin

ser estudiados y reportados (Ferrusquía y Cruz, 2003). Los sedimentos cuaternarios en la región han sido objeto de poca atención en la geología (Ortega-Guerrero, 1989) y se han descrito simplemente como aluvión cuaternario. Ferrusquía y Cruz (2003) realizaron un estudio paleontológico de los depósitos cuaternarios en la región entre Tepexi y Coyotepec, Ahuatempan, Atexcal y de Santa Cruz. En 2005, Tovar-Liceaga realizó un estudio paleontológico a detalle de los sedimentos pleistocénicos de la región de Santa Cruz Nuevo, que tenía como objetivo analizar el cambio faunístico entre el Pleistoceno Tardío y el Reciente en la región, como complemento a su trabajo registró en una columna estratigráfica la sedimentología de estos depósitos.

Distribución y localidad tipo

Los depósitos cuaternarios se encuentran distribuidos entre los poblados de Santo Domingo Tianguistengo y Santa Cruz Nuevo, sobre el lecho del Río Magdalena y en las cercanías del poblado de Santo Tomás Otlaltepec. No existe una localidad tipo propuesta para estos sedimentos. En este trabajo se sugieren los depósitos estudiados por Tovar-Liceaga (2005) que corresponden a las cercanías de Santa Cruz Nuevo.

Descripción litológica, espesor y registro fósil

Esta unidad consiste en limos arenosos con estratificación incipiente y estratificación cruzada. Presenta mala clasificación y lentes de gravas de poca extensión con matriz de limo y arena, cuyas gravas corresponden a fragmentos subredondeados a subangulares de esquisto y cuarzo lechoso. Su espesor ha sido reportado entre 30 y 40 m (Ferrusquía y Cruz; 2003, Tovar-Liceaga, 2005). La fauna fósil encontrada en estos sedimentos comprende restos de anfibios, mamíferos, gasterópodos y bivalvos de agua dulce.

Relaciones estratigráficas y edad

Las relaciones de esta unidad son de tipo discordante, por ser la más joven de la región esta cubre a todas las otras unidades y no está afectada por fallas. Se encuentra en contacto con el Complejo

Acatlán, el Plutón Totoltepec, las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec. Su edad calculada por su contenido fósil se ha establecido como Pleistoceno.

Ambiente de depósito

Estos sedimentos se han interpretado como depósitos de tipo fluvio-lacustre, formados por efecto de subsidencia y por la formación de una barrera topográfica que retuvo las aguas en un valle. En los casi 40 m de espesor de esta formación se encuentra de manera uniforme fósiles por lo que se interpreta como un cuerpo de agua permanente.

Rocas intrusivas

Definición

Se reporta por primera vez en este trabajo una serie de domos e intrusivos de composición riolítica ubicados al norte de San Jerónimo Xayacatlán.

Descripción litológica

Los domos se componen de rocas ígneas de textura porfídica de composición riolítica. La relación de corte con las rocas circundantes es evidente, por lo que se considera que estas rocas corresponden a un intrusivo de edad cenozoica que probablemente represente la estructura de un cuello volcánico. En esta localidad pueden encontrarse varios cuerpos similares en forma de domos. Dichos cuerpos se encuentran intrusionando los depósitos jurásicos de la formación Piedra Hueca y sedimentos cuaternarios.

2.2 RASGOS ESTRUCTURALES MAYORES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Otlaltepec se caracteriza por la presencia de fallas normales desarrolladas en el basamento, que la delimitan por sus flancos N, S y W. Estas estructuras de carácter regional presentan un rumbo general de NE-SW y E-O que ponen en contacto la cubierta sedimentaria mesozoica con las rocas paleozoicas cristalinas de la región; dentro de la cuenca también se documentó la presencia de una falla normal NW-SE con características similares.

El Complejo Acatlán también presenta cabalgaduras y estructuras menores en sus afloramientos. Además, se observó un pliegue sinclinal hacia el norte que puede estar relacionado a una de las fallas normales que limitan la cuenca. Hacia el centro del área de estudio se reconoció un sistema de fallas laterales izquierdas que cortan al basamento y a las unidades basales del relleno sedimentario (véase Mapa Geológico anexo).

Finalmente, al norte del área de estudio se registró la presencia de una falla lateral izquierda con orientación preferencial NE-SW.

Con base en el trabajo de campo y la búsqueda bibliográfica, se identificaron en el área de estudio una serie de estructuras regionales (Fig. 2.11) que se describen brevemente y en orden cronológico a continuación:

- ▶ Cabalgaduras. Esta estructura geológica se encuentran al NE del área de estudio y desplaza al Plutón Totoltepec sobre el resto del Complejo Acatlán. Esta cabalgadura varía en orientación de $S10^{\circ}W-46^{\circ}$ en la barranca occidental paralela a la Barranca El Amate, pero en la terracería entre Santo Domingo Tianguistengo y El Limón puede observarse con una dirección $NS-28^{\circ}$. Kirsch *et al.*, (2012) infieren que durante el magmatismo que generó el Plutón Totoltepec una componente de movimiento fue transferida hacia el borde oriental del intrusivo, que provocó las cabalgaduras y la exhumación de cuerpo magmático. Esta se estima que ocurrió entre 287 y 283 Ma.
- ▶ Falla Tianguistengo. La Falla Tianguistengo se ubica al este del área de estudio y tiene un rumbo entre $N11^{\circ}W$ y $N28^{\circ}W$ y una longitud aproximada de 12 km. La falla se ha documentado como de tipo normal con el bloque de techo hacia el oeste y está dividida en dos segmentos desplazados a la altura de la Barranca Rincón El Coco. Al norte esta estructura pone en contacto afloramientos del Complejo Acatlán con depósitos de la formación Otlaltepec, los cuales presentan un pliegue sinclinal hacia el oeste de la falla que se asocia al movimiento de esta. El segmento sur corta al Complejo Acatlán y lo pone en contacto con el Plutón Totoltepec. Se le considera una falla normal de tijera que a su vez fue sinsedimentaria y activa durante el Jurásico, dicha condición se determinó al observar que los depósitos de las formaciones Tianguistengo y Otlaltepec cubren al bloque de techo y al bloque de piso en la Barranca Rincón El Coco y al norte del poblado se Santo Tomás Otlaltepec. Hacia el norte del área de estudio la falla se encuentra

completamente cubierta por depósitos jurásicos. Silva-Romo (2010) considera que es una falla normal asociada al desplazamiento lateral izquierdo de la Falla El Gavilán, por lo que se infiere que también tuvo actividad en el Eoceno Medio?-Tardío. Por estar sobreyacida por depósitos reciente en su sector sur, se considera que su actividad cesó previo al Cuaternario.

▶ Falla Totoltepec o Falla Matanza. Esta falla ha sido reportada en diversas ocasiones (Ortega-Gutiérrez, 1989; Silva-Romo, 2010; Kirsch, 2012). Se ubica al sur del área de estudio y pone en contacto las rocas intrusivas del Plutón Totoltepec con la formación Tianguistengo. Su rumbo principal es de N70°W y tiene una longitud aproximada de 13 km aproximadamente. Ha sido descrita como una falla normal (Kirsch, 2012) con bloque de techo hacia el norte y se encuentra cortada por el sistema de seis fallas laterales izquierdas que cruza el centro de la región. Hacia el oeste del área la falla se encuentra limitada por una falla posterior de orientación N-S. Se desconoce el período completo de actividad de esta falla, sin embargo, debido a que existen depósitos de la formación Otlaltepec en el bloque de piso (afloramiento en el poblado de Santo Domingo Tianguistengo) se considera que su actividad fue previa al depósito de esta formación y probablemente sea una falla asociada al depósito e inclinación de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec, por lo cual durante el Jurásico habría actuado como una falla inversa. Su actividad más antigua se ha estimado como Jurásico Inferior.

▶ Falla Ameyaltepec. Esta estructura no fue reportada anteriormente como una falla, sino como un límite discordante. Está constituida por varios segmentos que dan lugar a una traza irregular. Tiene aproximadamente 12 km de longitud y su orientación preferencial es hacia el N35°E. Los indicadores cinemáticos (estrías) indican que se trata de una falla normal con bloque de techo hacia el este. Su buzamiento aumenta su valor de sur a norte, pasando de 26° a 65°. La traza de esta falla fue establecida por medio de el análisis fotogeológico, por su posición con respecto a las formaciones jurásicas que rellenan parte de la cuenca Otlaltepec, se considera que está falla actuó como la falla lítrica que controló el relleno de dicha cuenca durante el Jurásico.

▶ Falla El Gavilán. Este rasgo estructural fue reportado por Ortega-Guerrero (1989) como una falla lateral izquierda con rumbo general N65°E, tiene una longitud aproximada de 30 km. Esta pone en contacto los depósitos de la formación Piedra Hueca ubicados al norte del área de estudio con el Complejo Acatlán, además de cortar a las formaciones Magdalena y Caliza Coyotepec. Silva-Romo (2010) en su tesis de doctorado reporta que la Falla El Gavilán disloca al

basamento de la región en sentido izquierdo al menos en 7 km y que su desplazamiento provocó al norte de área de estudio pliegues sinclinales (NW-SE) y anticlinales (NE-SW) en los depósitos mesozoicos de la región. Por medio de observaciones de campo se determinó que la falla estuvo activa previo a los depósitos de las unidades Magdalena y Caliza Coyotepec (Aptiano-Albiano) debido a que estas formaciones cubren al basamento dislocado por esta falla, sin embargo en la Barranca El Encino se observan a los depósitos cretácicos dislocados por la falla, por lo que se infiere que tuvo una reactivación en el Cretácico. Por otro lado, las unidades cenozoicas depositadas en la cuenca Tehuizingo-Tepexi, ubicada al norte del área de estudio, indican que la estructura tuvo un desplazamiento lateral izquierdo en el Eoceno Tardío y quizás experimentó una extensión norte-sur de poca intensidad en el Oligoceno (Silva-Romo, 2010).

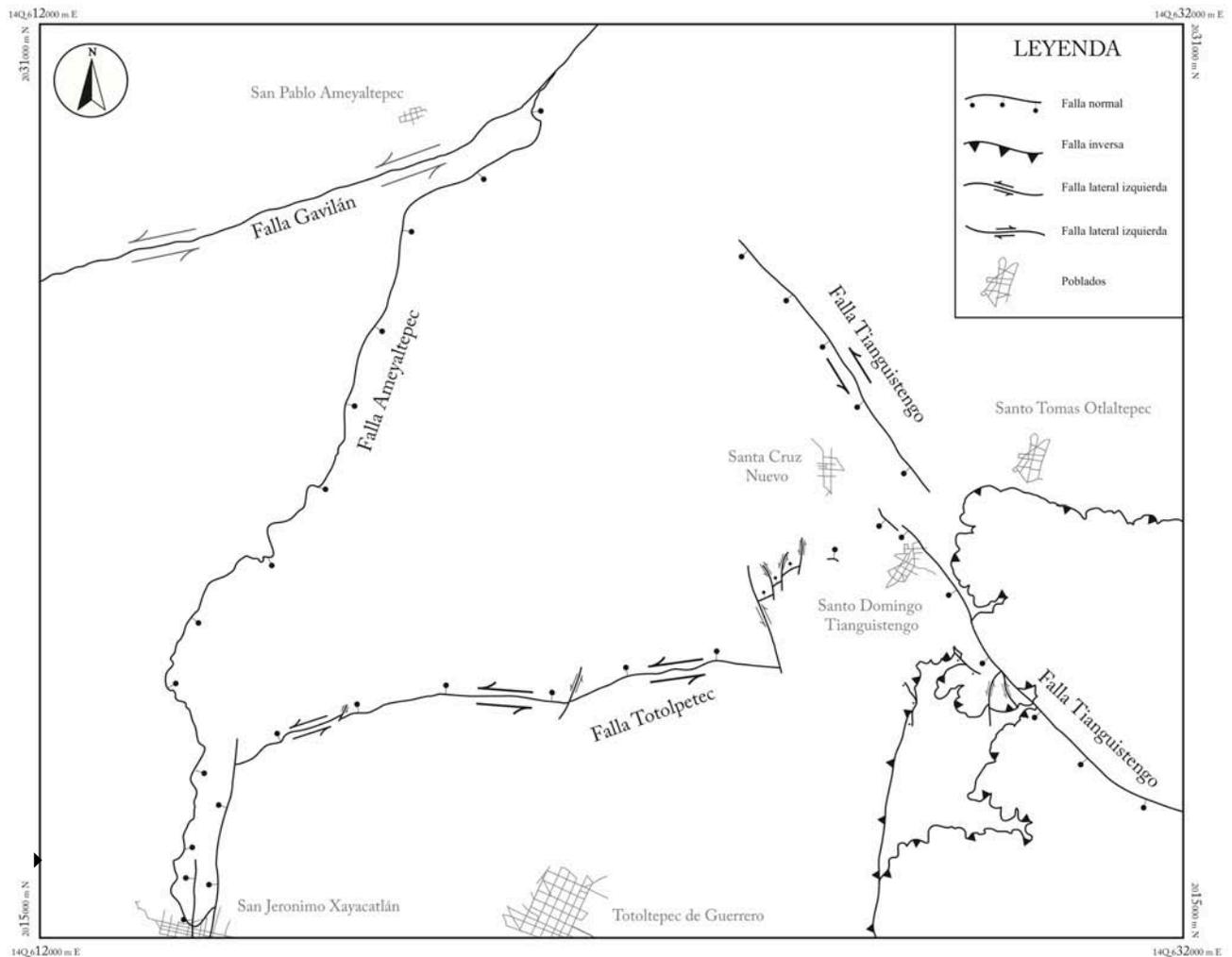


Fig. 2.11. Esquema estructural del área de estudio.

- ▶ Fallas menores. Hacia el sureste del área de estudio se registró la existencia de fallas de pequeñas dimensiones, de tipo lateral izquierda (N10°E y N10°W) y normal (N50°W) en el Plutón Totoltepec y el Complejo Acatlán, observadas en las cercanías de la Barranca El Amate. Esta falla desplaza a la Falla Tianguistengo entre el complejo metamórfico y el intrusivo. Por otro lado, hacia el suroeste del área de estudio Morales-Gómez *et al.*, (2008) estableció la presencia de fallas laterales derechas con orientaciones (N-S) dentro del Complejo Acatlán.
- ▶ Sistema de fallas laterales. Hacia el centro del área de estudio sobre el lecho del Río Magdalena se observa un sistema de fallas laterales izquierdas con una orientación preferencial N-S y NW-SE que cortan al Plutón Totoltepec y a las tres sucesiones sedimentarias clásticas reportadas en este estudio.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El método de investigación para elaborar este trabajo puede dividirse en tres partes fundamentales: trabajo de campo, análisis de laboratorio y trabajo de gabinete. A continuación se describen cronológicamente las etapas de desarrollo de esta tesis.

3.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de los trabajos geológicos y paleontológicos realizados en la región y de la información geográfica disponible. La recopilación de esta información puede consultarse en los Capítulos 1 y 2 de este trabajo.

3.2 TRABAJO DE CAMPO

Se elaboró un mapa geológico preliminar a partir de fotografías aéreas a escala 1:50,000 con la finalidad de distinguir unidades litológicas con base en su relieve, patrón de drenaje y coloración, para lo cual se utilizó la base cartográfica vectorial de INEGI con el Datum ITRF92 en coordenadas UTM y geográficas. Este mapa fotogeológico se utilizó como base para el diseño de transectos para el levantamiento de secciones geológicas, las cuales se procuró que intersectaran la mayor cantidad de discontinuidades tectónicas y contactos haciendo especial énfasis en las zonas donde afloraba la sucesión sedimentaria de interés. En términos generales el trabajo de campo consistió en la elaboración del mapa geológico escala 1:50,000, la descripción detallada de afloramientos con los cuales se reconocieron las distintas unidades geológicas, sus contactos y las estructuras geológicas mayores de la región.

Durante el trabajo de campo se llevó a cabo la toma de sesenta muestras: treinta y nueve para análisis petrográficos, cuatro para estudios paleontológicos y dos para análisis geocronológicos de circones detríticos. Se levantaron cinco columnas estratigráficas detalladas en afloramientos, utilizando el Báculo de Jacob y la metodología propuesta por Tucker (2003) y Silva-Romo y Mendoza-Rosales

(2011). La suma de los espesores totales de la columnas es de 590 m. Las columnas estratigráficas levantadas fueron digitalizadas y resumidas para su presentación en este texto. Durante el levantamiento estratigráfico se identificaron facies y asociaciones de facies para determinar el ambiente sedimentario de la formación Tianguistengo.

3.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Las treinta y cuatro muestras colectadas fueron enviadas al Taller de Laminación del Instituto de Geología de la UNAM y el análisis petrográfico de las láminas delgadas resultantes se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopios Francisco J. Fabregat de la misma institución. Se utilizó un microscopio polarizado marca Leica DM4500 P. Con estos estudios se identificó la textura, componentes mineralógicos y/o fosilíferos principales de las muestras. Las descripciones pueden encontrarse en el Capítulo 4 referente a facies sedimentarias y petrología. Se utilizó la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn *et al.* (1972) para las rocas clásticas. Los carbonatos fueron descritos de acuerdo a las clasificaciones de Dunham y Flügel (2004).

En el análisis de microfacies se identificó contenido fósil (ostrácodos) cuyo estudio fue realizado Dr. Lizeth Pérez Alvarado del Instituto de Geología de la UNAM y del Dr. Benjamín Sames de la Universidad de Wien en Austria.

3.4 FECHAMIENTO DE CIRCONES DETRÍTICOS

Con el análisis petrográfico se ubicaron aquellas muestras que contienen circones detríticos, minerales útiles para definir la procedencia y edad máxima de sedimentación de rocas sedimentarias. En el Taller de Molienda del Instituto de Geología se utilizó la metodología estándar (Morton, 1985) para la obtención de circones detríticos en dos muestras, la cual consiste en:

- *Trituración.* Este procedimiento inició con la limpieza exhaustiva del Taller de Molienda para evitar la contaminación de las muestras. Se limpiaron las zonas donde se llevó a cabo la manipulación de los materiales, así como la maquinaria, las herramientas y utensilios que estuvieron en contacto con las muestras, esto se realizó con agua destilada y acetona. Esta limpieza rigurosa se realizó entre la molienda de cada una de las muestras. Una vez limpia el área se procedió a triturar la muestra con la

prensa hasta dejarla con un tamaño de grano de arena fina y fue colocada en bolsas previamente etiquetadas. Al finalizar el uso del equipo, este se aseó nuevo para dejarlo listo para el siguiente usuario.

- *Cribado*. El material previamente triturado se sometió a un proceso de tamizado para separar la muestra en diferentes tamaños de partículas, se usaron las mallas de número 80 y 100. La limpieza de las mallas se realizó con aire comprimido, un baño ultrasónico, acetona y aguja para evitar contaminación. Se utilizó una máquina vibradora RO-TAP. El equipo fue aseado entre muestra y muestra. El material separado por tamaños se dispuso en bolsas etiquetadas.
- *Mesa Concentradora*. Este equipo consiste en una mesa vibradora que utiliza un flujo de agua laminar para separar minerales de diferente densidad. Esta mesa puede descartar hasta un 85% de la muestra total, el cual corresponde a minerales ligeros (Morton, 1985). Fueron procesadas en este equipo las fracciones granulométricas $< 100 \mu\text{m}$ y $< 80 \mu\text{m} > 100 \mu\text{m}$. El material resultante se etiquetó para ser utilizado en el siguiente proceso.
- *Separador Magnético Isodinámico*. Este equipo somete a los minerales a la acción de un campo magnético controlado por un amperímetro para concentrarlos en minerales magnéticos y no magnéticos, estos últimos a su vez pueden ser separados de acuerdo a su susceptibilidad magnética. Este separador fue utilizado en posición vertical (Handmag). En las muestras se separaron únicamente los minerales susceptibles al 0.2 amp para evitar la pérdida de minerales magnéticos de interés como la turmalina (Morton, 1985).
- *Separación por densidad con líquidos pesados*. Los minerales tienen una densidad específica que puede fluctuar en un rango muy pequeño, que puede ser aprovechada para separar los minerales, en este método se usan líquidos pesados de densidad conocida. Los concentrados de minerales de las fracciones granulométricas $< 100 \mu\text{m}$ y $< 80 \mu\text{m} > 100 \mu\text{m}$ se sumergieron en Bromoformo, lo que permitió separar las minerales de mayor densidad a 2.89 g/cm^3 , entre ellos el circón.
- *Separación manual*. Finalmente del concentrado de minerales se separaron los circones con ayuda de un microscopio estereoscópico Olympus ZD31, se describió su morfología y coloración, se reconocieron las distintas poblaciones. Posteriormente, se montaron en resina epóxica y fueron pulidos con abrasivo de diamante en suspensión para su posterior análisis.

En los circones seleccionados y montados se realizaron análisis de catodoluminiscencia con un luminoscopio ELM3R montado sobre un microscopio binocular conectado con una cámara digital. De acuerdo con la información obtenida por las fotografías de catodoluminiscencia se seleccionaron 100

circones por muestra (200 en total). Análisis de U-Pb fueron realizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM utilizando el método de ablación láser y espectrometría de masas de plasma inducido acoplado (Laser ablation-muticollector inductively coupled plasma mass spectrometry) bajo el procedimiento descrito en Solari *et al.* (2010), la información técnica puede encontrarse en http://www.geociencias.unam.mx/~solari/index_files/LEI/LA-ICPMS.html. La reducción de datos fue realizada con la metodología descrita en Solari y Tanner (2012). La ubicación estratigráfica de las muestras de circones puede observarse en las Columnas I y V. Los resultados pueden encontrarse en el Capítulo 6 y el Apéndice II.

3.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se colectaron 585 datos de rumbo y buzamiento de las unidades Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec para establecer un modelo de sedimentación sintectónica. Dichos datos fueron ingresados en el software OSX Stereonet Versión 2.1, a fin de realizar inferencias acerca de la tectónica imperante en la región durante el depósito de las formaciones sedimentarias. Asimismo se colectaron datos de fallas sinsedimentarias identificadas en la formación Tianguistengo y fueron rotadas a la paleohorizontal para definir el campo de esfuerzos asociado a su depósito.

3.5 TRABAJO DE GABINETE

Finalmente, toda la información obtenida en el trabajo de campo y laboratorio se procesó para la redacción de los resultados y conclusiones en los Capítulos 7 y 8 de este trabajo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE FACIES, DE MICROFACIES Y PETROGRÁFICO

4.1 FACIES DE LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

Con el objetivo de caracterizar a la formación Tianguistengo se realizó un registro detallado de sus estructuras sedimentarias y contenido fósil. Se midieron cinco columnas estratigráficas (Tabla 4.1) (Figs. 4.1-4.6). La numeración de las columnas va de acuerdo a su posición geográfica de Este a Oeste (véase Mapa Geológico anexo). La simbología utilizada se encuentra en la Fig. 4.1. La selección de las zonas de medición se realizó de acuerdo a la calidad y continuidad de los afloramientos. Con la intención de registrar los contactos de la formación Tianguistengo con unidades adyacentes y resaltar sus diferencias sedimentológicas, en las columnas estratigráficas I, II y III, se midieron algunos metros de las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec.

Como resultado del trabajo de campo se identificaron once facies sedimentarias en la formación Tianguistengo, diez de ellas basadas en la clasificación de Miall (2006), y una microfacies basada en la descripción de microfacies lacustres de presentada por Flügel (2004) y la clasificación de Dunham. De acuerdo a la interpretación de facies fluviales presentada en Miall (2006) en este trabajo se presenta una adaptación que incluye seis asociaciones de facies.

| NOMBRE | LOCALIDAD | LONGITUD (M) |
|-------------------------|--|--------------|
| Columna I Santo Domingo | Santo Domingo Tianguistengo, lecho Río Magdalena | 172 |
| Columna II Magdalena | Cerro la Matanza, lecho Río Magdalena | 192 |
| Columna III Cazahuate | Barranca Cazahuate | 120 |
| Columna IV Tedigno | Barranca Tedigno | 36 |
| Columna V Alegría | Ranchería La Huertilla | 60 |

Tabla 4.1. Listado de columnas estratigráficas medidas en este trabajo.

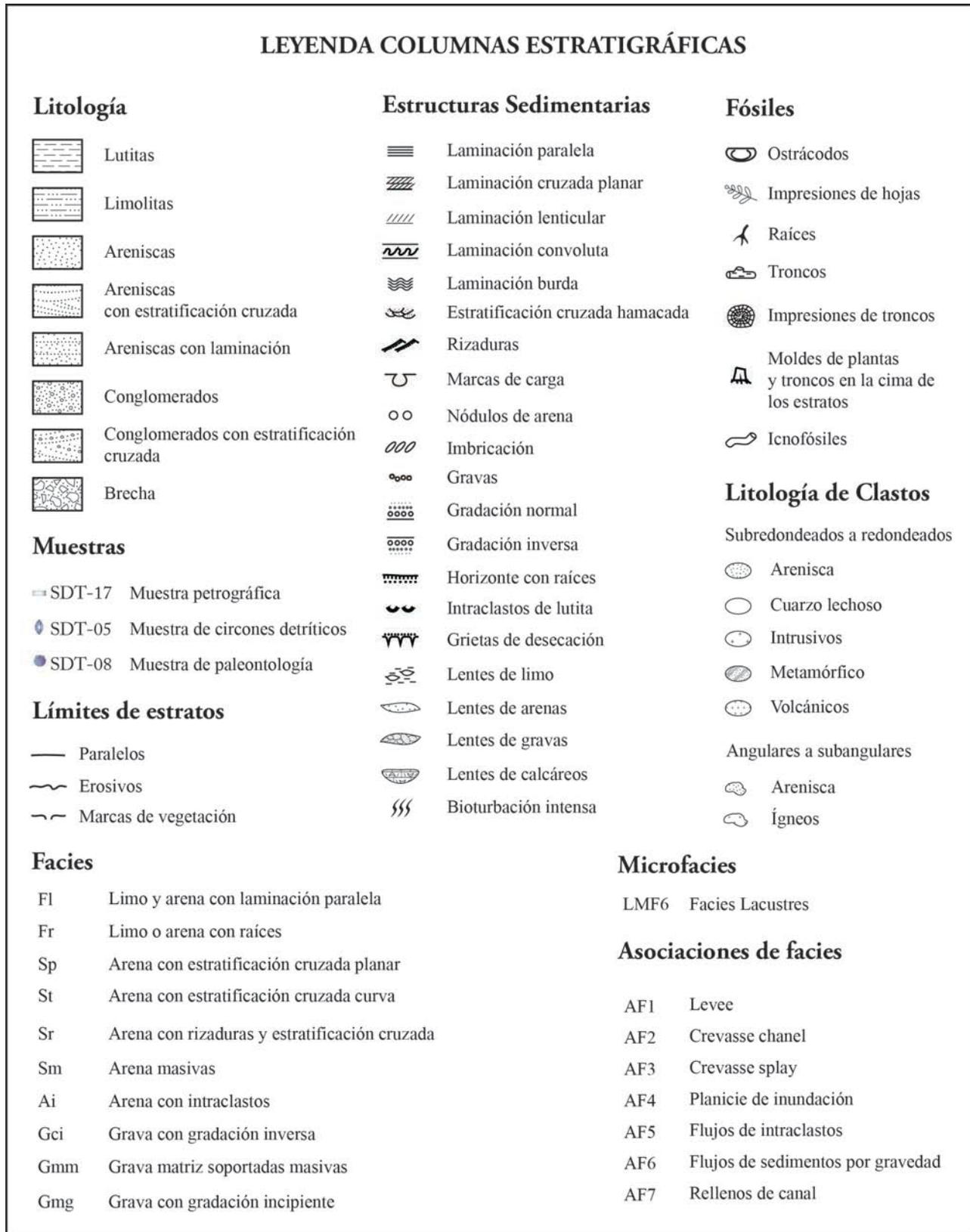


Fig. 4.1. Simbología utilizada en las columnas estratigráficas.

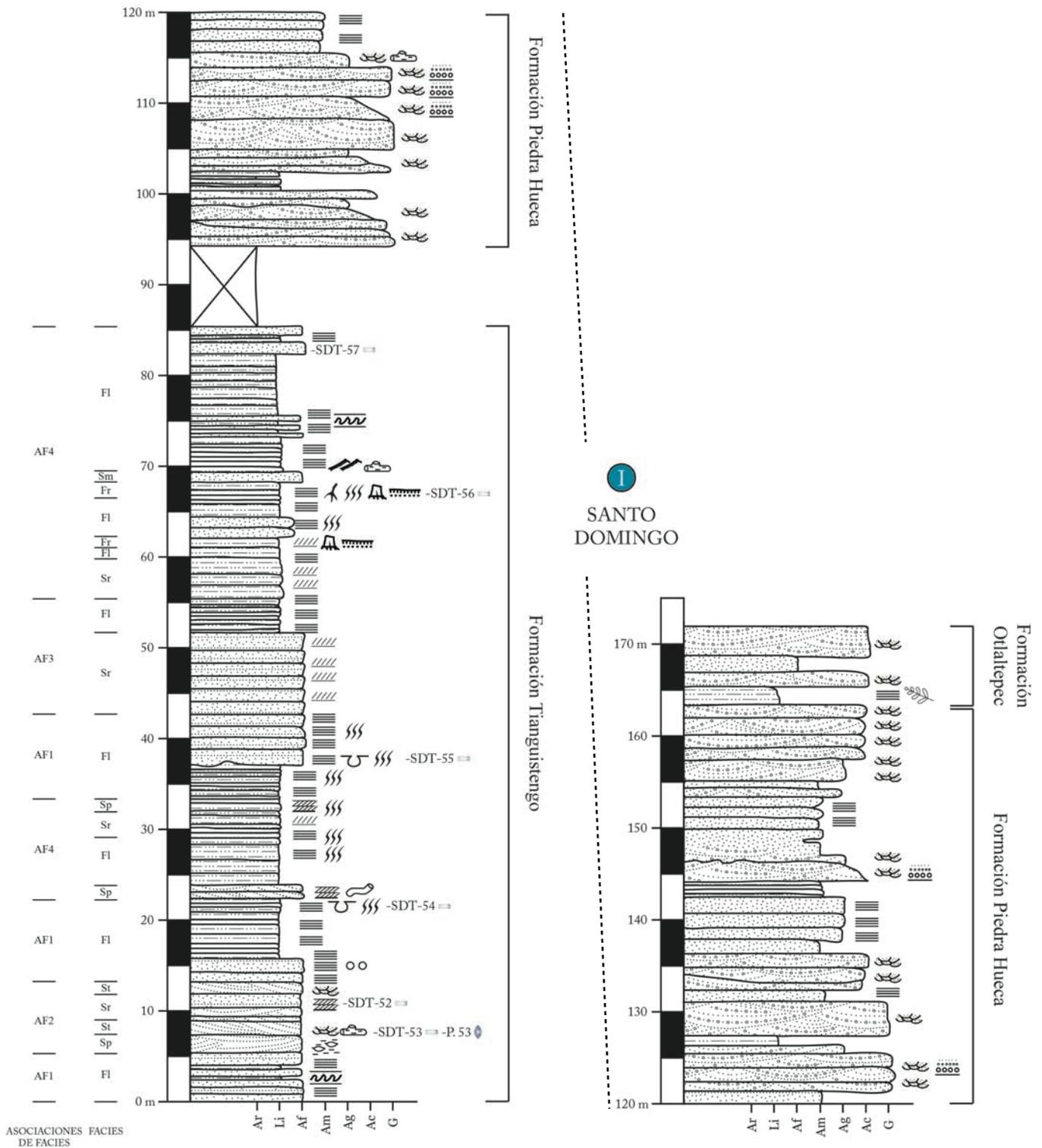


Fig. 4.2. Columna I Santo Domingo, medida sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del poblado de Santo Domingo Tanguistengo, hacia la cima de la columna se observa el contacto con los depósitos de la formación Piedra Hueca.

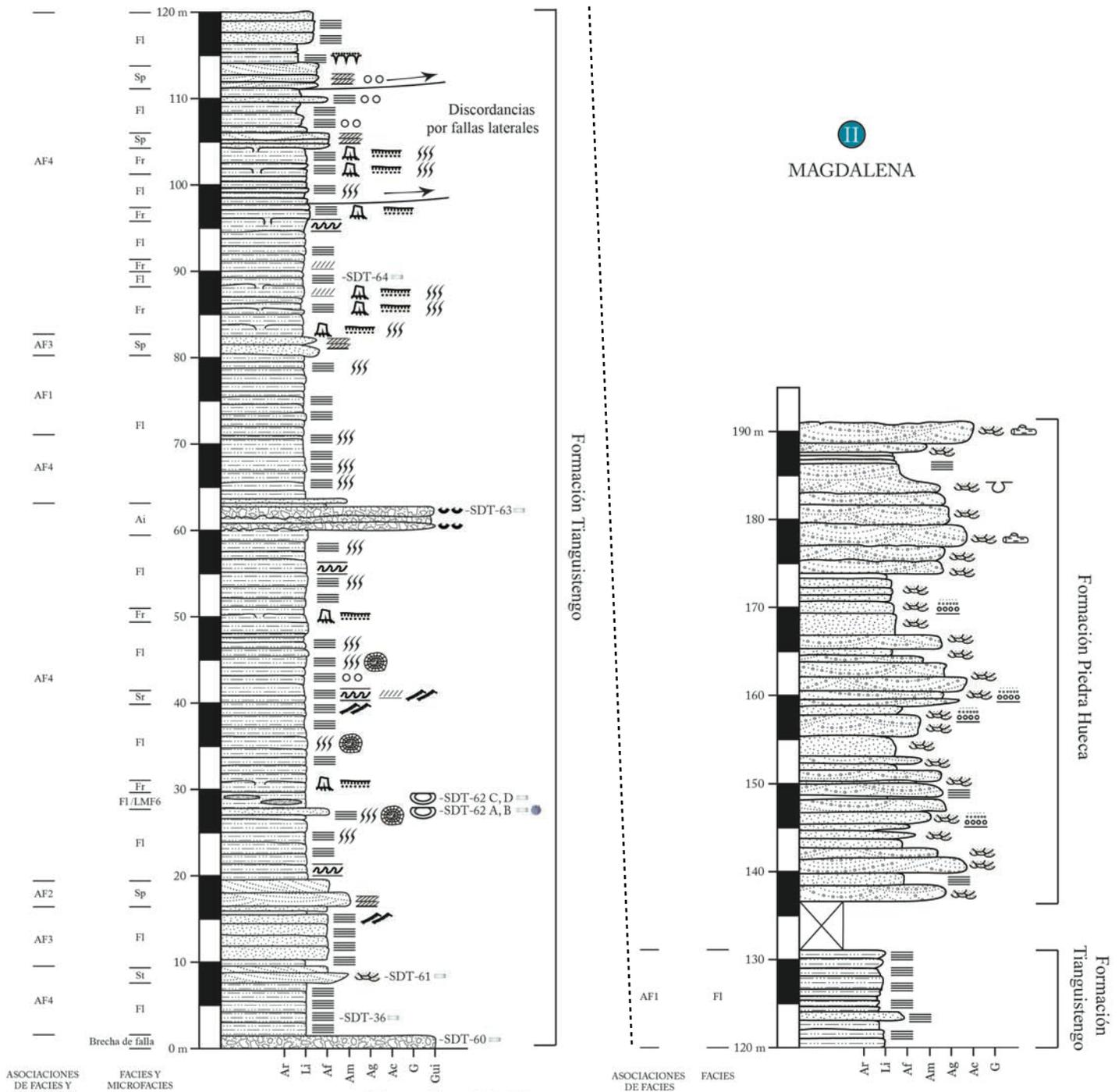


Fig. 4.3. Columna II Magdalena medida sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del Cerro La Matanza. El límite inferior de la columna es la Falla Totoltepec, hacia la cima de la columna se observa el contacto con los depósitos de la formación Piedra Hueca.

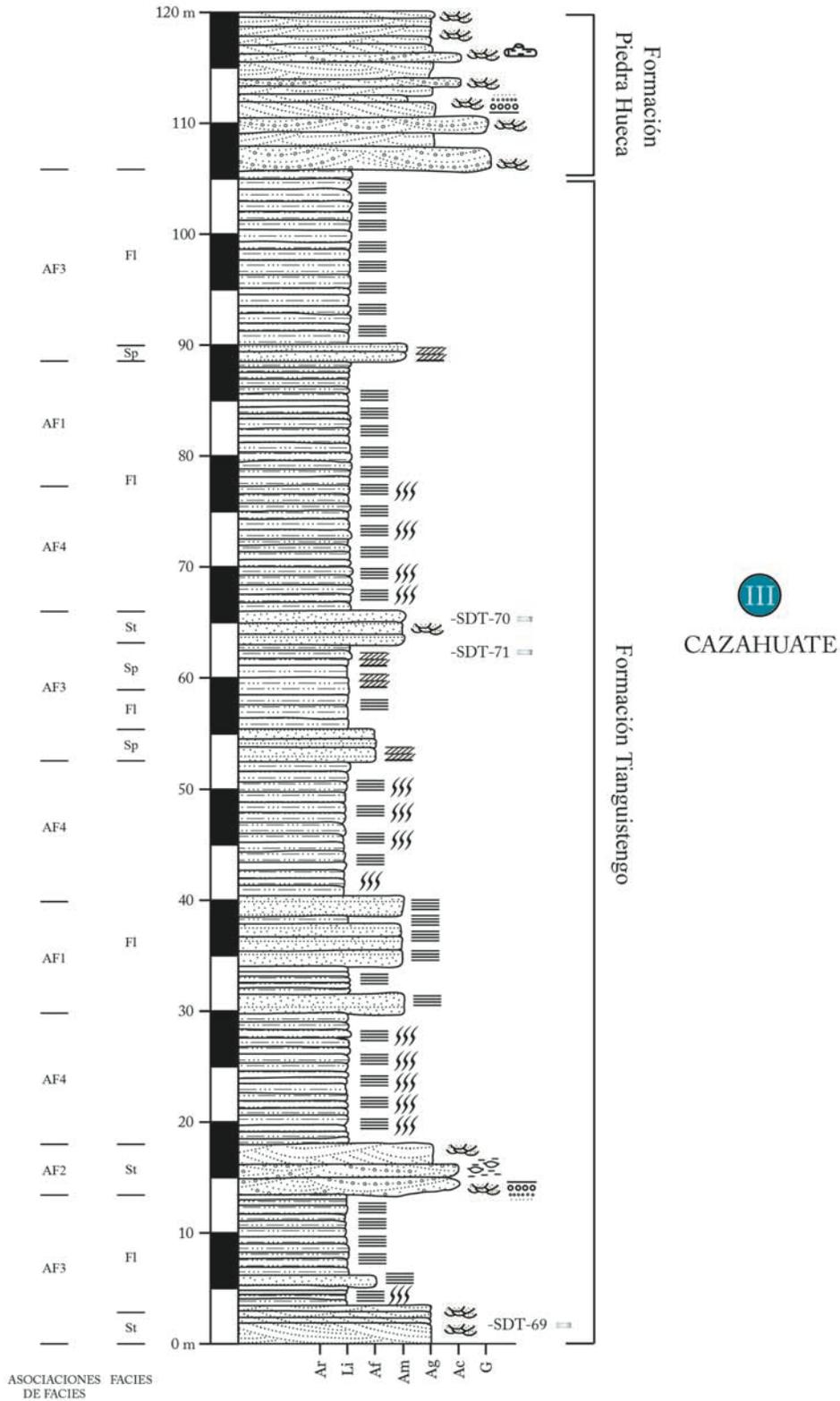


Fig. 4.4. Columna III Cazahuate medida en la barranca del mismo nombre. El límite inferior de la columna es la Falla Totoltepec. Hacia la cima puede observarse el contacto con los depósitos de la formación Piedra Hueca.

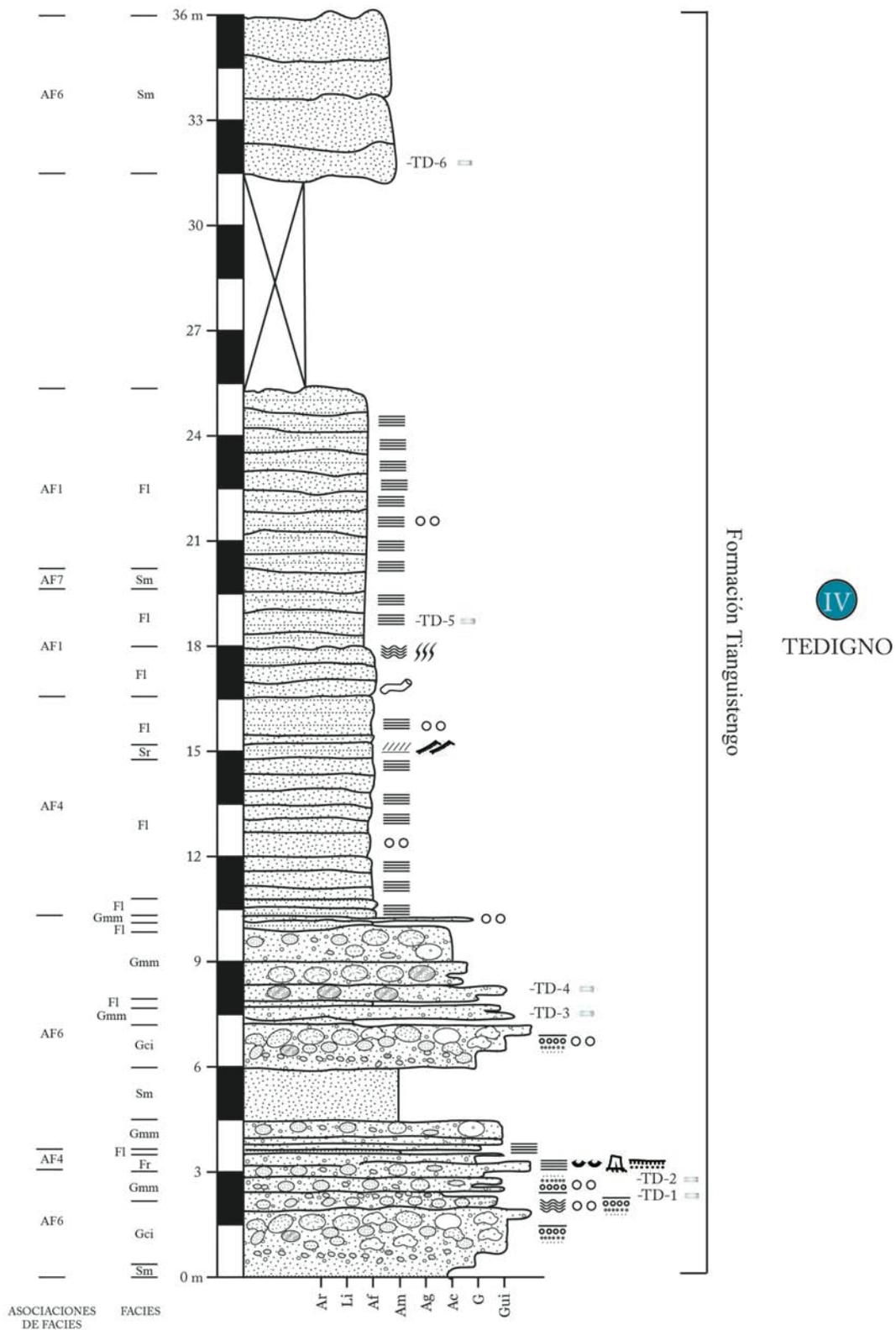


Fig. 4.5. Columna IV Tedigno medida en las cercanías de la Barranca Tedigno.

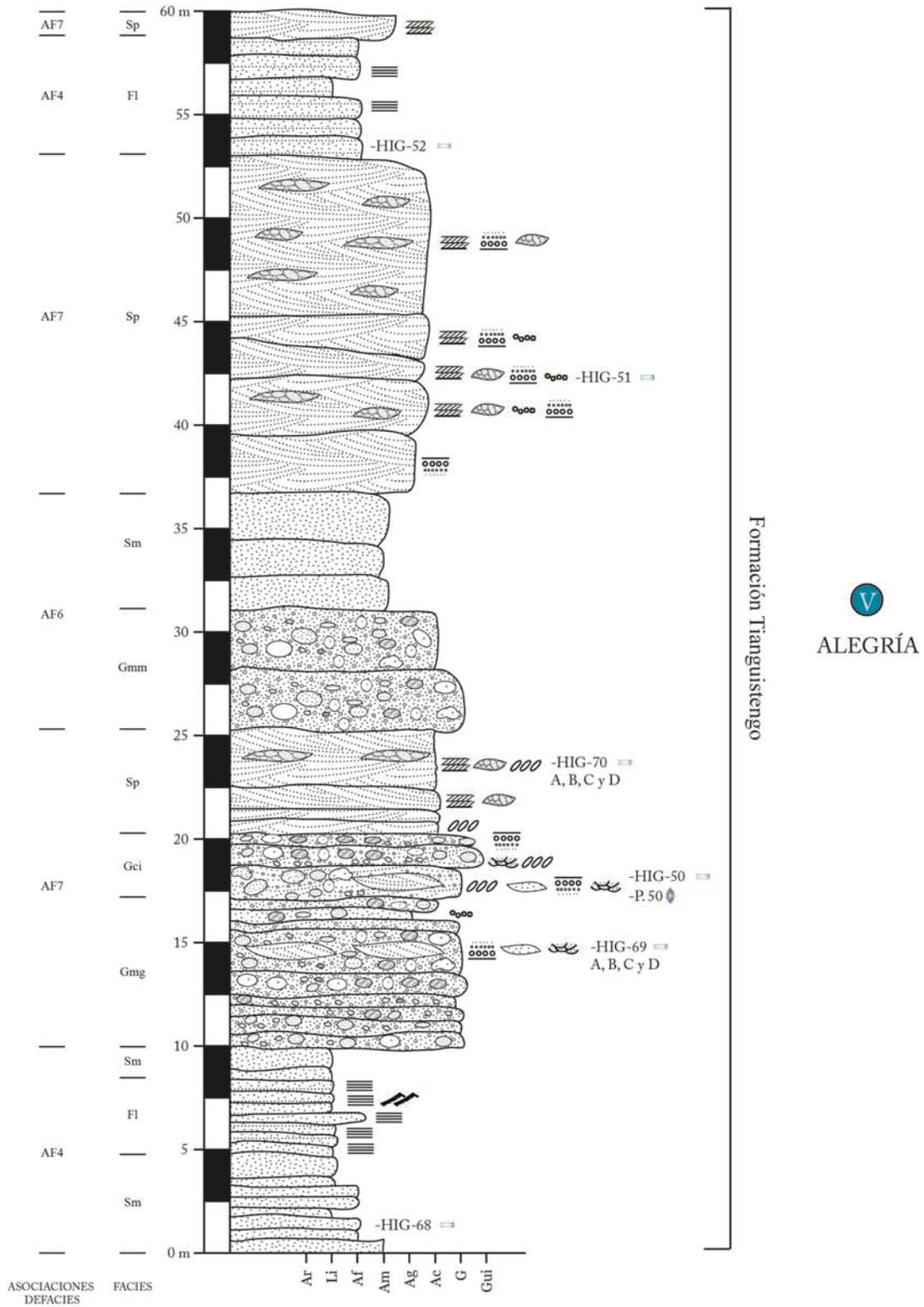


Fig. 4.6. Columna V Alegría medida en las cercanías del poblado La Huertilla, en las faldas del Cerro Alegría. El límite inferior de la columna es la Falla Totoltepec.

La medición total de las columnas estratigráficas fue de 580 m, de los cuales 420 m corresponden a la formación Tianguistengo. El mayor espesor registrado en este trabajo para dicha unidad fue de 132 m (Columna III Magdalena).

En la Columna I Santo Domingo se midieron 86 m de la formación Tianguistengo, donde se reconocieron las facies Fl, Fr, Sp, St, Sr y Sm (código y clasificación de Miall, 2006). El tipo de contacto y la unidad subyacente en esta columna se desconoce pues se encuentra cubierto por depósitos recientes, aunque por el trabajo de cartografía se infiere que se trata del Plutón Totoltepec. El contacto superior es discordante con los conglomerados de la formación Piedra Hueca de acuerdo con las mediciones de rumbo y echado de ambas unidades (Fig. 4.2).

En la Columna II Magdalena se midieron 132 m de la formación Tianguistengo y se registraron seis facies clásticas sedimentarias y una microfacies: Fl, Fr, Sp, St y Sr (código y clasificación de Miall, 2006), una facies de intraclastos Bi y una microfacies de carbonatos con ostrácodos, cuya nomenclatura se definió como LMF6 (código presentado por Flügel, 2004). El contacto inferior es tectónico con el Plutón Totoltepec (Falla Totoltepec) y se registró en la base de la columna un par de metros de brecha de falla asociada a este contacto. El contacto superior se considera como una discordancia con la formación Piedra Hueca. En los niveles 98 m y 101 m de esta columna se encontraron un par de pequeñas fallas sinsedimentarias que cortan la sección (Fig. 4.3).

En la Columna III Cahuatl se midieron 106 m de esta unidad Tianguistengo, donde se llevó a cabo el registro de las facies Fl, Sp y St (código y clasificación de Miall, 2006). El contacto inferior de la columna es tectónico con el Plutón Totoltepec. El contacto superior es discordante con la formación Piedra Hueca (Fig. 4.4).

La Columna IV Tedigno mide 36 m donde se registraron las facies Fl, Fr, Sr, Sm, Gci y Gmm. No se registraron los contactos inferior y superior, pero por el trabajo de campo se determinó que se trata de las mismas unidades registradas en las columnas anteriores (Fig. 4.5).

La Columna V Alegría mide 60 m y se reconocieron las facies Fl, Sp, Sm, Gci, Gmm y Gmg. Al igual que en la columna anterior, no se llevó a cabo el registro en la columna de los contactos inferior y superior de la unidad Tianguistengo, pero de acuerdo a las observaciones de campo las unidades en contacto son el Plutón Totoltepec y la formación Piedra Hueca (Fig. 4.6).

4.1.1 FACIES DE LIMO Y ARENA CON LAMINACIÓN PARALELA (FL)

Consiste en limolita y arenisca de grano fino de coloración rojiza y verdosa en estratos continuos y paralelos con límites rectos y en ocasiones sinuosos. El espesor de los estratos de arenisca varía de 0.05 a 1.2 m. Las estructuras sedimentarias predominantes son laminación paralela, laminación convoluta (Fig. 4.7 A); grietas de desecación y rizaduras en la cima de los estratos (Fig. 4.7, B y C) y marcas de carga hacia la base. En ocasiones se encuentran una incipiente gradación normal y nódulos de arena. Estas rocas pueden presentar una intensa bioturbación que afecta las estructuras sedimentarias causando una pérdida parcial de las mismas, que es especialmente frecuente en la base de los estratos (Fig. 4.7 D); pueden encontrarse impresiones de madera.

4.1.2 FACIES DE LIMO Y ARENA CON RAÍCES (FR)

La facies Fr se compone por sedimento del tamaño de arena fina y en ocasiones de limo, se presenta en estratos que van de 7 a 40 cm de espesor, su coloración general es de rojiza a verdosa; esta facies presenta evidencias de crecimiento de vegetación, tales como impresiones de raíces en posición de crecimiento (Fig. 4.8, A y B) y moldes de troncos en la cima de los estratos de diversos tamaños (Fig. 4.8, C y D), que van desde 0.2 hasta 8 cm de diámetro y que parecen corresponder a las marcas de troncos en posición de crecimiento. Las estructuras sedimentarias como laminación paralela y lenticular, se encuentran difusas y parecen haber sido perturbadas por crecimiento de vegetación e intensa bioturbación. Pueden encontrarse nódulos de arena e intraclastos de lutita.

4.1.3 FACIES DE LIMO Y ARENA CON ESTRATIFICACIÓN CRUZADA PLANAR (SP)

La facies Sp se compone de arena muy fina a media en estratos de 0.2 a 1 m de espesor con límites planares. Puede ser de color rojizo o castaño claro. La facies presenta estratificación cruzada planar (Fig. 4.9 A), laminación flaser, nódulos de arena de 1 a 2 cm, intraclastos rojizos de sedimento más fino (limos o arcillas), moldes de los intraclastos, (Fig. 4.9 B) y en ocasiones, troncos bien preservados (Fig. 4.9 C). En la cima de los estratos puede encontrarse bioturbación y galerías de organismos (Fig. 4.9, D y E). Hacia la región occidental del área de estudio, esta facies presenta un incremento en el tamaño de grano (arena de grano medio) y lentes de gravas con gradación normal

(Fig. 4.9 F).

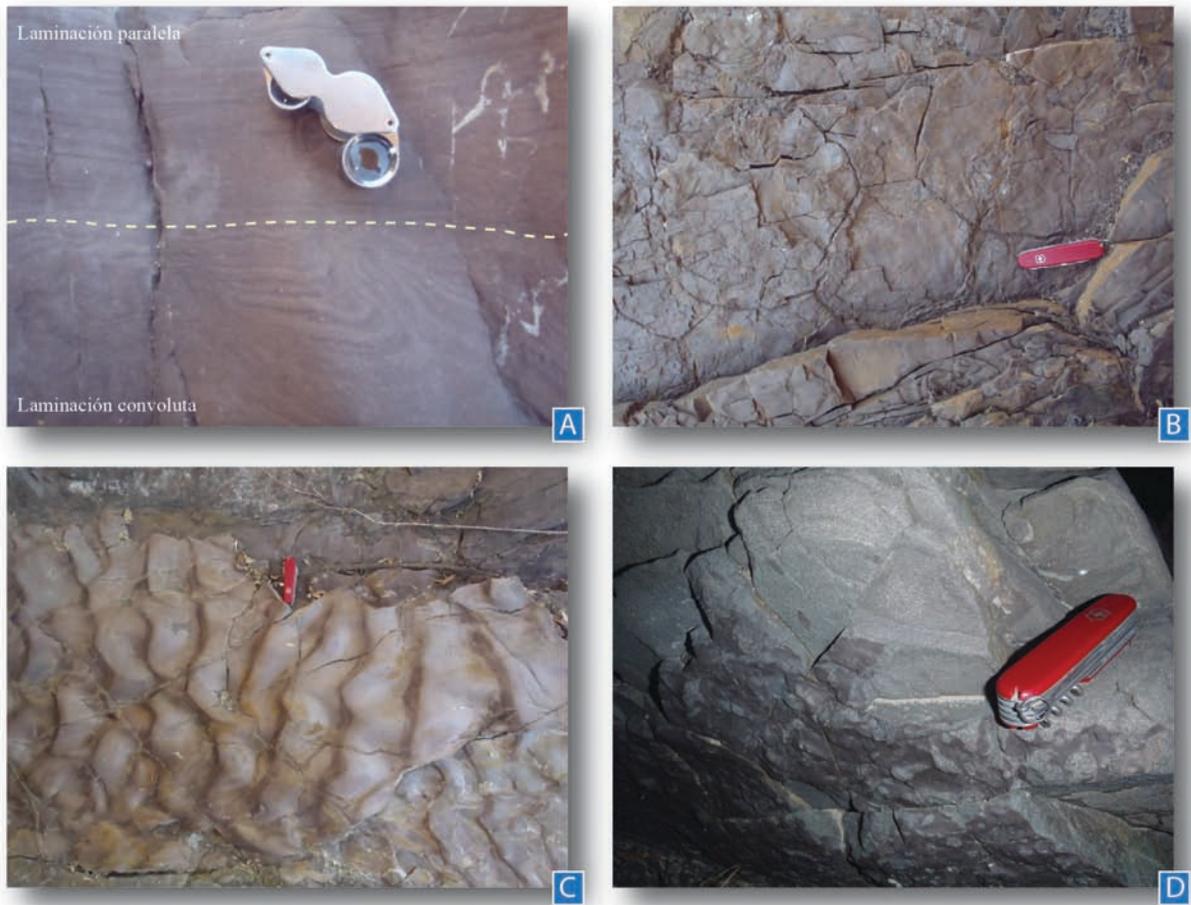


Fig. 4.7. Características sedimentológicas de la facies Fl. A) Laminación convoluta cubierta por laminación paralela. Corresponde al nivel estratigráfico 3 m de la Columna I. B) Grietas de desecación hexagonales en la cima de los estratos y C) Marcas de corriente simétricas onduladas en la cima de los estratos sobre el lecho de la Barranca Tedigno. D) Intensa bioturbación en la base de los estratos; la intensa actividad orgánica afectó las estructuras primarias y sólo quedan algunos relictos de las mismas. Corresponde al nivel estratigráfico 22 m de la Columna I. Dimensiones de la lupa y navaja 4 cm y 9 cm respectivamente.



Fig. 4.8. Evidencias de crecimiento de vegetación en la facies Fr. A y B) Impresiones de raíces en posición de crecimiento. C) Orificios en la cima de los estratos que coinciden con las raíces en posición de crecimiento. Imágenes que corresponden del nivel estratigráfico 67 m de la Columna I. D) Molde de tronco en cima de un estrato, correspondiente al nivel estratigráfico 97 m de la Columna II. Dimensión de la navaja 9 cm.

4.1.4 FACIES DE ARENA CON ESTRATIFICACIÓN CRUZADA CURVA (ST)

Esta facies se encuentra como estratos de 1 m de espesor, paralelos, ocasionalmente con rizaduras en la cima. Su granulometría varía de arena conglomerática a arena media. Su coloración principal es castaño claro. Presenta estratificación cruzada curva, lentes de arenas más finas, gradación inversa y fragmentos de troncos (Fig. 4.10). Hacia oeste del área de estudio puede presentar algunos clastos de granito y muestra un incremento en el tamaño de grano, así como lentes de conglomerado.



Fig. 4.9. Características sedimentológicas de la facies Sp. A) Estratificación cruzada planar. Corresponde al nivel estratigráfico 31 m de la Columna I. Dimensión de la navaja 9 cm. B) Intraclastos de lutita en sedimentos arenosos de la facies Sp. Afloramiento sobre el lecho del Río Magdalena. Dimensión de la lupa 3 cm. C) Molde de fragmento de madera preservado en los sedimentos, diámetro 0.5 cm, en su superficie se observa la textura de la corteza. Corresponde al nivel estratigráfico 7 m de la Columna I. Dimensión de la lupa 4 cm. D) Bioturbación en la cima de los estratos, se encuentra en el nivel estratigráfico 32 m de la Columna I. Dimensión del lápiz 8 cm. E) Galería de alimentación de

organismo en la cima de los estratos. Afloramiento sobre el lecho del Río Magdalena. Dimensión de la brújula 9 cm. F) Se observa la estratificación cruzada planar de bajo ángulo y los lentes de gravas con gradación. Corresponde al nivel estratigráfico 23 m de la Columna V. Dimensión del martillo 41 cm.



Fig. 4.10. Estratificación cruzada curva. Afloramiento en las faldas del cerro Alegría al occidente del área de estudio.

4.1.5 FACIES DE ARENA CON RIZADURAS Y ESTRATIFICACIÓN CRUZADA (SR)

La facies Sr se compone de arena de grano medio a fino y presenta rizaduras simétricas y asimétricas en la cima de los estratos. Los estratos de esta facies tienen de 20 a 50 cm de espesor y son paralelos. La coloración de estas rocas es rojiza o castaña. Además de las rizaduras puede encontrarse laminación paralela discontinua y lenticular (Fig. 4.11).



Fig. 4.11. Características sedimentológicas de las facies Sr. A) Rizaduras asimétricas onduladas con bifurcaciones. B) Rizaduras simétricas onduladas. C) Laminación lenticular. Afloramientos sobre el lecho del Río Magdalena. D) Laminación ondulada indicando la formación de rizaduras simétricas en la cima del estrato, afloramiento sobre el lecho de la Barranca Tedigno. Dimensión de las escalas: 13, 41, 4 y 9 cm respectivamente.

4.1.6 FACIES DE ARENA MASIVA (SM)

La facies Sm está representada por areniscas de coloración rojiza y verdosa de grano medio que forman depósitos masivos, cuyo espesor varía de 0.4 a 1 m. Pueden encontrarse icnofósiles de 15 cm de largo por 2 cm de ancho del tipo Scoyenia (Fig. 4.12 A).

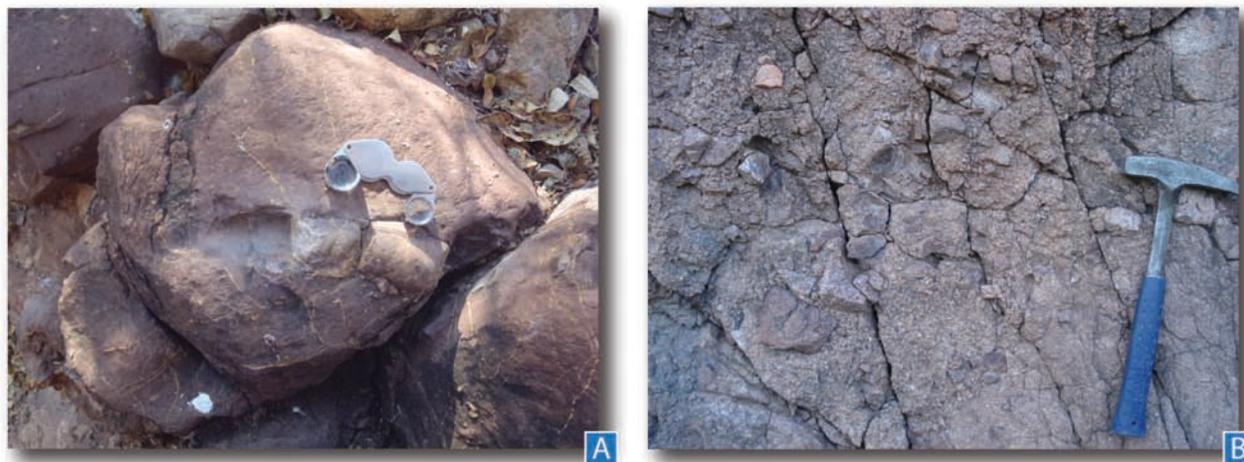


Fig. 4.12. Características sedimentológicas de las facies Sm y Gmm. A) Icnofósil encontrado en las areniscas de la facies Sm. Afloramiento en las inmediaciones del Cerro La Matanza. Tamaño de la lupa 4 cm. B) Conglomerado matriz soportado, los clastos en esta región (Barranca Tedigno) son de mayor tamaño y menor redondez con respecto a otras zonas que muestran la facies Gmm. Afloramiento perteneciente al nivel estratigráfico 12 m de la Columna IV. Tamaño del martillo 40.5 cm.

4.1.7 FACIES DE GRAVAS MATRIZ SOPORTADAS MASIVAS (GMM)

La facies Gmm está constituida por conglomerado polimíctico masivos, matriz soportado, con matriz de arenas gruesas a muy gruesas conformada principalmente de cuarzo y feldespato. El porcentaje de matriz promedio es de 50%. Las gravas constan de clastos de granito de coloración crema que van de subangulares a angulares, de 8 a 15 cm en su eje más largo; fragmentos de esquistos verdosos, subredondeados de 2 a 5 cm; clastos de arenisca rojiza y verdosa, subangular a angular de máximo 35 cm; fragmentos volcánicos de composición intermedia de 1 a 5 cm de tamaño, subredondeados; y cuarzo lechoso subangular de máximo 3 cm. La falta organización interna en esta facies es evidente. La coloración de los afloramientos es de castaño claro a oscuro. Presenta sílice como cementante (Fig. 4.12 B).

4.1.8 FACIES DE GRAVA CON GRADACIÓN INCIPIENTE (GMG)

Esta facies conglomerática está representada por conglomerado con gradación normal. La matriz es de arena gruesa compuesta de cuarzo, feldespato y líticos de granito y esquistos. El porcentaje de

matriz es de 30%. La composición de las gravas es de fragmentos de granito subredondeado de 2 mm a 5 cm; rocas intrusivas básicas (gabro) subredondeadas de 3 a 4 cm; cuarzo lechoso subredondeado de 2 a 2.5 cm; rocas volcánicas de composición intermedia subredondeadas de 5 a 8 cm de diámetro; arenitas arcósicas y cuarzoarenitas de grano medio y fino subredondeadas de 2.5 a 3 cm. Como estructuras sedimentarias pueden encontrarse lentes de arenas y estratificación cruzada curva (Fig. 4.13 A).

4.1.9 FACIES DE GRAVA CON GRADACIÓN INVERSA (GCI)

La facies Gci se caracteriza por estar soportada por clásticos. Su composición es variable, hacia el centro del área de estudio en la Barranca Tedigno se compone principalmente de cuarzo angular y subangular, fragmentos de granito subangulares. Hacia el poniente su composición se diversifica y contiene fragmentos de granito subangulares, de 4 cm de diámetro; areniscas de grano fino y medio de 2 cm; gabro subangular de 6 cm en promedio; esquistos subredondeados de 2 cm y cuarzo lechoso subangular. Como estructuras sedimentarias se encuentra gradación inversa, imbricación y lentes de arenas.



Fig. 4.13. Conglomerados de la facies Gmg en el nivel estratigráfico 15 m de la Columna V. La flecha amarilla indica el aumento del tamaño de grano. Tamaño del martillo 40.5 cm.

4.1.10 FACIES DE ARENA CON INTRACLÁSTOS (Ai)

En muestra de mano esta facies consiste en arenisca con intraclastos de limolita y arena en matriz de arena finas a medias. Su coloración general es rojiza. Los intraclastos van de angulares a subangulares y son de forma alargada, su diámetro va de 0.2 a 5 cm en su eje más largo. El espesor de los estratos es de máximo 1 m y sus límites son erosivos. Se encuentra en contacto con la facies Fl (Fig. 4.14 A y B).

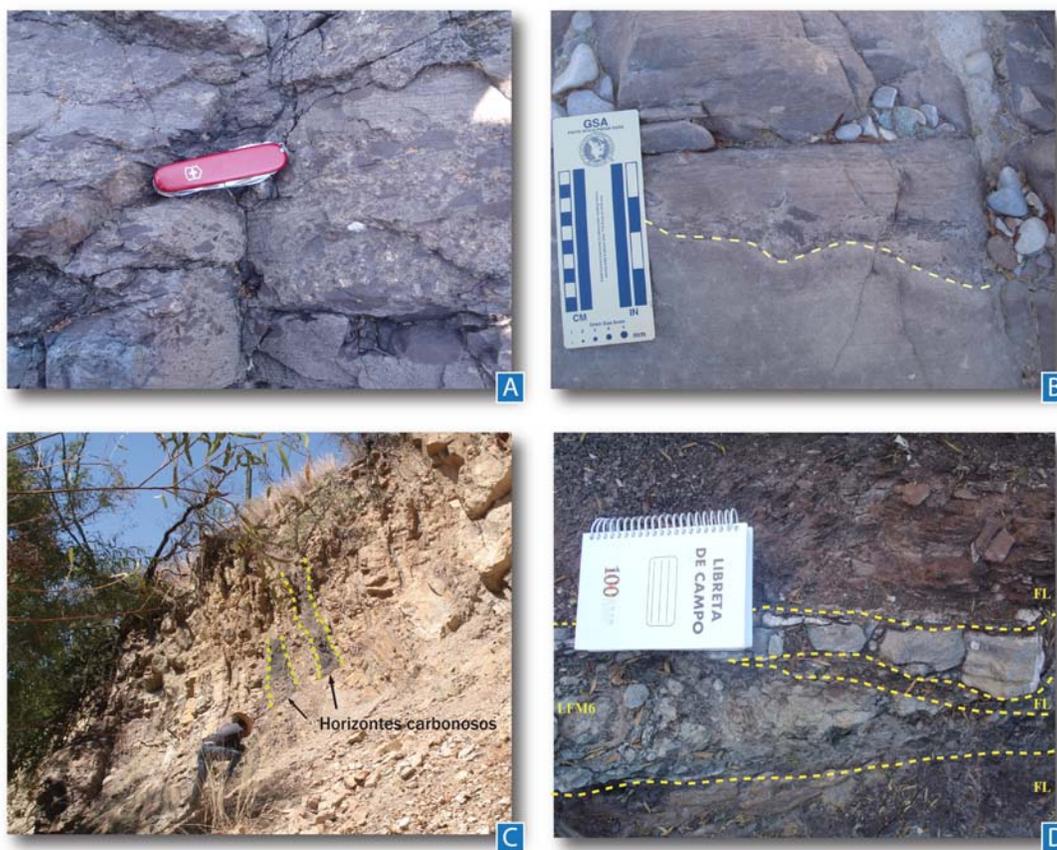


Fig. 4.14. Características sedimentológicas de las facies Ai, C y LMF6. Facies Ai. A) Se observan los intraclastos que conforman la brecha en la matriz de arenas finas, pueden encontrarse zonas de la facies Fl en la que se distingue laminación paralela. Dimensión de la navaja 9 cm. B) Intraclastos indicando un límite erosivo entre las facies Fl y Bi. Imágenes que representan el nivel estratigráfico 63 m de la Columna II. Dimensión de la escala 15 cm. C) Afloramiento sobre el lecho del Río Magdalena que muestra dos horizontes de carbón de 0.5 m de espesor. D) Horizontes de calizas con ostrácodos. Dimensión de la libreta 19 cm. Corresponde al nivel estratigráfico 29 m de la Columna II.

4.1.11 FACIES DE CARBÓN (C)

La litofacies C no se registró en ninguna columna, pero se observó en numerosos afloramientos. Esta formada por estratos lenticulares de carbón, de 0.4 a 0.6 m de espesor, que se presentan intercalados con areniscas y limolitas. Su coloración es negra o castaña oscura y puede presentar laminación paralela burda (Fig. 4.14 C).

4.1.12 FACIES LACUSTRES (LMF6)

Consisten en calizas de coloración grisácea y castaño claro en estratos delgados de 8 a 20 cm de espesor con estratos de límites ligeramente irregulares. Presenta laminación difusa y ondulada y se observan algunos microfósiles diseminados en la muestra de mano (Fig. 4.14 D).

4.2. MICROFACIES DE LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

El análisis de microfacies se define como el uso de los criterios petrográficos y paleontológicos en el estudio de una muestra en lámina delgada. Es una herramienta de gran utilidad en las Ciencias de la Tierra que permite elaborar interesantes hipótesis acerca de las condiciones de depósito de una roca calcárea.

En este trabajo se realizó el análisis de cuatro muestras petrográficas tomadas de dos horizontes en el nivel 29 m de la Columna II. Las muestras SDT-62 A y SDT-62 B corresponden al nivel inferior y las muestras SDT-62 C y SDT-62 D al nivel superior (Fig. 4.4). No se realizaron más muestreos pues estos dos horizontes son los únicos en su tipo que se pudieron observar. Se utilizó la clasificación de Dunham para describir las litologías y la clasificación presentada en Flügel (2004) que incorpora los estudios de otros autores, para las microfacies. La nomenclatura LMF (siglas en inglés) hace referencia a las microfacies mas comunes presentes en los lagos (Lacustrine Microfacies Type) que se dividen en 13 tipos. En este trabajo se identificó dos texturas de microfacies LFM 6, propuesta por Flügel (2004) aunque se considera que los depósitos que contienen a los ostrácodos no representan a un lago de grandes proporciones, sino estanques pequeños.

4.2.1 MICROFACIES LFM6

Textura 1: Wackestone con matriz de micrita neomorfizada a microesparita y una gran cantidad de valvas de ostrácodos de 0.2 a 0.7 mm en su eje más largo; estas pueden presentarse articuladas o desarticuladas y pueden ser delgadas o gruesas. Las valvas articuladas presentan un mosaico de ortoesparita como relleno secundario y en ocasiones pueden presentar cierta orientación. Otros fragmentos esqueléticos que se encuentran son bioclásticos de forma alargada y delgada (0.2 mm de largo), algunos de ellos en forma de placas aún articuladas (10 mm de largo) y posibles calciesferas sin borde de 0.03 mm de diámetro. También pueden encontrarse rastros de bioturbación rellena con material micrítico más fino (Figs. 4.15).

Textura 2: Packstone con textura granosoportada, matriz de micrita neomorfizada y con valvas de ostrácodos desarticuladas y desorganizadas de entre 0.2 y 0.6 mm en su eje más largo. Se identificó un ejemplar de algas verdes del tipo Charofitas de 2.5 mm de diámetro (Figs. 4.16)

Es poco común estudiar ostrácodos en lámina delgada debido a que no siempre se tienen secciones adecuadas, sin embargo gracias a la colaboración del Dr. Benjamin Sames de la Universität de Wien fue posible identificar ejemplares de tres superfamilias identificadas como Darwinuloidea, Cypridoidea y Cytheroidea.

Aunque ambas texturas presentan sedimentos clásticos diseminados del tamaño de limo y arena fina, la mayoría se concentra en los packstone. Estos sedimentos corresponden a:

- Cuarzo monocristalino subangular-angular con extinción recta. En ocasiones se encuentra en forma rectangular. Muy abundante. Puede presentarse dentro y fuera de los ostrácodos.
- Micas de forma tabular, algunas a un costado de los granos de cuarzo. Tipo Moscovita.
- Piroxenos subredondeados, poco abundantes.
- Plagioclasas subangulares, poco abundantes.
- Circones subredondeados, poco abundantes.

Las muestras presentan horizontes oxidados como evidencia de disolución por presión, óxidos y cuarzo reemplazado por CaCO_3 .

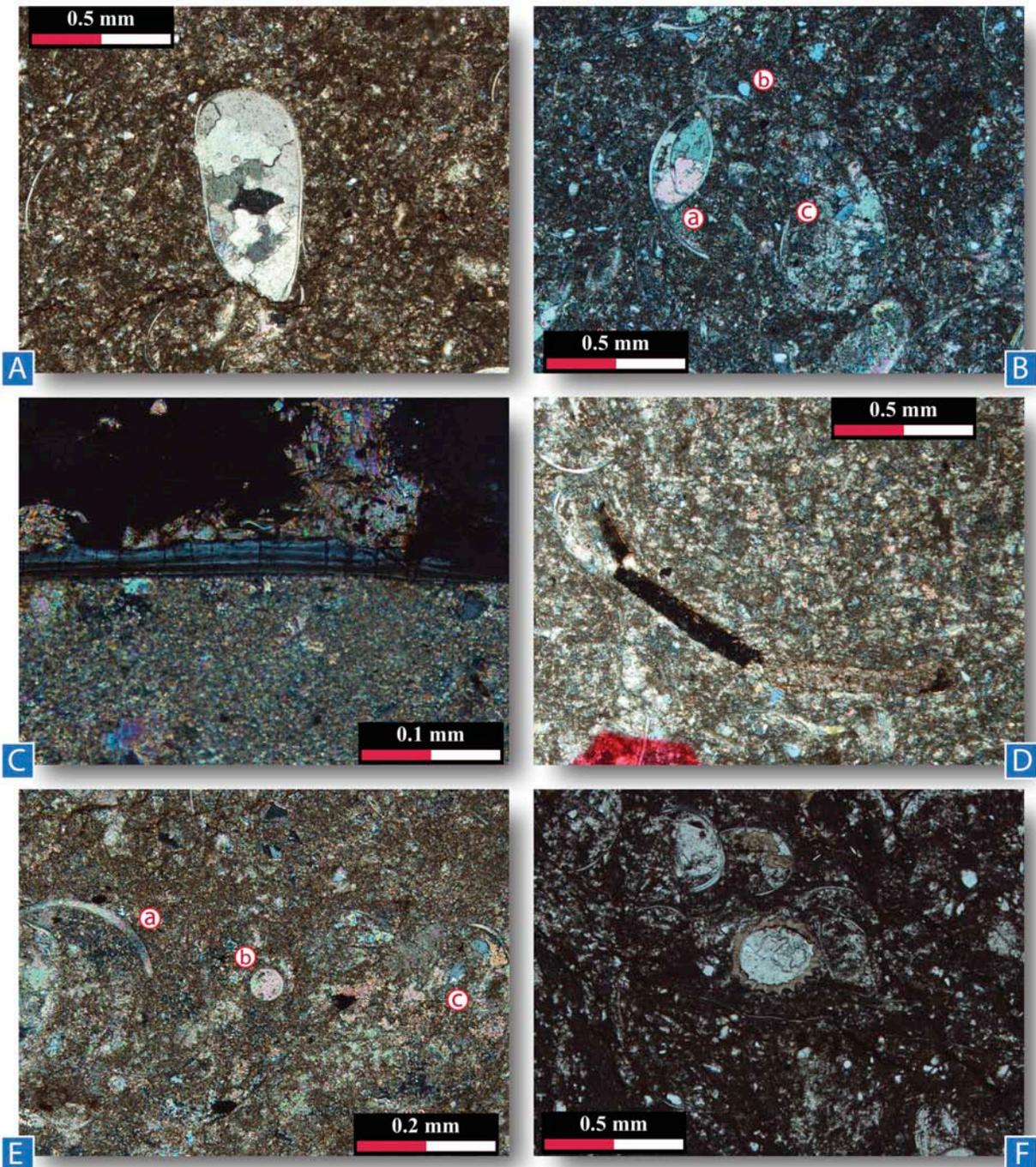


Fig. 4.15. Características petrológicas de las rocas carbonatadas de la formación Tianguistengo, Textura 1: A) Sección de valvas de ostrácodos articuladas en matriz micrítica. En la porosidad intrapartícula de los ostrácodos se desarrolló un mosaico de ortoesparita de grano grueso. Muestra SDT-62 A. Nícoles cruzados. 4 x. T B) a) Secciones de ostrácodos en matriz de micrita. En la porosidad intrapartícula de los ostrácodos se desarrolló un mosaico de ortoesparita. b) Ejemplo de granos de

cuarzo monocristalino del tamaño de limo, subangular, es el material detrítico más abundante en la muestra aunque hay otros dispersos en la imagen. c) Relictos de valvas articuladas de ostrácodos reemplazadas por micrita, granos de cuarzo al centro. Muestra SDT-62 A. Nícoles cruzados. 4 x. C) Fragmento de bioclásto en matriz de micrita. Muestra SDT-62 C. Nícoles cruzados. 20 x. D) Fragmento de bioclásto en matriz de micrita. Muestra SDT-62 B. Nícoles cruzados 4 x. E) a) Valva de ostrácodo desarticulada. b) Calciesfera. c) Cuarzo monocristalino cuarzo monocristalino del tamaño de limo, subangular con reemplazamiento de CaCO_3 . Muestra SDT-62 A. Nícoles cruzados. 10 x. F) Sección de valvas de ostrácodos articuladas y desarticuladas en el centro y sección de alga Charofita de bordes irregulares. Se observa la textura lodosoportada de la muestra. Muestra SDT-62 A. Nícoles cruzados. 10 x.

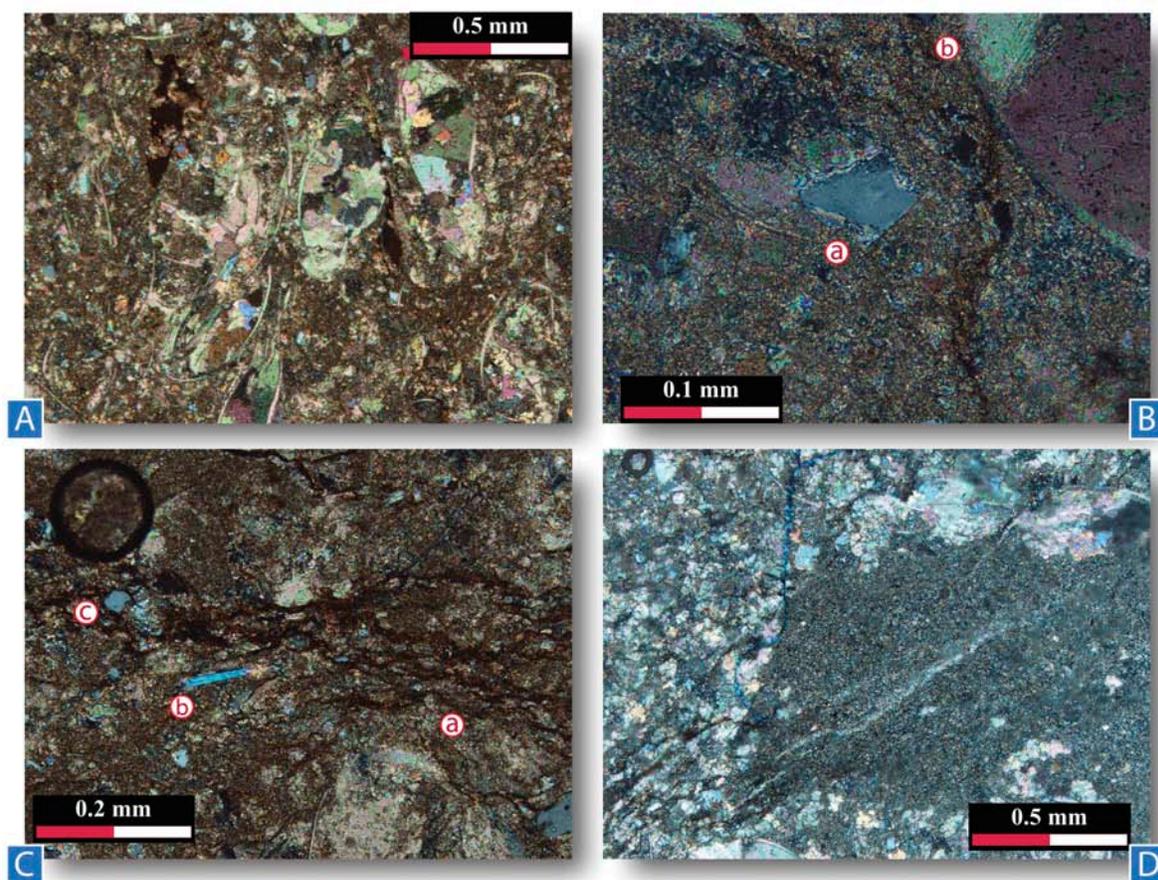


Fig. 4.16. Características petrológicas de las rocas carbonatadas de la formación Tianguistengo, Textura 2: A) Valvas articuladas de ostrácodos rellenas de ortoesparita. Se observa la textura granosoportada de la muestra. Muestra SDT-62 D. Nícoles cruzados. 4 x. B) a) Cuarzo monocristalino del tamaño de limo, angular con reemplazamiento de CaCO_3 . b) Sección de ostrácodo relleno de

ortoesparita. Muestra SDT-62 B. Nícoles cruzados. 10 x. C) a) Horizontes de óxidos como evidencia de disolución por presión. b) Cristal de moscovita detrítica embebido en la matriz de micrita. c) Grano de cuarzo monocristalino subredondeado del tamaño de limo. Muestra SDT-62 A. Nícoles cruzados. 10 x. D) Bioturbación rellena de material micrítico más fino, que el de los alrededores. Muestra SDT-62 C. Nícoles cruzados. 4 x.

4.2.2 EDAD DEL CONTENIDO FÓSIL

Los ostrácodos son crustáceos microscópicos con valvas que poseen bajas cantidades de calcita de magnesio. Habitan en diversos tipos de hábitats acuáticos, tanto marinos como terrestres, por ejemplo: estanques, lagos, ríos, arroyos, estuarios y océanos. Los ostrácodos extraídos de sedimentos lacustres son uno de los componentes más útiles para estimar variaciones del clima pasado, ya que pueden proveer de información acerca del ambiente donde habitaban, por ejemplo: temperatura, salinidad y cambios de nivel del lago (Pérez-Alvarado *et al.*, 2008; Thorp y Covich, 2010).

El orden Podocopida está formado por las superfamilias Darwinuloidea, Cypridoidea y Cytheroidea, de las cuales se identificaron diversos ejemplares en los sedimentos calcáreos de la formación Tianguistengo, específicamente de ostrácodos no-marinos. El registro fósil indica que el alcance estratigráfico de estas superfamilias va desde el Paleozoico hasta el Cenozoico (Tabla 4.2), lo cual no permite establecer una edad específica para los estratos que contienen a las muestras estudiadas, pues la edad del material paleontológico supera el rango de edad obtenido por medio del análisis de circones detríticos (Capítulo 6).

| SUPERFAMILIA | ALCANCE | | |
|---------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | ESTRATIGRÁFICO (MA) | SISTEMA | AMBIENTE |
| Cytheroidea | 450-0 | Ordovícico Tardío- Cuaternario | Continental, Marino, |
| Darwinuloidea | 360-0 | Devónico Tardío- Cuaternario | Continental |
| Cypridoidea | 400-0 | Devónico Temprano- Cuaternario | Continental, Marino, Transicional |

Tabla 4.2. Alcance estratigráfico específico de las superfamilias que conforman el orden Podocopida y sus preferencias ambientales (Thorp y Covich; 2010; Horne *et al.*, 2012).

Sin embargo, los ejemplares corresponden a un ambiente continental y de acuerdo con Thorp y Covich (2010) aunque el orden Podocopia comenzó siendo un grupo de organismos marinos, se ha estimado que la invasión de los hábitats terrestres comenzó a finales del Paleozoico y específicamente la superfamilia Cypridoidea tuvo una gran presencia en ambientes continentales desde el Jurásico Medio.

4.3 ASOCIACIONES DE FACIES

De acuerdo a las observaciones de campo y a la metodología propuesta por Miall (2006), en los depósitos de la formación Tianguistengo se identificaron seis asociaciones de facies, cuyos elementos e interpretación se enlistan a continuación (Tabla 4.3).

4.3.1 ASOCIACIONES DE FACIES AF1: LEEVE

Esta asociación se compone de la facies de limo y arena con laminación paralela (Fl). Tiene un espesor máximo de 12 m y mínimo de 5 m. El espesor total puede deberse a distintos eventos. Puede encontrarse en las columnas I, II, III, y IV. De Este a Oeste disminuye su presencia en el área de estudio. Se encuentra en contacto con las asociaciones AF2, AF3, AF4 y AF6. Esta asociación se encuentra con frecuencia en planicies de inundación. Forma un elemento arquitectónico que se conoce como levee, que son particiones elevadas entre canales y planicies de inundación. Debido a su carácter y posición los levee pueden proporcionar un control crítico sobre los procesos que determinan la distribución de agua y sedimentos en los sistemas fluviales (Brierley *et al.*, 1997). Los levee se forman cuando el flujo de agua en un ambiente fluvial de un canal sobrepasa los límites de éste y deposita sobre los costados sedimentos finos y gruesos, los de arena suelen ser muy comunes. Después de repetidas inundaciones, el sedimento acumulado aumenta su espesor y forma bordes que limitan el o los canales. La variación en el espesor de los estratos depende de la disponibilidad de sedimento, distancia con respecto al canal que aporta el sedimento, estilo fluvial y velocidades de subsidencia de la cuenca (Miall, 2006).

4.3.2 ASOCIACIONES DE FACIES AF2: DEPÓSITO DE AVENIDA (CANAL) (CREVASSE CHANEL)

La AF2 se compone de arenas con estratificación cruzada planar (Sp), arenas con estratificación cruzada curva (St) y arenas con rizaduras y estratificación cruzada (Sr). Tiene un espesor máximo de 8 m y se identificó en las columnas I, II y III. Se encuentra en contacto con las asociaciones AF1, AF3 y AF4. La asociación se interpretó como crevasse chanel, que son canales que atraviesan levees y otros depósitos y forman un sistema distributivo tipo delta (*crevasse splay*) poco profundo, a un costado del canal principal. El flujo de agua en estos elementos eventualmente se une a un canal principal (Miall, 2006).

4.3.3 ASOCIACIONES DE FACIES AF3: DEPÓSITO DE AVENIDA (LÓBULO) (CREVASSE SPLAY)

Formada por facies de limos y arenas con laminación paralela (Fl), arenas con estratificación cruzada planar (Sp), arenas con estratificación cruzada curva (St) y arenas con rizaduras y estratificación cruzada (Sr), la asociación de facies se encuentra presente en las columnas I, II y III. Tiene un espesor promedio de 14 m y se encuentra en contacto con las asociaciones AF1, AF2 y AF4. Una vez que se forma un *crevasse chanel*, este da lugar a una progradación tipo delta hacia la planicie de inundación, a esta se le conoce como *crevasse splay*. Una vez que el levee se ha roto el agua sale de su cauce y medida que el agua se extiende sobre la planicie de inundación ocurre el depósito de los sedimentos en suspensión. La deposición resultante puede crear depósitos gradados. Estos depósitos varían en tamaño, los más grandes pueden tener 6 m de espesor en el borde y extenderse hasta 2 km. Usualmente estos depósitos están cortados por elementos *crevasse chanel* e intercalados con depósitos de planicies de inundación.

4.3.4 ASOCIACIONES DE FACIES AF4: PLANICIE DE INUNDACIÓN

La asociación de facies AF4 se compone de las facies de limos y arenas con laminación paralela (Fl), limos o arenas con raíces (Fr), arenas con rizaduras y estratificación cruzada (Sr), arenas masivas (Sm), facies lacustres (LMF6), arenas con intraclastos (Ai) y facies de carbón (C). Su espesor máximo es de 40 m y se identificó en las columnas I, II, III, IV y V. Está en contacto con las asociaciones AF1, AF2, AF3, AF5 y AF6. La facies Fl representa depósitos que se producen en zonas

planas conocidas como planicies de inundación, adyacentes a márgenes fluviales. En general, están formadas por limos y cuando llegan a encontrarse litofacies de arenas (Sr y Sm) pueden representar un aumento de energía en la planicie de inundación, como los depósitos de *crevasse* (Miall, 2006). Fl se encuentra intercalada con la facies Fr en esta asociación, la cual representa horizontes con raíces y moldes de vegetación en posición de crecimiento que afectan a las estructuras sedimentarias. Este tipo de horizontes son evidencia de episodios de estabilidad en la planicie de inundación donde crece vegetación, sin embargo se infiere que estos ocurrieron por periodos de corta duración y que la sedimentación fue relativamente rápida. El depósito en la planicie de inundación se produce con bajas tasas, comúnmente en el orden de 1/10 mm/año (Marriott, 1996). Dichos depósitos tienden a ser finos y granodecrecientes a medida que nos alejamos del canal activo.

Los depósitos de carbón ocurren en una amplia gama de ambientes sedimentarios, pero suelen ser asociados a planicies de inundación donde la acumulación de materia orgánica es muy frecuente (Miall, 2006).

Finalmente, encontramos en esta asociación la microfacies LMF6, que tiene un espesor total de 0.16 m en los 131 m medidos de la formación Tianguistengo en la Columna II y se encuentra intercalada con la facies Fl. Aunque su espesor sea poco representativo, su presencia nos ayuda a establecer un importante aspecto de la AF4: la presencia de cuerpos someros de agua o pozas.

Esta microfacies fue descrita como Packstone-Wackestone de Ostrácodos LMF6 debido al alto contenido de valvas de ostrácodos. Las valvas pueden encontrarse en dos modalidades:

- Articuladas, en una textura lodosoportada, lo cual indica que los organismos fueron depositados en un ambiente tranquilo, sin perturbaciones. Las corrientes de aire y el oleaje pocas veces afectaron el fondo de las pozas.
- No articuladas, dentro de una textura granosoportada con una orientación incipiente los cuales se han interpretado como producto de corrientes o remoción de sedimentos, puesto que la desarticulación se debe a que los organismos postmortem sufrieron la desintegración del ligamento orgánico que mantenía juntas sus valvas y fueron dejados expuestos a la acción de corrientes de fondo que arrastraron el material. Algunas de las valvas son gruesas lo cual indica que los ostrácodos tuvieron que desarrollar una protección bajo un ambiente de alta energía.

Ambas texturas pueden asociarse fácilmente a la microfacies LMF6, que es típica de lagos o

estanques de agua dulce y tiene una amplia distribución que incluye las costas, litorales y zonas profundas de cuerpos de agua dulce (Fig. 4.17) (Flügel, 2004). Los valvas articuladas pudieron haberse ubicado en el fondo de pozas, donde las corrientes no las alcanzaban con facilidad, mientras que las no articuladas pudieron ser removidas por corrientes.

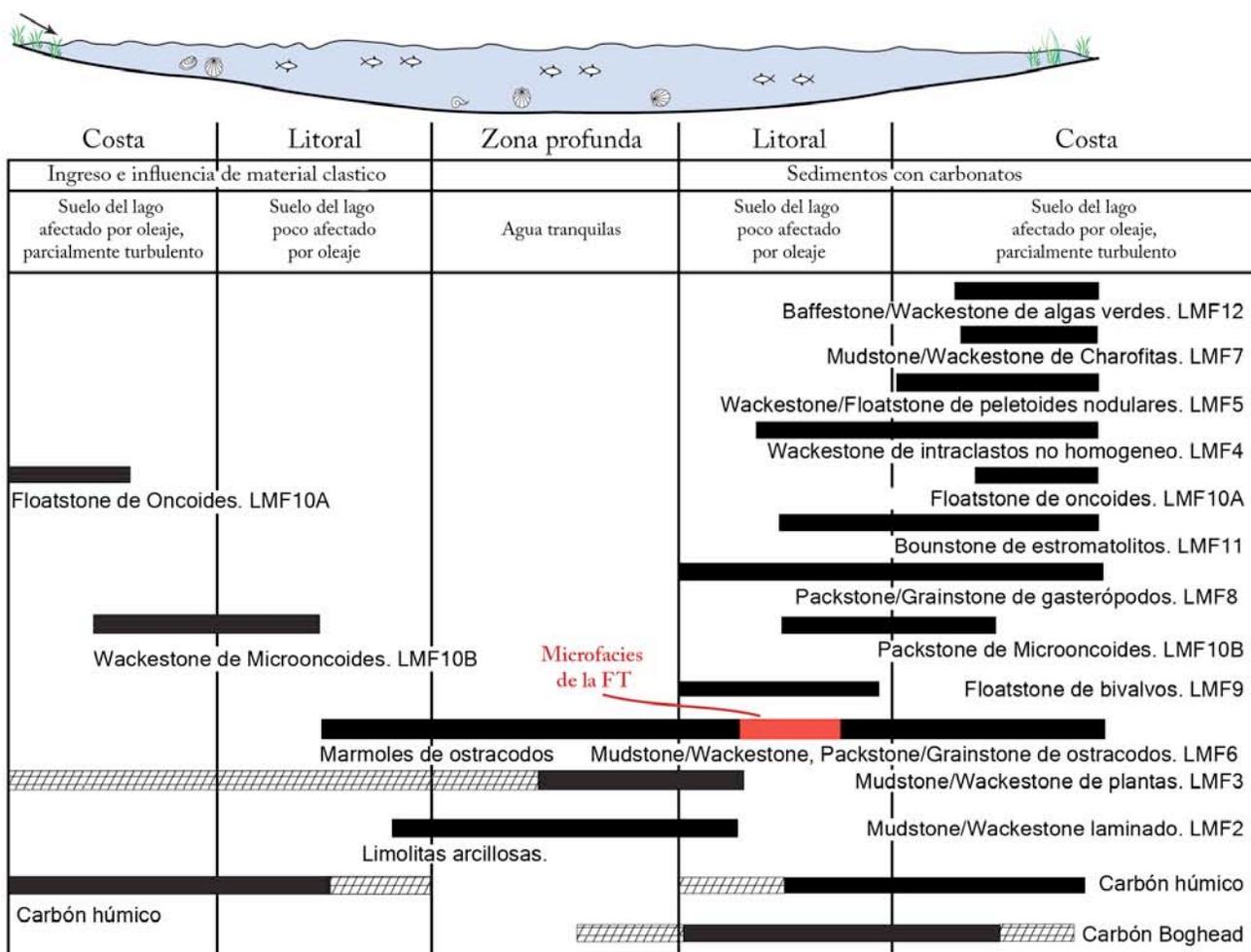


Fig. 4.17. Distribución esquemática de los tipos de microfacies comunes de calizas lacustres de agua dulce. En rojo se muestra el rango de alcance interpretado para las microfacies de la formación Tianguistengo (FT). Modificado de Flügel (2004). Basado en Clausen (1990), Stapf (1989), Arp (1995), Schweigert (1996) y otros autores.

Por otro lado, los sedimentos de tipo algal y la acumulación de material biogénico, son muy comunes en las zonas someras y costeras de los lagos debido a que las algas requieren de luz solar para

desarrollarse, sin embargo en las muestras sólo se observa un ejemplar de algas verdes del tipo Charofitas. En los carbonatos depositados en agua dulce las laminaciones regulares y la bioturbación rellena de material micrítico más fino en los depósitos de pequeños lagos son una fábrica común.

Las valvas de ostrácodos de las superfamilias Darwinuloidea, Cypridoidea y Cytheroidea son representativas de ambientes de agua dulce. Se ha documentado que los organismos de la superfamilia Darwinuloidea tienen preferencia por los lagos o estanques con gran cantidad de sedimentación terrígena y bajas concentraciones de carbonatos (Molostovskaya, 2000).

El material clástico presente en las laminas delgadas corresponde a sedimentos del tamaño de limos y arenas finas de los minerales: cuarzo, moscovitas, piroxenos, plagioclasas y circones que son indicativos de que la poza recibía un flujo de terrígenos.

Todas estas características permiten establecer las microfacies LMF6 de la formación Tianguistengo como indicativas de pozas o estanques de agua dulce de poca profundidad que se mantenían en la planicie de inundación, hasta ser cubiertas por el sedimento acarreado por una nueva inundación. Aunque la clasificación para calizas lacustres de Flügel (2004) no considera lagos de poca profundidad en ambientes fluviales, esta configuración puede utilizarse como referencia para las microfacies de la asociación AF4 (Fig. 4.17)

En esta asociación también se observan arenas con intraclastos (Ai) que tienen un espesor total de 3 m en la Columna II. Los intraclastos son fragmentos retrabajados de sedimentos finos (limos) débilmente consolidados, transportados por la acción de corrientes o deslizamientos. Este tipo de sedimentación obedece a aumentos bruscos de energía que retrabaja los sedimentos y los deposita en la misma cuenca, indicando una acción erosiva eventual. Se observó que estos flujos contienen fragmentos de las calizas descritas como packstone y wackestone de ostrácodos LMF6, lo cual es un indicativo de su carácter sinsedimentario.

El conjunto de elementos mencionados permite interpretar que la facies AF4 corresponde a planicies de inundación con crecimiento de vegetación, estanques y acumulación de materia orgánica (pequeños pantanos) que se veían interrumpidas por la llegada de sedimentos acarreados por el aumento periódico del nivel de agua en la zona.

4.3.5 ASOCIACIONES DE FACIES AF5: FLUJOS DE SEDIMENTOS POR GRAVEDAD

La asociación de las facies de arenas masivas (Sm); gravas matriz soportadas masivas (Gmm) y gravas clásto soportadas con gradación inversa (Gci) se ha interpretado como flujos de sedimentos por gravedad, los cuales son producto de eventos de depósito catastróficos. Se reportó en las columnas IV y V con un espesor máximo de 12 m; se encuentra en contacto con AF4 y AF6. Los flujos de sedimentos por gravedad suelen ser parte de depósitos fluviales en partes proximales de abanicos aluviales y en ríos trezados; estos ocurren cuando grandes masas de sedimentos son movilizados en una superficie con pendiente, comúnmente ocurren bajo acción del agua, típicamente en época de lluvias. El flujo puede comenzar como un deslizamiento de tierra y posteriormente continuar en una corriente fluvial, el movimiento cesa al llegar a una superficie con poca o nula pendiente y al perder el agua que actúa como lubricante. Como resultado, se tiene un depósito sin aparente orden y mal clasificado de brechas y/o conglomerados (Miall, 1992). Usualmente los eventos de flujos ocupan canales erosionados previamente o rellenan la topografía irregular. Se ha descrito esta facies como este elemento por la angulosidad de sus clastos (Columna IV), y la poca o nula presencia de estructuras sedimentarias.

4.3.6 ASOCIACIONES DE FACIES AF6: CANALES

Esta asociación de facies se compone de la facies de arenas con estratificación cruzada planar (Sp), gravas clásto soportadas con gradación inversa (Gci) y gravas matriz soportadas con gradación incipiente (Gmg), que se reportan en las columnas IV y V, donde se encuentra en contacto con las asociaciones AF1, AF4 y AF5. Su espesor máximo es de 12 m. Es común encontrar las facies arenosas intercaladas con las conglomeráticas, como estratos o lentes. Se interpretó como depósitos de relleno de canales debido a las estructuras sedimentarias registradas en el trabajo de campo. Su presencia es mayor hacia el Oeste del área de estudio. Los canales suelen cortar depósitos de planicie de inundación. La geometría de los canales no fue observada en campo.

| ASOCIACIÓN DE FACIES | FACIES PRESENTES | ELEMENTO ARQUITECTÓNICO | INTERPRETACIÓN | AMBIENTE DE DEPÓSITO |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------|
| AF1 | Fl | Levee | Inundación de overbank | Planicie de inundación |
| AF2 | Sp, St, Sr | Depósito de avenida (canal) | Ruptura de margen del canal principal | Planicie de inundación |
| AF3 | Fl, Sp, St, Sr | Depósito de avenida (lóbulo) | Progradación tipo delta desde el depósito de avenida hacia la planicie de inundación | Planicie de inundación |
| AF4 | Fl, Fr, Sr, Sm, LMF6, C, Ai | Planicie de inundación | Depósitos de overbank, flujos de lámina, estanques y pantanos. | Planicie de inundación |
| AF5 | Sm, Gmm, Gci | Flujos de sedimentos por gravedad | Eventos de depósito catastrófico. | Abanico aluvial-fluvial |
| AF6 | Sp, Sm, Gci, Gmg | Rellenos de canal | Formación de canales asociados a un abanico aluvial | Abanico aluvial-fluvial |

Tabla 4.3. Características de las asociaciones de facies reconocidas en la formación Tianguistengo de acuerdo a Miall (2006) y Flügel (2004).

4.4 CORRELACIÓN SEDIMENTARIA DE LAS COLUMNAS MEDIDAS

Las cinco columnas medidas en la región (I, II, III, IV y V) (Figs. 4.2 a 4.6) fueron dispuestas para realizar una correlación estratigráfica de las facies que componen a la formación Tianguistengo, en la figura 4.18 se muestra el arreglo de las mismas.

La escala vertical es la misma para todas las columnas, sin embargo su disposición horizontal no es proporcional a su posición verdadera. En I, II y III se estableció un nivel estratigráfico en común que es el límite entre las formaciones Piedra Hueca y Tianguistengo, sin embargo para las IV y V no se encontró un nivel que sirviera de referencia con respecto a las otras columnas. Todas tienen su base cercana a la Falla Totoltepec.

Al realizar esta correlación se observó la predominancia hacia el Este de asociaciones de facies de rocas de grano fino (AF1, AF2, AF3 y AF4), mientras que al Oeste pueden encontrarse areniscas intercaladas con conglomerados (AF1, AF4, AF5 y AF6). Lo cual se considera un indicativo importante

del arreglo de los sedimentos de acuerdo con sus procesos de transporte y ambiente de depósito (Fig. 4.18).

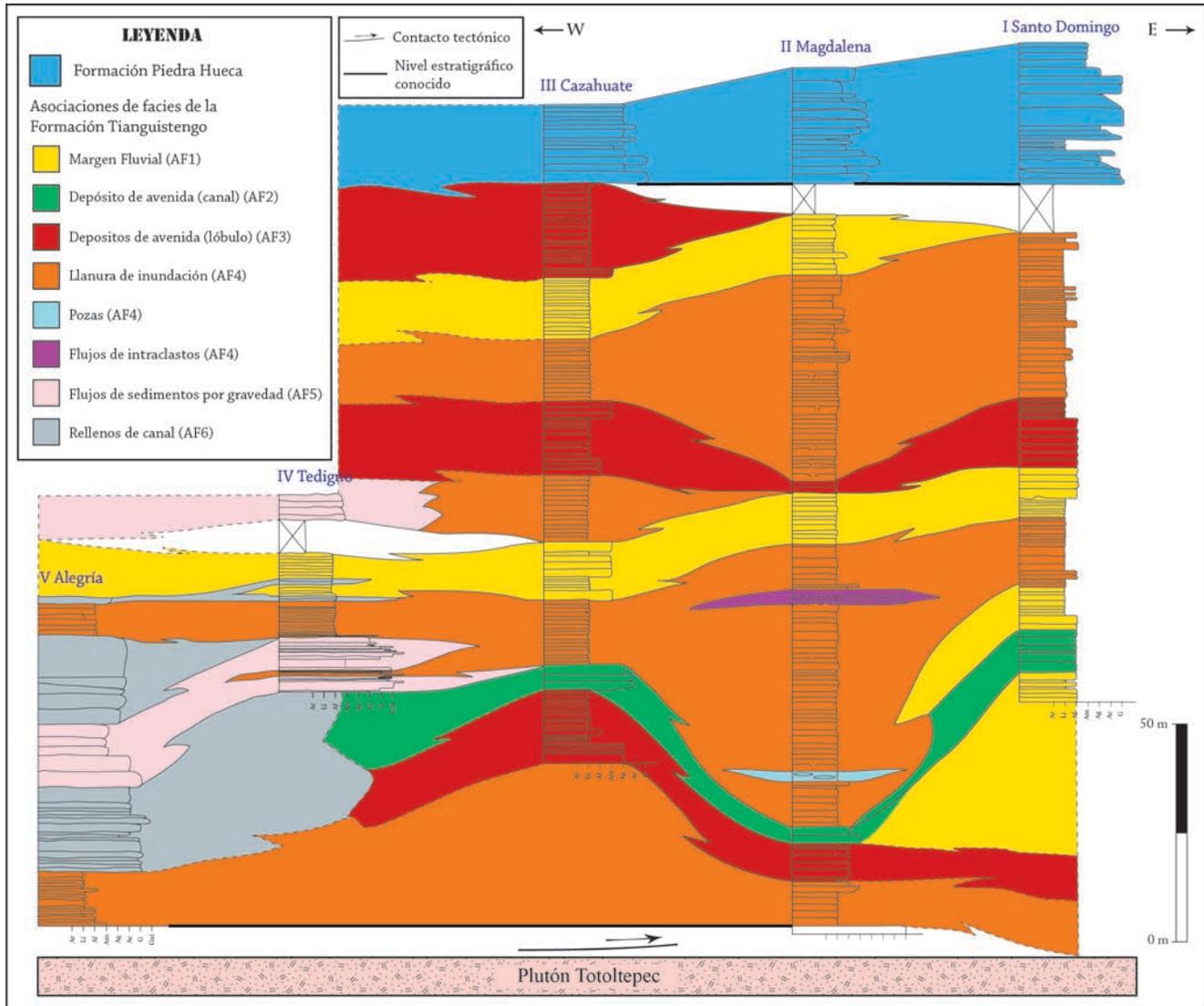


Fig. 4.18. Correlación estratigráfica de las columnas I, II, III, IV y V. El orden de las columnas se indica en la parte superior. Su posición geográfica puede consultarse en el Mapa Geológico anexo.

4.5 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Se colectaron veintinueve muestras representativas para la elaboración de láminas delgadas, cuya posición estratigráfica se indica en cada columna descrita en la sección referente a facies (Figs. 4.1-4.6); ocho muestras corresponden a clastos presentes en facies conglomeráticas y arenosas.

Descripción petrográfica de la facies Fl

Fl es la facies más común y se encuentra presente en todas las columnas. Se analizaron siete muestras, cuya posición estratigráfica está indicada en las figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 de este capítulo. Dichas muestras son el SDT-36 y SDT-64 (Columna II); SDT-54, SDT-55, SDT-57 (Columna I); TD-5 (Columna IV) y HIG-52 (Columna V).

En las muestras puede observarse laminación paralela bien desarrollada, delimitada por horizontes de óxidos en las láminas delgadas. En ocasiones, los minerales se encuentran orientados, sus ejes mayores se encuentran paralelos a la laminación, especialmente las micas y pueden llegar a presentar gradación normal. En ocasiones se encuentra calcita de sustitución y los óxidos relleno las fracturas y los espacios intrapartícula. El tamaño de grano en las muestras va de limo grueso a limo fino y su clasificación en general es buena. Los granos van de subredondeados a subangulares. Los contactos son principalmente tangenciales y cóncavo-convexos por lo que presenta una fábrica compacta, lo cual sugiere un proceso de compactación importante en estas rocas. La porosidad es baja e intergranular. La composición de las muestras incluye al cuarzo y al feldespato como los minerales más abundantes. El cuarzo monocristalino se presenta subangular y angular, con extinción recta y ondulante; el feldespato potásico va de subangular a angular y en ocasiones presenta sustituciones de minerales arcillosos; el cuarzo policristalino es subredondeado y escaso; las plagioclasas son angulares y en ocasiones presentan sustituciones de minerales arcillosos; hay variedades de moscovita y clorita. Los líticos presentes corresponden a fragmentos de esquisto, intraclastos de lutitas con deformación de sedimento suave. Los minerales accesorio más comunes son los circones. Los óxidos de hierro enfatizan los contornos de los granos. Las muestras fueron clasificadas como limolitas (Fig. 4.19).

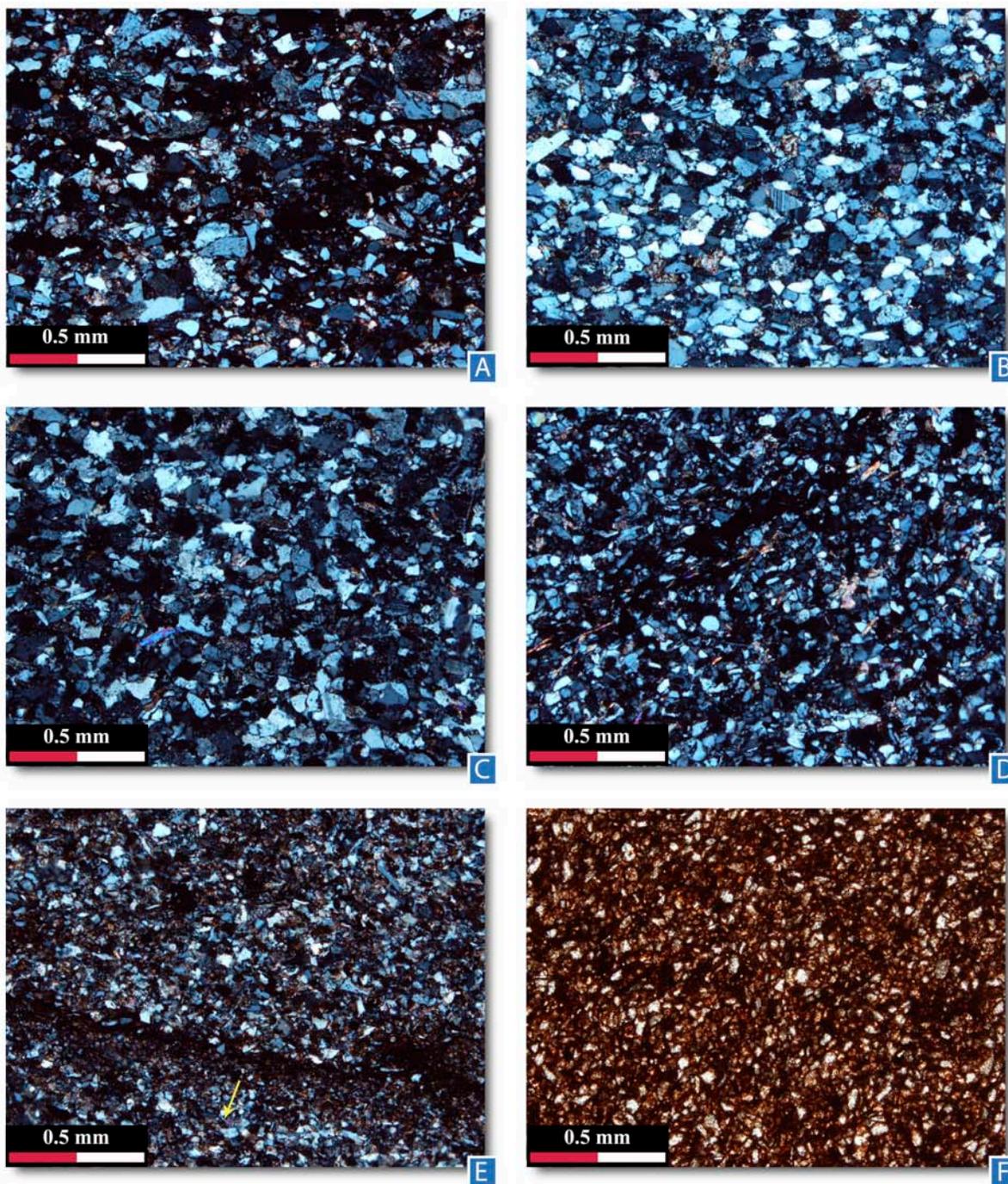


Fig. 4.19. Fotomicrografías de muestras de roca de la formación Tianguistengo, facies Fl. A) Limolita compuesta principalmente por cuarzo monocristalino y feldespato (muestra SDT-36) con óxidos rellenando los espacios interpartícula. Nivel estratigráfico 4 m de la Columna II. B) Ejemplar de limolita con buena clasificación, de granos subredondeados; al centro un grano de plagioclasa angular (muestra SDT-57). Nivel estratigráfico 83 m de la Columna I. C) Limolita de granos subangulares

mostrando contactos cóncavocóncavo-convexos entre los granos, debido a esto se infiere que esta roca ha sufrido compactación (muestra SDT-54). Nivel estratigráfico 22 m de la Columna I. D) Roca compuesta de limo fino, donde se observa una alineación de las micas paralelas a la laminación presente en el ejemplar (muestra SDT-64). Nivel estratigráfico 98 m de la Columna II. E) Limolita de grano fino donde se observan una gradación grano decreciente (flecha amarilla indica aumento del tamaño de grano) (muestra SDT-55). Nícoles cruzados. Nivel estratigráfico 48 m de la Columna I. F) Imagen obtenida con luz paralela, se observa la gran cantidad de óxidos presentes en la muestra HIG-52, a los que se atribuye la característica coloración rojiza de esta facies. Nivel estratigráfico 53 m de la Columna V. Todas la fotomicrografías fueron tomadas con el objetivo 4x.

Descripción petrográfica de la facies Fr

De la facies Fr se colectó la muestra SDT-56 (Columna I) (Fig. 4.2). El tamaño de grano es de arena fina. Los granos son subangulares. En general, la clasificación de la muestra es buena. La composición es cuarzo monocristalino, feldespato potásico alterado (ortoclasa y microclina), plagioclasas, óxidos de hierro, líticos de lutitas, moscovita y circones detríticos. Los contactos entre granos son suturados en su mayoría, aunque pueden encontrarse algunos tangenciales, por lo que se supone que esta roca ha sufrido compactación. Esta roca se clasificó como una arenita arcósica (Fig. 4.20).

Descripción petrográfica de la facies Sp

Las muestras que se recolectaron de la facies Sp son: la SDT-71 (Columna III) y la HIG-51 (Columna V) (Figs. 4.5 y 4.6) y son de areniscas de grano medio a muy fino. En la muestra SDT-71 los granos son subangulares. Su composición es de cuarzo monocristalino subangular, feldespato potásico, en ocasiones alterado, plagioclasa, cuarzo policristalino, moscovita, clorita, óxidos de hierro, líticos de esquistos y circones. La clasificación es buena. Los contactos son esencialmente puntuales. Esta muestra por su composición puede considerarse de acuerdo a la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn *et al.* (1972) como una arenita arcósica. Por otro lado, la muestra HIG-51 es una arenisca compuesta por fragmentos subangulares de feldespato potásico, cuarzo policristalino, cuarzo monocristalino y líticos de esquistos y gabros embebidos en una matriz de limo. Fue clasificada como una arenita arcósica (Fig.

4.21).

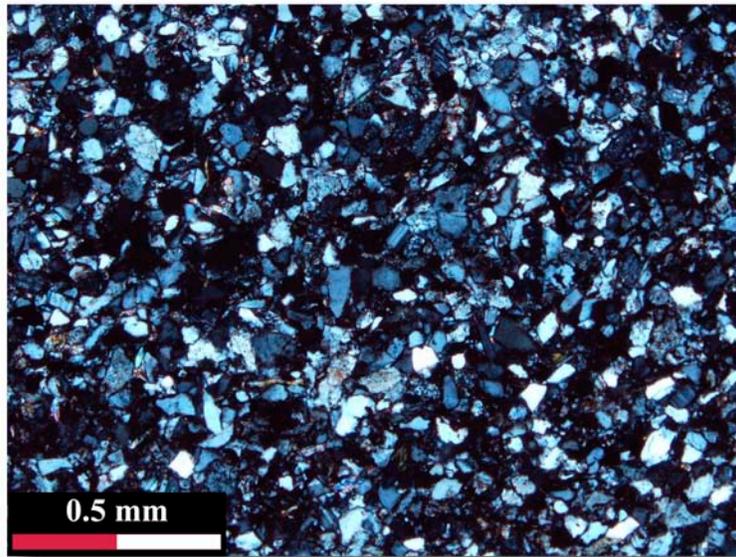


Fig. 4.20. Muestra SDT-56 de la facies Fr. Se puede observar la clasificación media y la predominancia de cuarzo monocristalino y feldespato con sustitución de minerales arcillosos, por lo que se clasificó como una arenita arcósica. Nivel estratigráfico 67 m de la Columna I. Imagen obtenida con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

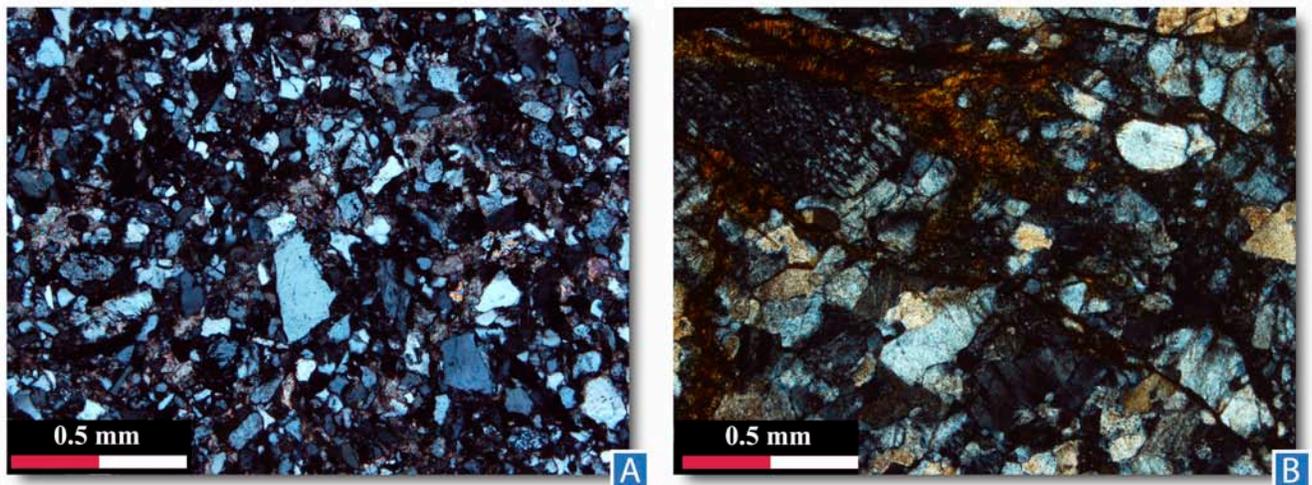


Fig. 4.21. Fotomicrografías de la facies Sp. A) Se observa el bajo grado de clasificación del ejemplar SDT-71, cuya composición predominante es de cuarzo monocristalino de diversos tamaños y feldespato potásico. Los espacios intergranulares están ocupados por calcita. Nivel estratigráfico 63 m de la Columna III. B) La muestra HIG-51 es de grano más grueso, pero tiene una composición similar a

la muestra anteriormente descrita. Nivel estratigráfico 42.5 m de la Columna V. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

Clastos de los conglomerados en la facies Sp

En la facies Sp es muy frecuente encontrar lentes de conglomerado, cuyos clastos reflejan la diversidad de fuentes de esta roca sedimentaria. A fin de comprender mejor la composición y procedencia de estas rocas, se tomaron cuatro muestras que a continuación se describen.

Muestra HIG-70-A. Roca ígnea de textura fanerítica de composición granítica. La composición de los cristales corresponde a cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y micas. La matriz es de plagioclasas (Fig. 4.22 A).

HIG-70-B. Roca ígnea de textura porfídica de composición granítica. La composición de los fenocristales en la muestra corresponde a cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas, micas y circones embebidos en una matriz de plagioclasas. Algunos de los fenocristales presentan texturas magmáticas (Fig. 4.22 B).

HIG-70-C. La muestra es una roca ígnea de textura fanerítica de composición granítica. La composición de los cristales corresponde a cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas y micas (Fig. 4.22 C).

HIG-70-D. Roca ígnea de textura porfídica de composición gabraica. La composición de los fenocristales corresponde a plagioclasas y feldespato potásico embebidos en una matriz de plagioclasas. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x (Fig. 4.22 D).

Descripción petrográfica de la facies St

Las muestras de la facies St son SDT-53 (Columna I), SDT-61 (Columna II), SDT-69 y SDT-70 (Columna III) (Figs. 4.2, 4.3 y 4.4). Son areniscas conformadas por granos de arena gruesa a fina, en las que a simple vista se observa laminación. Sus granos van de subredondeados a subangulares. La clasificación puede ser buena. Su composición es cuarzo policristalino, feldespato potásico, en ocasiones alterado; plagioclasa, moscovita, biotita, líticos de limolitas, cuarzoarenitas, rocas volcánicas

con microlitos, rocas volcánicas de composición básica, líticos metamórficos metasedimentarios, rocas intrusivas ácidas, lutitas e intraclastos de caliza con esparita; también pueden encontrarse óxidos, clorita y circones en menor proporción. Las micas suelen presentarse orientadas paralelas a la laminación burda. Los contactos son tangenciales y cóncavo-convexos que indican un proceso de compactación importante. Hay calcita rellenando las fracturas y los espacios intrapartícula y en ocasiones puede encontrarse crecimiento de cuarzo sintaxial previo al crecimiento de calcita. Estas muestras por su composición puede considerarse de acuerdo a la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn *et al.* (1972) como arenitas arcósicas (Fig. 4.23).

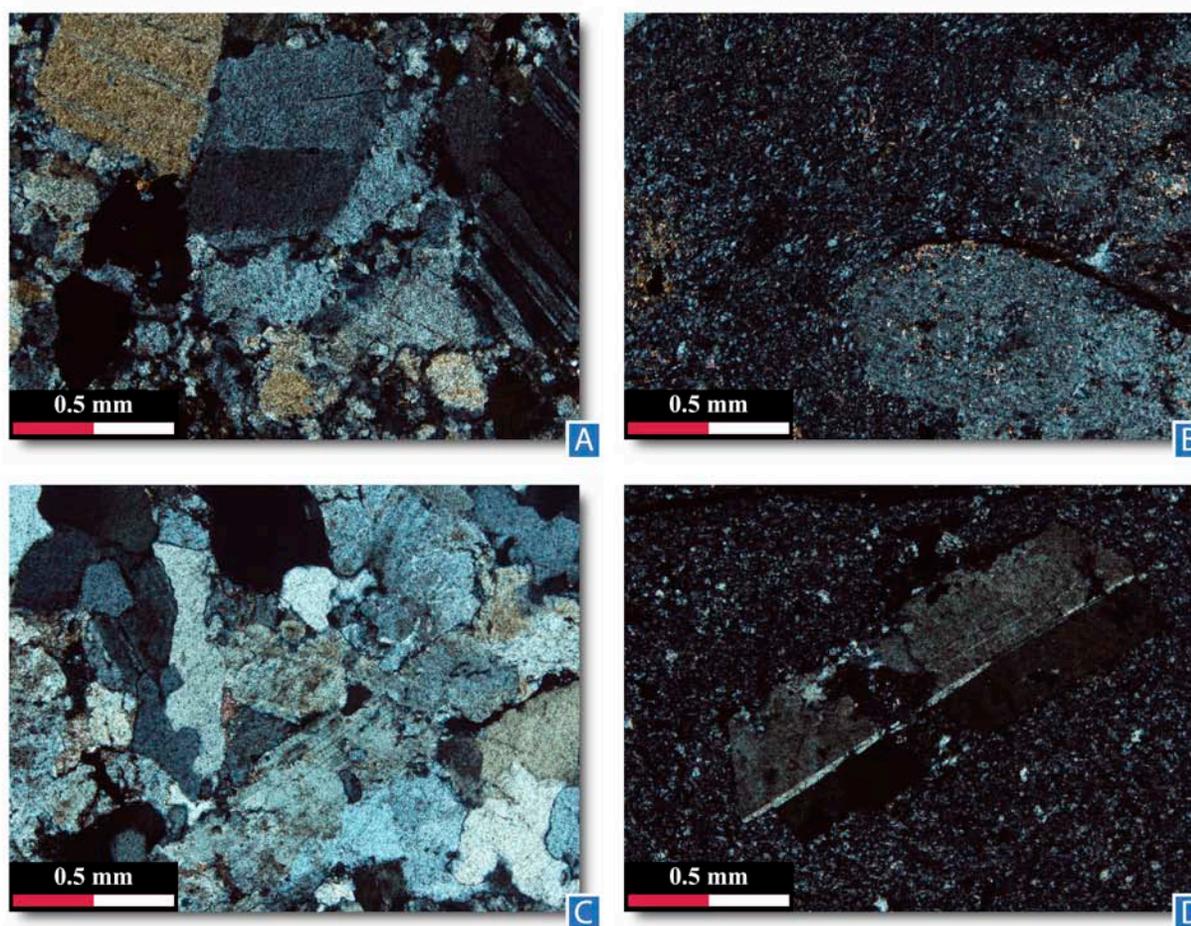


Fig. 4.22. Muestras de clastos en los lentes conglomeráticos de la facies Sp. A) Muestra HIG-70-A. B) HIG-70-B. C) HIG-70-C. D) HIG-70-D. Nivel estratigráfico 23 m de la Columna V. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

Descripción petrográfica de la facies Sr

La muestra SDT-52 se encuentra en la base de la Columna I (Fig. 4.2). Su textura general es masiva y se compone de granos de arena gruesa que van de subangulares a subredondeados. La clasificación es media. Su composición es la siguiente: cuarzo monocristalino, feldespato potásico que en ocasiones se encuentra alterado, plagioclasas, algunas de ellas con sustitución de minerales arcillosos, cuarzo policristalino, líticos de esquisto (cuarzo policristalino con micas), rocas ígneas volcánicas, lutitas, micas (clorita y moscovita) y circones. Los contactos entre los granos son predominantemente tangenciales y suturados. La textura en general muestra una roca muy compactada. Este ejemplar por su composición se clasifica como una arenita arcósica (Fig. 4.24).

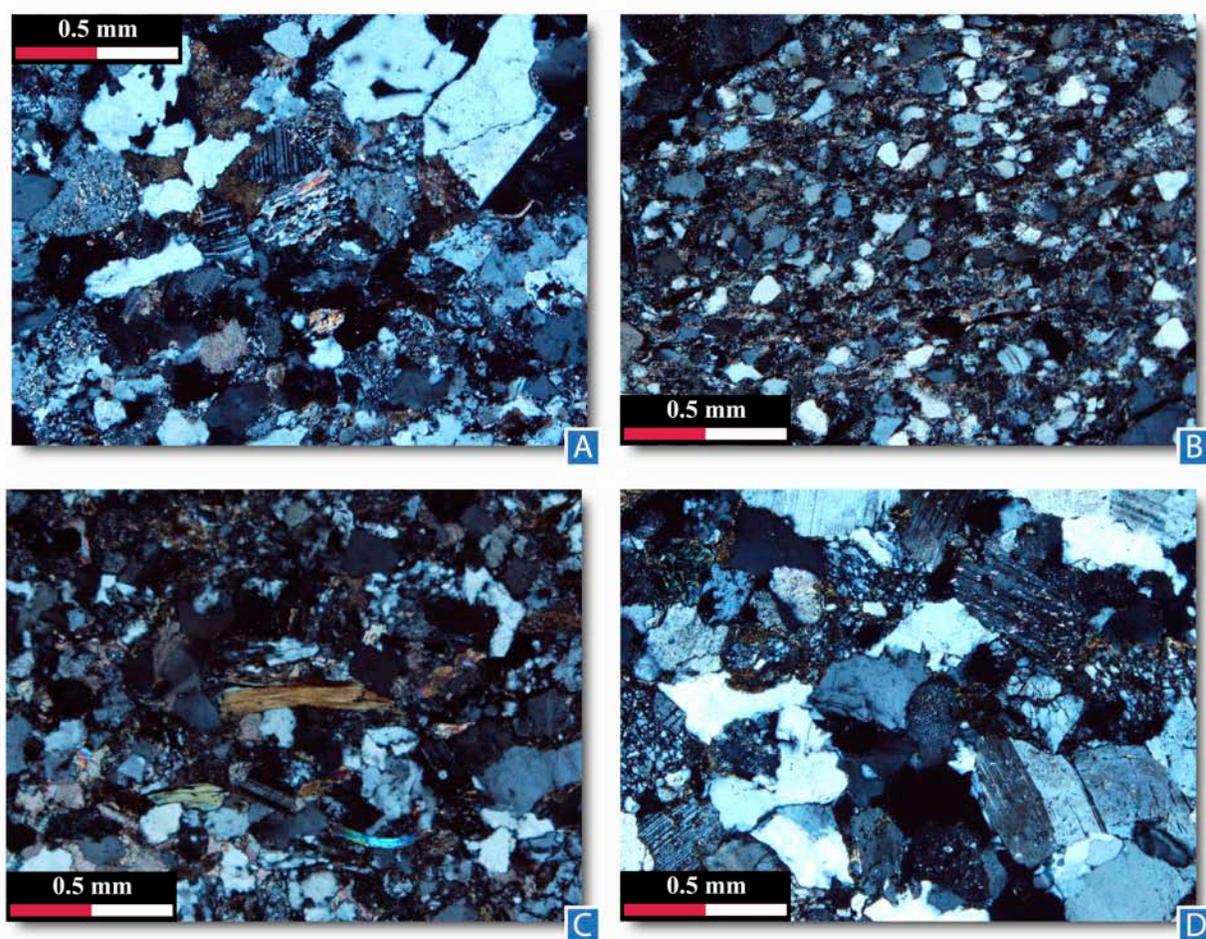


Fig. 4.23. Fotomicrografías de la facies St. A) Arenita arcósica de grano medio con alto porcentaje de feldespato potásico con sustitución por minerales arcillosos. Los granos se encuentran

suturados. La calcita rellena los espacios intrapartícula. Muestra SDT-53 ubicada en el nivel estratigráfico 7 m de la Columna I. B) Clásto redondeado de lítico cuarzoarenita de grano muy fino (SDT-61). Nivel estratigráfico 7 m de la Columna II. C) Cristales de biotita y moscovita al centro. Muestra SDT-69 ubicada en el nivel estratigráfico 2 m de la Columna III. D) Granos suturados de cuarzo monocristalino y policristalino; feldespato y plagioclasa que indican que la roca ha sufrido un proceso de compactación importante (SDT-70). Nivel estratigráfico 65 m de la Columna III. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

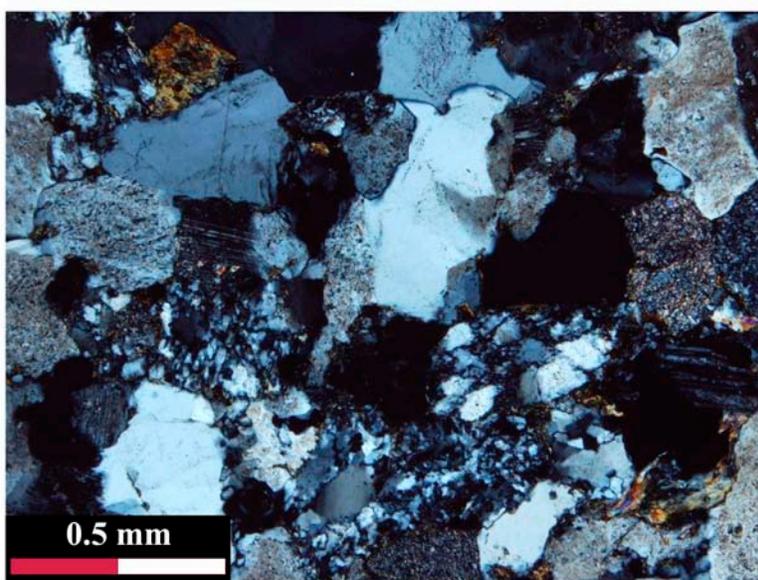


Fig. 4.24. Fotomicrografía de la facies Sr. Arenisca de grano medio, hacia la derecha se observa un lítico redondeado de arenisca de grano fino rodeado de granos de cuarzo monocristalino, feldespato y plagioclasas. Muestra SDT-52 ubicada en el nivel estratigráfico 11 m de la Columna I. Nícoles cruzados. 4x.

Descripción petrográfica de la facies Sm

Las muestras se ubican en las Columnas VI (TD-6) y V (HIG-68) (Figs. 4.5 y 4.6) y se trata de areniscas arcósicas de grano medio a fino de granos subredondeados y subangulares. La clasificación es de media a mala. La composición de la muestra HIG-68 es: cuarzo monocristalino, feldespato potásico subangular sustituido por minerales arcillosos, plagioclasa, moscovita y óxidos. Los contactos entre

granos son tangenciales o cóncavo-convexos. Hay fracturas rellenas de calcita. La muestra TD-6 tiene cuarzo monocristalino, algunos granos de origen volcánico, granos de feldespato potásico subangular con substitución de minerales arcillosos, plagioclasas subangulares alargadas, cuarzo policristalino subredondeado, líticos de lutitas, rocas ígneas volcánicas, intraclastos de caliza micrítica, óxidos y circones. Los contactos entre los granos son predominantemente tangenciales y suturados. La textura en general muestra una roca compactada. El cementante corresponde a hematita. Se clasificaron como arenitas arcósicas (Fig. 4.25).

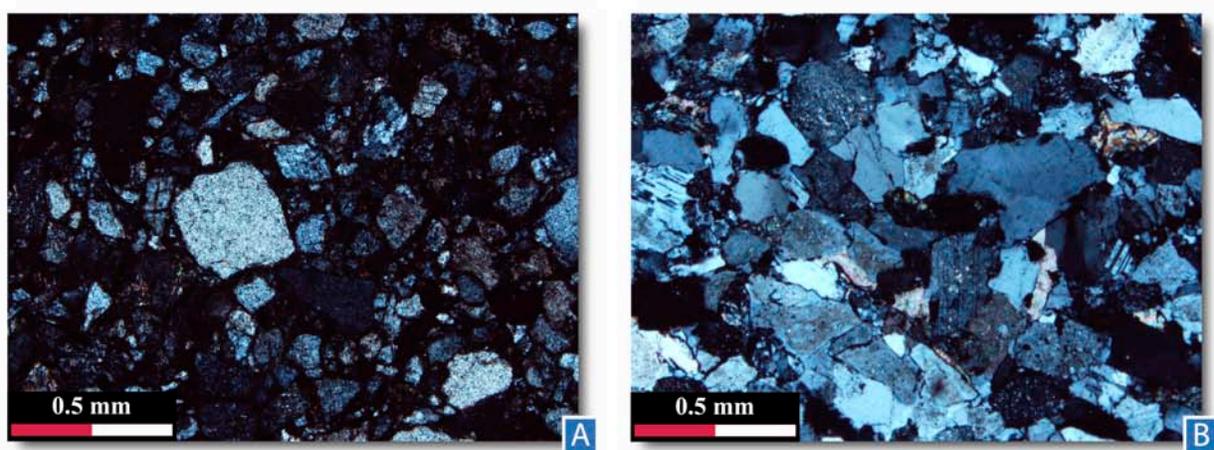


Fig. 4.25. Areniscas de grano medio mal clasificadas pertenecientes a la facies Sm, muestran contactos tangenciales. A) Muestra HIG-68 3 ubicada en el nivel estratigráfico 2 m de la Columna V. B) Muestra TD-6 ubicada en el nivel estratigráfico 32 m de la Columna IV. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

Descripción petrográfica de la facies Gmm

De la facies Gmm se obtuvieron tres muestras: TD-2, TD-3 y TD-4 (Columna IV) (Fig. 4.5). Estas muestras corresponden a la matriz de los conglomerados de la facies Gmm. Se trata de areniscas de grano grueso en las cuales los granos van de subredondeados a subangulares. Están compuestas de fragmentos de cuarzo policristalino, cuarzo monocristalino, feldespato potásico, plagioclasas, líticos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas, fragmentos metasedimentarios y óxidos. La clasificación es mala. Los tipos de contactos predominantes son los tangenciales y suturados. Presentan relleno de calcita en las fracturas y óxidos bordeando a los minerales. Estas muestras por su composición se clasificaron

como arenitas arcósicas (Fig. 4.26).

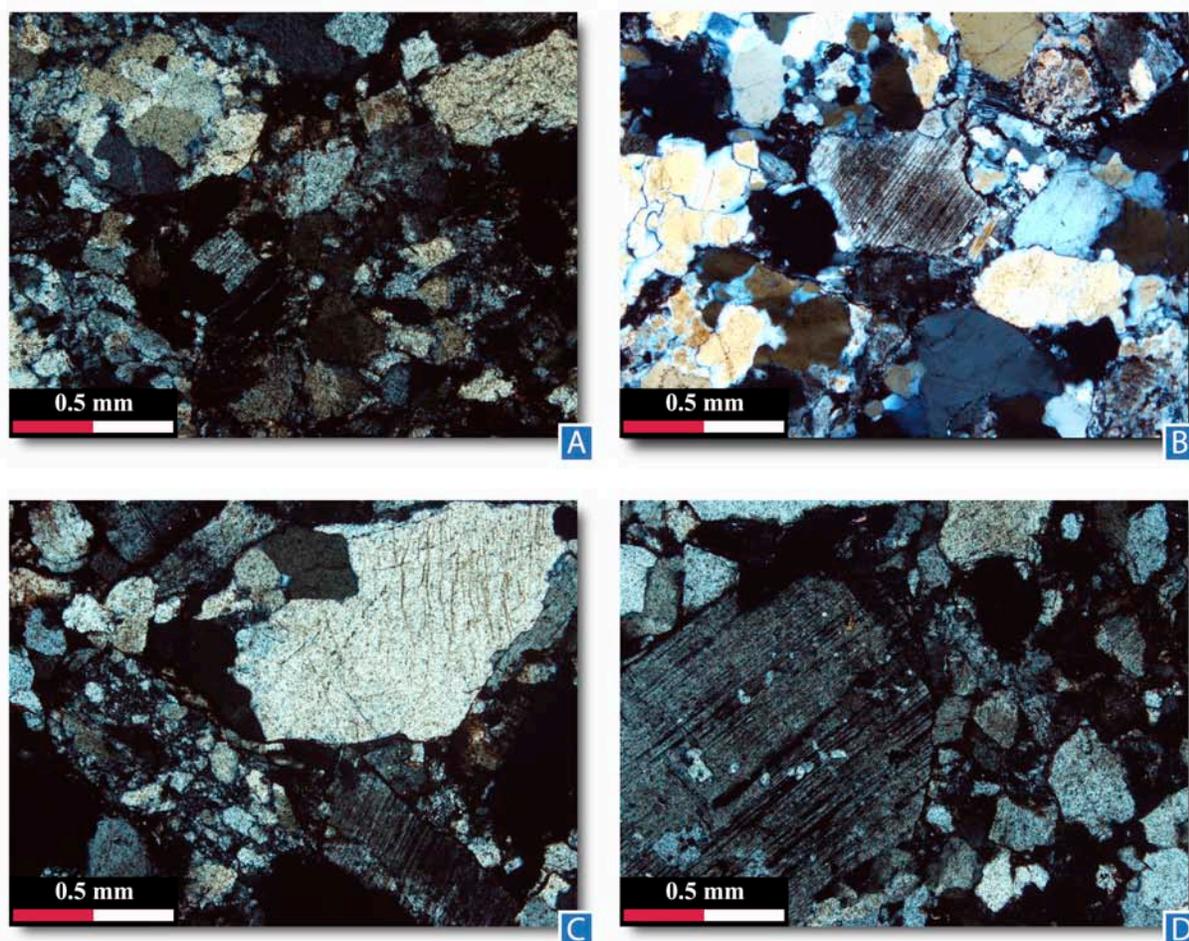


Fig. 4.26. Areniscas de grano grueso presentes en la facies Gmm, se muestra el alto grado de compactación y la composición de cuarzo, cuarzo monocristalino, feldespato y plagioclasas. A) Muestra TD-4, compuesta de fragmentos de cuarzo policristalino, feldespato potásico y plagioclasas. Los tipos de contactos predominantes son los tangenciales y suturados. Presenta relleno de calcita en las fracturas y óxidos bordeando a los minerales. Nivel estratigráfico 7 m de la Columna IV. B) Muestra TD-2, Grano de plagioclasa en contacto con fragmentos de cuarzo policristalino. Nivel estratigráfico 3 m de la Columna IV. C) Muestra TD-3, compuesta por fragmentos subangulares de cuarzo monocristalino, feldespato potásico, plagioclasas y líticos de arenisca embebidos en una matriz de arena media. Presenta mala clasificación. D) Muestra TD-3, feldespato con susbtitución de minerales arcillosos rodeado de granos cuarzo y feldespato subangular. Nivel estratigráfico 6.5 m de la Columna IV. Imágenes obtenidas con nicoles cruzados y con el objetivo 4x.

Descripción petrográfica de la facies Gmg

En la facies conglomerática Gmg se tomaron cuatro muestras de los clastos presentes, todas se ubican en la Columna V (Fig. 4.6).

Las muestras HIG-69-A e HIG-69-C son fragmentos redondeados de rocas metamórficas compuesta de cuarzo policristalino, plagioclasa y feldespato potásico que se clasificaron como esquistos debido a su textura foliada (Fig. 4.27 A y C).

La muestra HIG-69 B es una arenisca conformada por granos de arena media que a simple vista muestra laminación burda. Sus granos son subangulares. La clasificación es buena. Su composición es de cuarzo monocristalino, plagioclasas y óxidos. La matriz es de arena fina y limo y los contactos son puntuales. Esta muestra por su composición puede considerarse de acuerdo a la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn *et al.* (1972) como una cuarzoarenita (Fig. 4.27 B).

La muestra HIG-69 D es una roca ígnea de textura porfídica de composición gabroica. La composición de los fenocristales en la muestra corresponde a plagioclasas y anfíboles y estos se encuentran embebidos en una matriz de plagioclasas (Fig. 4.27 C).

Descripción petrográfica de la facies Gci

La muestra HIG-50 se encuentra en la Columna V (Fig. 4.8) y corresponde a la matriz arenosa de los conglomerados de la facies Gci. Es una arenisca de grano muy grueso con mala clasificación, compuesta por fragmentos subangulares de cuarzo policristalino y líticos de gablo, granito y arenisca de grano fino, embebidos en una matriz de arena media. Los granos van de subredondeados a subangulares. Los contactos son esencialmente puntuales. Esta muestra por su composición puede considerarse de acuerdo a la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn *et al.* (1972) como una arenita lítica (Fig. 4.28).

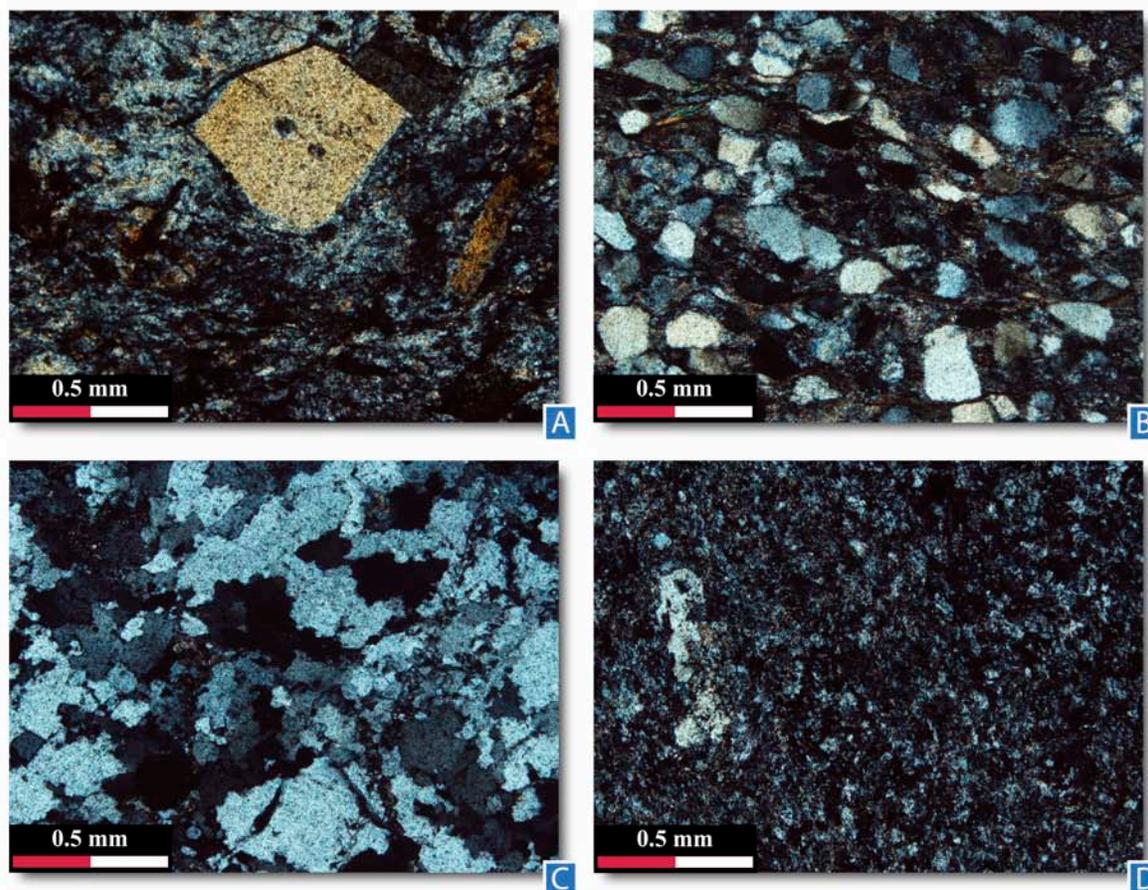


Fig. 4.27. Clastos de los conglomerados de la facies Gmg. A) Foliación en clásto metamórfico. Muestra HIG-69-A. B) Clásto de cuarzoarenita de arena media. Muestra HIG-69-B. C) Cuarzo policristalino presente en muestra de clásto metamórfico. Muestra HIG-69-C. D) Roca ígnea de composición básica con textura porfídica. Muestra HIG-69-D. Nivel estratigráfico 15 m de la Columna V. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

Descripción petrográfica de la facies Ai

La muestra SDT-63 se encuentra en la Columna II (Fig. 4.4) y ha sido descrita como arenisca de granos muy gruesos y subangulares. La muestra presenta una matriz de arena fina y está muy mal clasificada. Está compuesta de fragmentos de caliza micrítica con restos de ostrácodos y sedimentos, cuarzoarenita de grano fino, limolita, arenita arcósica de grano medio, granito, cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino, feldespatos potásico y moscovita. Los tipos de contactos son puntuales, aunque pueden presentarse algunos tangenciales. Presenta relleno de calcita en las fracturas y óxidos. Esta muestra por su composición puede clasificarse de acuerdo a la clasificación de Dott (1964) y Pettijohn

et al. (1972) como una arenita lítica (Fig. 4.29).

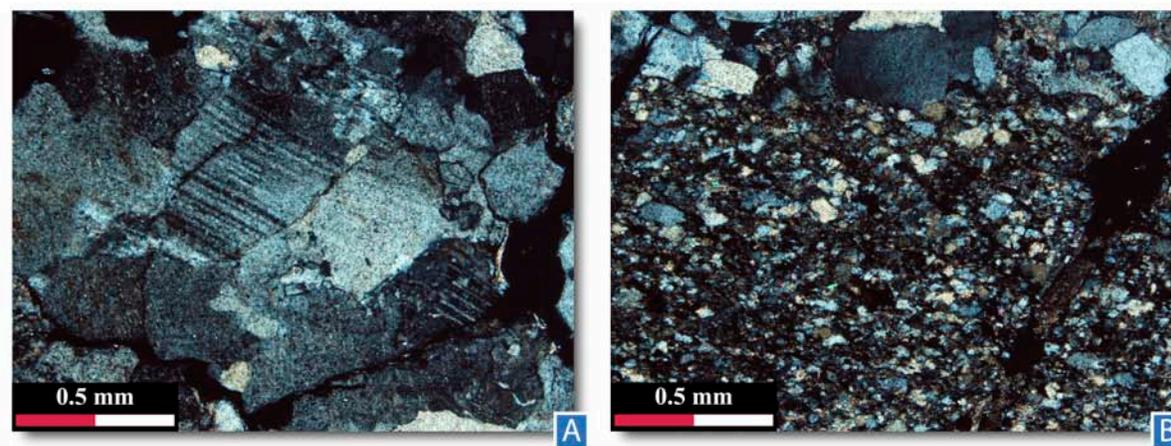


Fig. 4.28. Muestra petrográfica HIG-50 de la facies Gci. A) Lítico de intrusivo granítico en el que se identifican cristales de plagioclasa, cuarzo y feldespato. B) Lítico de arenisca de grano muy fino. Nivel estratigráfico 18 m de la Columna V. Imágenes obtenidas con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

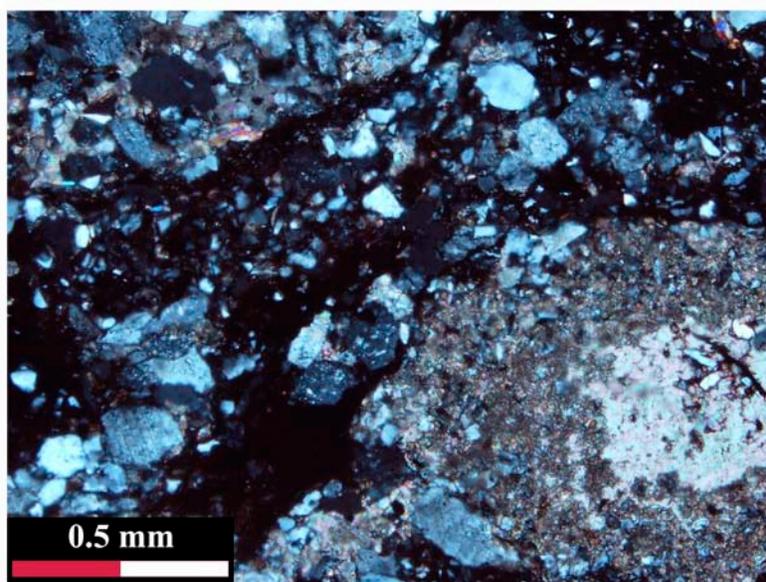


Fig. 4.29. Fotomicrografía de la muestra SDT-63 compuesta de intraclastos de caliza micrítica con restos de ostrácodos y sedimentos rodeado de fragmentos de cuarzoarenita de grano fino, plagioclasas y cuarzo. Nivel estratigráfico 63 m de la Columna II. Imagen obtenida con nícoles cruzados y con el objetivo 4x.

4.5.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Se colectaron veintinueve muestras, de las cuales ocho corresponden a clástos de conglomerados y veintiuno a rocas de origen clástico. La clasificación por medio del análisis petrográfico permitió distinguir en las rocas de origen clástico siete limolitas, doce arenitas arcósicas y dos arenitas líticas. Por otro lado en los clástos de conglomerados fueron identificados cinco ejemplares de rocas ígneas, dos de rocas metamórficas y una arenisca.

En la composición de las rocas clásticas se observó la presencia constante de varios componentes como el cuarzo, feldespatos. Los líticos presentes son de origen ígneo: granítico y gabroico; cuarzoarenitas de grano fino, limolitas, arenita arcósica y caliza micrítica con restos de ostrácodos.

Las limolitas se encuentran distribuidas a lo largo de las cinco columnas registradas en este estudio y su composición no refleja una variación importante o que obedezca a un arreglo específico; en cambio, en las areniscas arcósicas se observó que su contenido de líticos aumenta en aquellas que se encuentran hacia el Oeste del área de estudio, así mismo, las dos muestras de arenitas líticas se encuentran confinadas en las regiones occidental y central de la zona de interés.

Se observó que de los ocho clástos estudiados tres pertenecen a rocas ígneas de composición granítica, dos a rocas gabroicas, dos a esquistos y uno a areniscas de grano medio.

No se realizó un muestreo de amplio espectro debido a que la procedencia no es uno de los objetivos de este trabajo.

Los líticos encontrados en las facies de arenas con intraclástos (AI) se infiere por su contenido biogénico que son un retrabajo de material perteneciente a la cuenca Otlaltepec. Sin embargo, se desconoce la procedencia de los clástos volcánicos y de arenisca.

CAPÍTULO 5

TECTÓNICA SINSEDIMENTARIA

La actividad tectónica ejerce un control fundamental durante el relleno sedimentario una cuenca. El producto de esta interacción es complicado debido a los factores adicionales que pueden influir en los depósitos, incluyendo aquellos como la erosión, el transporte sedimentario, el ambiente de depósito, el clima imperante durante la sedimentación y la distancia de la cuenca con respecto a las regiones marinas.

Como producto de la actividad tectónica sinsedimentaria puede presentarse deformación estructural o arreglos particulares en los sedimentos (Tom McCann y Aline Saintot, 2003). Las evidencias de la deformación sinsedimentaria son variadas y pueden incluir desde pliegues, discordancias, fallas de crecimiento, rotaciones, formación de brechas sinsedimentarias y existencia de ciertos ambientes de depósito (e.g. ambientes fluviales y/o aluviales) relacionados con el desarrollo de grandes estructuras como fallas normales, fallas lítricas, o grabens en el caso de una tectónica extensional.

En este capítulo se presentaran las evidencias de la existencia de actividad tectónica durante el relleno de la cuenca Otlaltepec durante el Jurásico. Cada tipo de estructura fue analizada por separado para determinar los principales esfuerzos asociados a su formación. Se hace un énfasis especial en aquellas estructuras presentes en las rocas de la formación Tianguistengo debido a que esta es el objeto principal de este estudio. Las evidencias estudiadas se presentan en el siguiente orden en este capítulo:

- Discordancias entre las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec.
- Fallas sinsedimentarias en la formación Tianguistengo.
- Discordancias internas en la formación Tianguistengo.
- Familias de fallas en las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec.
- Brechas y deformación sinsedimentaria en la formación Tianguistengo.

5.1 DISCORDANCIAS ENTRE LAS FORMACIONES TIANGUISTENGO, PIEDRA HUECA Y OTLALTEPEC

Las fallas lítricas se puede definir como fallas normales curvas que se caracterizan por hacerse subhorizontales a profundidad. Estas fallas ocurren en regímenes extensionales (Wernicke and Burchfiel, 1981) (Fig. 5.1).

La importancia de las fallas lítricas en la formación de cuencas sedimentarias ha sido reconocida progresivamente gracias al uso de técnicas geofísicas aplicadas al estudio del subsuelo, afortunadamente también es posible detectar su existencia por observaciones de campo en superficie (Bally *et al.*, 1981; Shelton, 1984).



Fig. 5.1. Modelo experimental de falla lítrica mostrando el secuencial desarrollo de grabens y sucesiva inclinación de las capas. El graben 1 es el más antiguo y el 4 es el más joven (Naylor, *et al.*, 1994).

De las fallas lítricas se han distinguido cuatro tipos generales de acuerdo a información obtenida por secciones sísmicas: 1) Fallas que involucran el basamento de una región asociadas a la formación de rifts que preceden la existencia de márgenes continentales pasivas, 2) fallas desarrolladas en sedimentos no consolidados relacionados con sistemas deltaicos o subsidencia en márgenes continentales pasivas, 3) fallas asociadas a la génesis de prismas de acreción en márgenes continentales activas y 4) las asociadas a fallamiento post y sinorogénico (Bally *et al.*, 1981; Shelton, 1984).

La progresiva horizontalidad de la falla refleja un incremento en la ductilidad de las rocas a profundidad. Estudios de laboratorio y modelos teóricos sugieren que este tipo de fallas se forma en rocas frágiles que descansan sobre rocas dúctiles en un régimen extensional o transtensional (Shelton, 1984).

Las fallas lítricas sinsedimentarias usualmente son fallas de crecimiento, anteriormente se creía que este tipo de fallas sólo ocurría en rocas sedimentarias, pero estudios posteriores demostraron que también pueden ocurrir en el basamento de una región. Es posible que se desarrollen fallas lítricas pequeñas y estructuras en echelon (Shelton, 1984).

Aunque la mejor evidencia de la existencia de una falla lítrica son las imágenes de tomografías sísmicas, hay otro tipo de datos que pueden ser de utilidad, por ejemplo el incremento del valor del echado en los estratos que se encuentran en el bloque de techo conforme aumenta la profundidad (o la edad) de los mismos, mientras que aquellos que se encuentran sobre el bloque de piso muestran una mínima o nula rotación (Shelton, 1984; Spahic, *et al.*, 2011) la zona de estudio presenta este tipo de arreglo.

5.1.1 MODELO DE SEDIMENTACIÓN SINTECTÓNICA BASADO EN DATOS DE ESTRATIFICACIÓN

Cuando una o más fallas se encuentran activas durante el depósito en una cuenca sedimentaria es posible que estas generen algunas características distintivas, por ejemplo la presencia de discordancias angulares en el registro sedimentario (en diversas escalas). En la cuenca Otlaltepec, en la región de Santo Domingo Tianguistengo, se han documentado al menos dos discordancias mayores que podrían ser consideradas como una evidencia de tectónica sinsedimentaria.

Teniendo en cuenta estos factores es posible que a partir de la variación en los valores de rumbo y echado de los estratos de las tres sucesiones sedimentarias (formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec) identificadas en la cuenca Otlaltepec, pueda obtenerse una orientación aproximada de la o las fallas que influyeron en la geometría de la sedimentación de estas unidades.

La metodología para generar este modelo de sedimentación sintectónica consistió en tomar datos estructurales de estratificación de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en quince

localidades en el área de estudio. Las localidades fueron agrupadas en cinco sectores (Sector 1, 2, 3, 4 y 5) para facilitar el procesamiento de la información (Fig. 5.2).

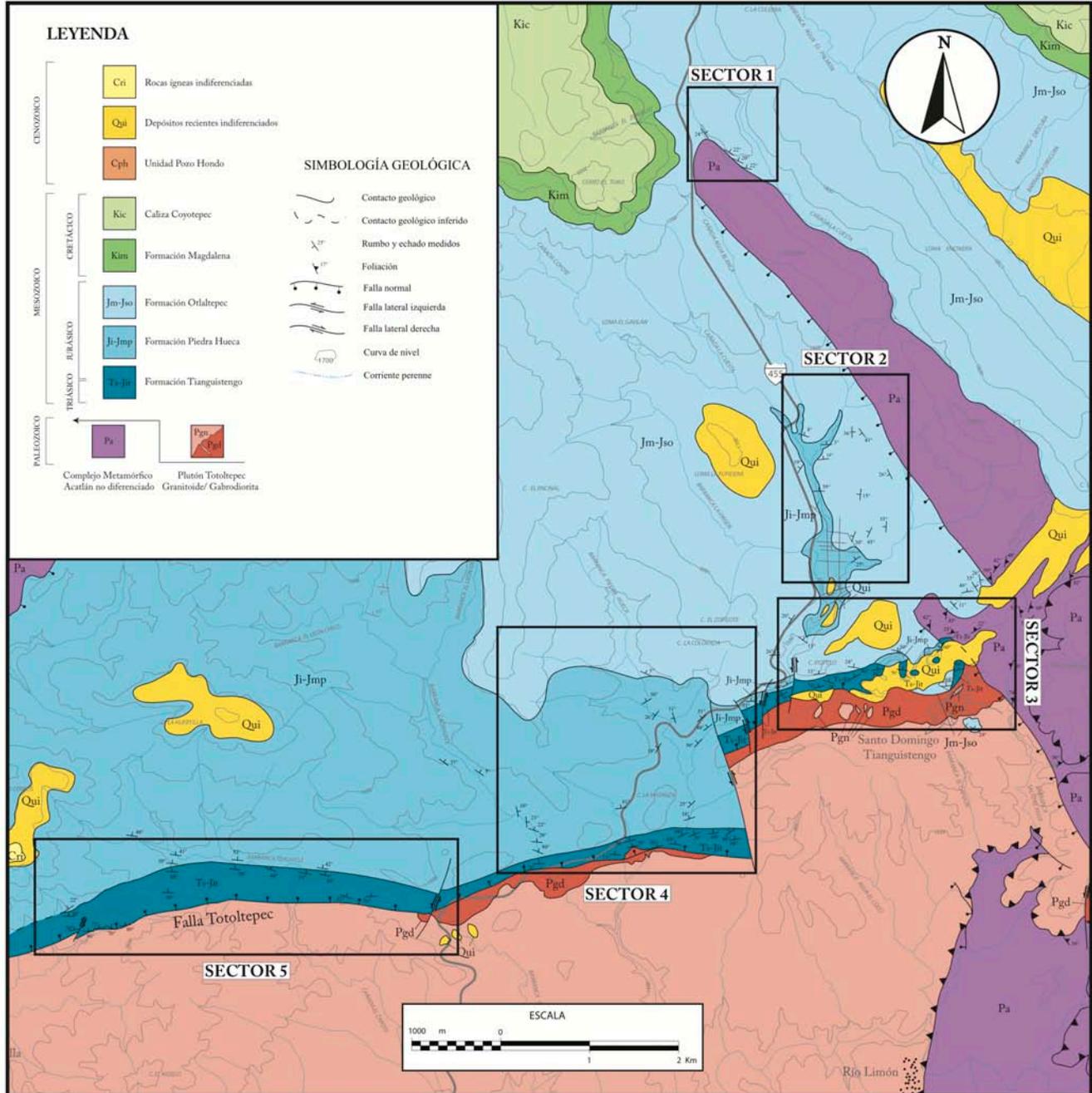


Fig. 5.2. Sectores 1, 2, 3, 4 y 5 ubicados en el mapa geológico de área de estudio.

El listado de los datos estructurales pueden encontrarse en el Apéndice I (Tablas AI.I, AI.II, AI.III, AI.IV y AI.V). Todos los datos fueron tomados de acuerdo con la regla de la mano derecha y se procuró que estuvieran distanciados de zonas de falla, aunque en algunas zonas no fue del todo posible.

El Sector 1 se encuentra al norte del área de estudio y comprende datos tomados a lo largo de la Barranca El Chorrillo donde aflora la Formación Otlaltepec. En el Sector 2 afloran las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec y comprende los datos tomados en la Barranca Agua León y las inmediaciones el Poblado Santa Cruz Nuevo. El Sector 3 está compuesto de las localidades Barranca Magdalena 1, Barranca Magdalena 2, Barranca Rincón El Coco, Cerro Xiotillo y Poblado de Santo Domingo Tianguistengo, en las cuales afloran las tres sucesiones. El Sector 4 consta de las localidades Cerro La Matanza, Barranca Piedra Hueca y Barranca Cazahuate, donde afloran las tres sucesiones sedimentarias. Finalmente, el Sector 5 en la región occidental del área de estudio comprende los datos obtenidos en la Barranca Tedigno 1, Barranca Tedigno 2 y el Cerro Alegría donde se encuentran las formaciones Tianguistengo y Piedra Hueca.

Posteriormente, estos valores se ingresaron al software OSXStereonet Versión 2.1 para obtener la representación gráfica de los planos de estratificación en una proyección estereográfica equiangular (Red de Wulff). Las sucesiones son representadas por diferentes colores y como polos para evidenciar la evolución de la sedimentación y diferenciarlas con mayor facilidad (Fig. 5.3).

En general, se observó que los datos tomados en la Formación Tianguistengo se encuentran mas cercanos a un plano vertical que aquellos obtenidos en las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec. Es notorio que los planos de estratificación migran hacia el plano horizontal conforme es más joven la sucesión (Fig. 5.3, A.1.1 y A.1.2 del Apéndice I).

Para facilitar la interpretación de la información y realizar la corrección a la horizontal de las formaciones sedimentarias se calculó el valor de rumbo y buzamiento promedio de las sucesiones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en cada sector. Estos valores se obtuvieron con el software OSXStereonet Versión 2.1 con diagramas de densidad y calculando el vector Fisher de cada una de las formaciones basados en el método propuesto por Ramsay, 1967 y Fisher *et al.*, 1987. Los resultados de este procesamiento se presentan en la tabla 5.1.

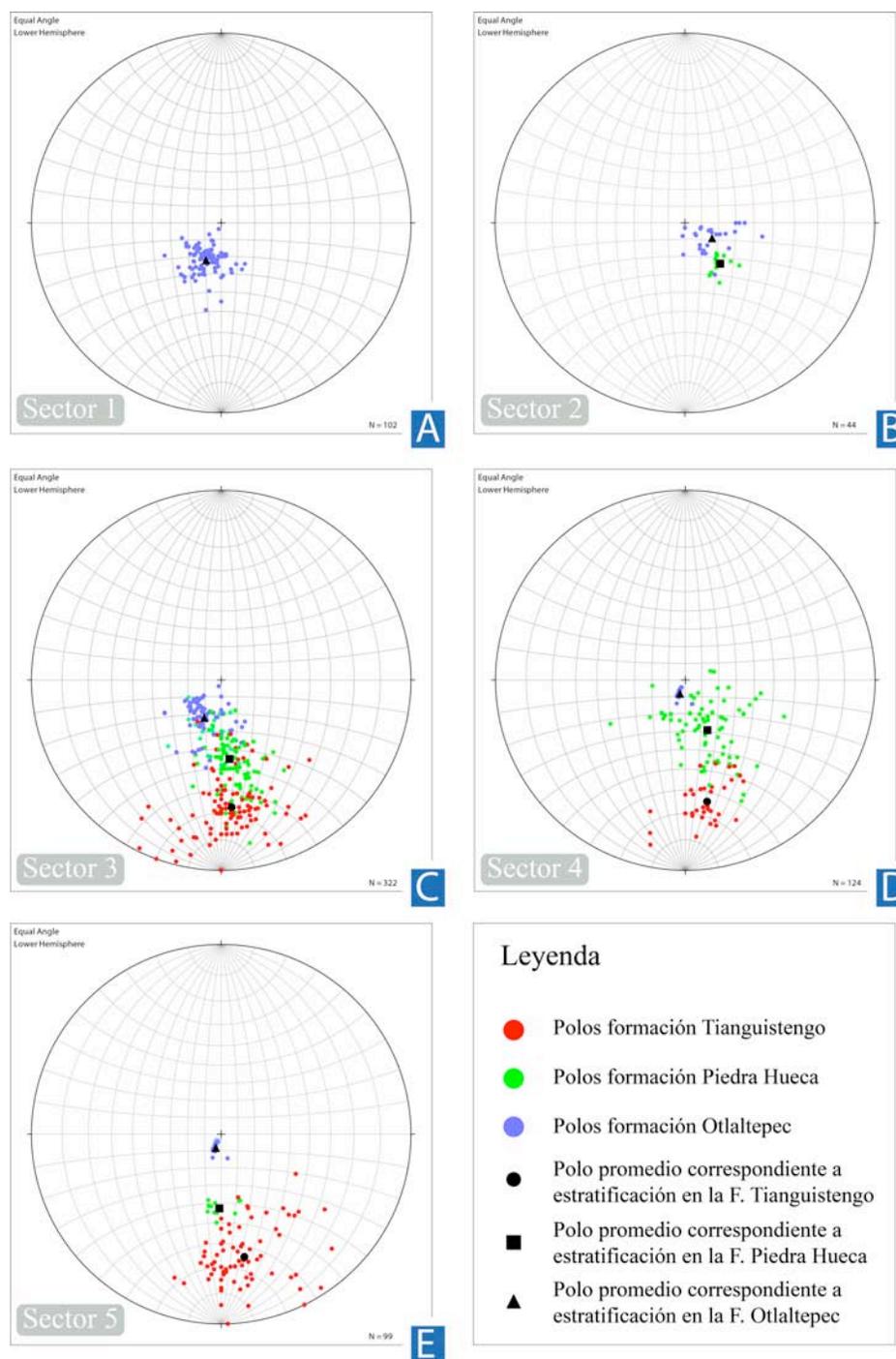


Fig. 5.3. Diagramas estereográficos en los que se observan los datos (Apéndice I. Tablas AI.I, AI.II, AI.III, AI.IV y AI.V) de cada una de las sucesiones en los cinco sectores. Se optó por representar los valores como polos en la Red de Wulff y diferenciados por colores (OSXStereonet Versión 2.1) A) Sector 1. B) Sector 2. C) Sector 3. D) Sector 4. E) Sector 5. En negro se presentan los valores de rumbo y buzamiento promedio de cada formación.

| SECTOR | FORMACIONES | LOCALIDAD | CANTIDAD DE DATOS ESTRUCTURALES | RUMBO Y BUZAMIENTO PROMEDIO |
|--------|---------------|---|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Otlaltepec | Barranca El Chorrillo | 101 | 292°/24° |
| | Piedra Hueca | Poblado Santa Cruz Nuevo | 13 | 229°/31.7° |
| 2 | Otlaltepec | Barranca Agua León y Poblado Santa Cruz Nuevo | 27 | 209.5°/18.7° |
| 3 | Tianguistengo | Barranca Magdalena 1, Barranca Magdalena 2, Cerro Xiotillo y Poblado de Santo Domingo Tianguistengo | 121 | 265.3°/67.6° |
| | Piedra Hueca | Barranca Magdalena 1, Cerro Xiotillo y Poblado de Santo Domingo Tianguistengo | 122 | 264°/45° |
| | Otlaltepec | Barranca Magdalena 1, Barranca Rincón El Coco y Poblado de Santo Domingo Tianguistengo | 77 | 294.6°/24.4° |
| 4 | Tianguistengo | Cerro La Matanza y Barranca Cazahuate, | 35 | 260°/66° |
| | Piedra Hueca | Cerro La Matanza, Barranca Piedra Hueca y Barranca Cazahuate, | 73 | 246°/32° |
| | Otlaltepec | Barranca Piedra Hueca | 13 | 291°/9° |
| 5 | Tianguistengo | Barranca Tedigno 1, Barranca Tedigno 2 y el Cerro Alegría | 72 | 259.3°/66.7° |
| | Piedra Hueca | Barranca Tedigno 2 | 11 | 271.4°/42.7° |

Tabla 5.1. Valores promedio de rumbo y buzamiento para las sucesiones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en cada uno de los cinco sectores.

Una vez obtenidos los rumbos y buzamientos promedio de las unidades sedimentarias en cada sector se procedió a realizar una restauración a la paleohorizontal de los paquetes sedimentarios presentes. Se les denominó a estos estadios como T₃, T₂, T₁ y T₀ (Fig. 5.4).

- T₃. Representa el momento donde las formaciones Tianguistengo (T), Piedra Hueca (PH) y Otlaltepec (O) se encuentran depositadas e inclinadas, es decir Post-Jurásico.

- T₂. Representa el momento de depósito de la formación Otlaltepec (O'), es decir donde esta se encontraba horizontal. Tianguistengo (T') y Piedra Hueca (PH') se encontraban ya depositadas e inclinadas, Jurásico Superior.

- T₁. Representa el momento de depósito de la formación Piedra Hueca (PH''), es decir donde está se encuentra horizontal. Tianguistengo (T'') se encontraba depositada e inclinada. Otlaltepec aún no se había depositado, Jurásico Medio.

- T₀. Representa el momento de depósito de la formación Tianguistengo (T'''). Piedra Hueca y Otlaltepec aún no se habían depositado, Jurásico Inferior.

Las variaciones en los rumbos y buzamientos promedio de cada una de las poblaciones pueden asociarse a un posible cambio de orientación del plano de falla y por lo tanto un cambio en el polo de rotación de cada formación en cada sector. Los estratos con diversas orientaciones e inclinaciones son probablemente el resultado de una rotación originada por una o varias fallas. Teniendo en cuenta esto último se estableció que cada población, en cada sector, contaría con un plano perpendicular que representaría el plano de falla que controló la rotación de los depósitos, este plano de falla contiene al polo correspondiente al plano de rumbo y buzamiento promedio de cada unidad sedimentaria. A continuación se describe el proceso para cada una de las sucesiones, en cada sector, en los estadios T₃, T₂, T₁ y T₀. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 5.1 y las figuras A.1.3, A.1.4, A.1.5 y A.1.6 del Apéndice I. En el caso del Sector 5 se consideró el valor promedio de Otlaltepec del Sector 4 para la rotación la paleohorizontal.

El método realizado en cada sector puede resumirse de la siguiente manera:

- i. La orientación de falla asociada al depósito de cada formación se obtuvo llevando el valor polo promedio de cada sucesión a un plano perpendicular para obtener el plano de falla. A este momento de depósito se le llamo T₃.

- ii. Se restauró a la horizontal la formación Otlaltepec con lo cual otras sucesiones regresaron a su posición original cuando inicio el depósito de Otlaltepec; a estas se les llamo T', PH' y O' (correspondientes a las unidades Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec). A este momento de depósito se le llamo T₂.

5.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE DATOS DE ESTRATIFICACIÓN

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.3. Se observó que algunos de los resultados son similares en diversos sectores, a continuación un resumen de los mismos:

- Formación Tianguistengo. En el estadio T_3 (Post-Jurásico), la falla asociada a la inclinación de esta unidad sedimentaria tuvo una orientación de $85.3^\circ/22.4^\circ$ (Sector 3), $80^\circ/24^\circ$ (Sector 4) y $79.3^\circ/23.3^\circ$ (Sector 5). Para el estadio T_2 , (Jurásico Superior), la falla tuvo una orientación de $76.3^\circ/43^\circ$ (Sector 3), $77.3^\circ/31.6^\circ$ (Sector 4) y $77^\circ/31^\circ$ (Sector 5). Para el estadio T_1 (Jurásico Medio), la falla tuvo una orientación de $92.3^\circ/67.5^\circ$ (Sector 3), $90^\circ/54.6^\circ$ (Sector 4) y $66.3^\circ/64^\circ$ (Sector 5) (Figs. A.1.3, A.1.4, A.1.5 y A.1.6 del Apéndice I).

- Formación Piedra Hueca. En el estadio T_3 (Post-Jurásico), la falla asociada a la rotación de esta unidad sedimentaria tuvo una orientación de $49^\circ/58.3^\circ$ (Sector 2), $84^\circ/45^\circ$ (Sector 3), $66^\circ/58^\circ$ (Sector 4) y $91.4^\circ/47.3^\circ$ (Sector 5). En el estadio T_2 (Jurásico Superior), la falla asociada a la rotación de ésta unidad sedimentaria tuvo una orientación de $71.5^\circ/74.7^\circ$ (Sector 2), $60.6^\circ/63.4^\circ$ (Sector 3), $53.4^\circ/63.7^\circ$ (Sector 4) y $87.3^\circ/55.6^\circ$ (Sector 5) (Figs. A.1.3, A.1.4 y A.1.5 del Apéndice I).

- Formación Otlaltepec. En el estadio T_3 (Post-Jurásico), la falla asociada a la rotación de esta unidad sedimentaria tuvo una orientación de $112^\circ/66^\circ$ (Sector 1), $29^\circ/71.3^\circ$ (Sector 2), $114.6^\circ/65.8^\circ$ (Sector 3) y $111^\circ/81^\circ$ (Sector 4) (Figs. A.1.3 y A.1.4 del Apéndice I).

Los esfuerzos σ_3 asociados a los respectivos planos de falla de cada sector puede observarse en la Tabla 5.3 y en la figura 5.5. De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que en general los esfuerzos distensivos σ_3 , relacionados con el aumento en el valor de buzamiento de las formaciones Tianguistengo y Piedra Hueca, tiene una orientación aproximada N-S, mientras que para la Formación Otlaltepec tienen una orientación aproximada 21° y 201° . Específicamente en el Sector 2 se observa una orientación de $119^\circ/299^\circ$ para la formación Otlaltepec, pero esta diferencia se atribuye a la acción de la Falla Tianguistengo en la zona.

El cálculo de las fallas que controlaron la sedimentación y orientaciones de los esfuerzos σ_3 durante los Estadios T_3 , T_2 y T_1 se utilizó para proponer un modelo de depósito de la cuenca Otlaltepec en la región de Santo Domingo Tianguistengo, el cual se presenta en el Capítulo 7 de este trabajo.

| ESTADIO | DATOS | SECTOR 1 | | | SECTOR 2 | | | SECTOR 3 | | | SECTOR 4 | | | SECTOR 5 | | |
|---------|-----------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | O | PH | T | O | PH | T | O | PH | T | O | PH | T | O | PH | T |
| T3 | Estratificación | 292°/24° | 209.5°/18.7° | 229°/51.7° | 294.6°/24.4° | 264°/45° | 265.3°/67.6° | 291°/9° | 246°/32° | 260°/66° | 291°/9° | 246°/32° | 260°/66° | 291°/9° | 271.4°/42.7° | 259.3°/66.7° |
| | Falla | 112°/66° | 29°/71.3° | 49°/58.3° | 114.6°/65.8° | 84°/45° | 85.3°/22.4° | 111°/81° | 66°/58° | 80°/24° | 111°/81° | 66°/58° | 80°/24° | 111°/81° | 91.4°/47.3° | 79.3°/23.3° |
| | σ3 | 22° y 202° | 119° y 299° | 139° y 319° | 24° y 204° | 174° y 354° | 175° y 355° | 21° y 201° | 156° y 336° | 170° y 350° | 21° y 201° | 156° y 336° | 170° y 350° | 21° y 201° | 1° y 181° | 169° y 344° |
| T2 | Estratificación | 0°/0° | 0°/0° | 251.5°/15.3° | 0°/0° | 240.6°/26.6° | 256.6°/47° | 0°/0° | 233.4°/26.3° | 257.3°/58.4° | 0°/0° | 233.4°/26.3° | 257.3°/58.4° | 267.3°/54.4° | 257°/59° | |
| | Falla | ----- | ----- | 71.5°/74.7° | ----- | 60.6°/63.4° | 76.3°/43° | ----- | 53.4°/63.7° | 77.3°/51.6° | ----- | 53.4°/63.7° | 77.3°/51.6° | 87.3°/55.6° | 77°/51° | |
| | σ3 | ----- | ----- | 161° y 341° | ----- | 151° y 331° | 166° y 346° | ----- | 143° y 323° | 167° y 347° | ----- | 143° y 323° | 167° y 347° | 177° y 357° | 167° y 347° | |
| T1 | Estratificación | ----- | ----- | 0°/0° | ----- | 0°/0° | 272.3°/22.5° | ----- | 0°/0° | 270°/55.4° | ----- | 0°/0° | 270°/55.4° | 0°/0° | 246.3°/26° | |
| | Falla | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 92.3°/67.5° | ----- | ----- | 90°/54.6° | ----- | ----- | 90°/54.6° | ----- | 66.3°/64° | |
| | σ3 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 2° y 182° | ----- | ----- | 180° y 360° | ----- | ----- | 180° y 360° | ----- | 156° y 336° | |
| T0 | Estratificación | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | T°/3° | ----- | ----- | T°/3° | ----- | ----- | T°/3° | ----- | T°/3° | |
| | Falla | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 0°/0° | ----- | ----- | 0°/0° | ----- | ----- | 0°/0° | ----- | 0°/0° | |
| | σ3 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | |

Tabla 5.2. Estratificación, planos de falla y esfuerzos que influyeron en la inclinación de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlattepec.

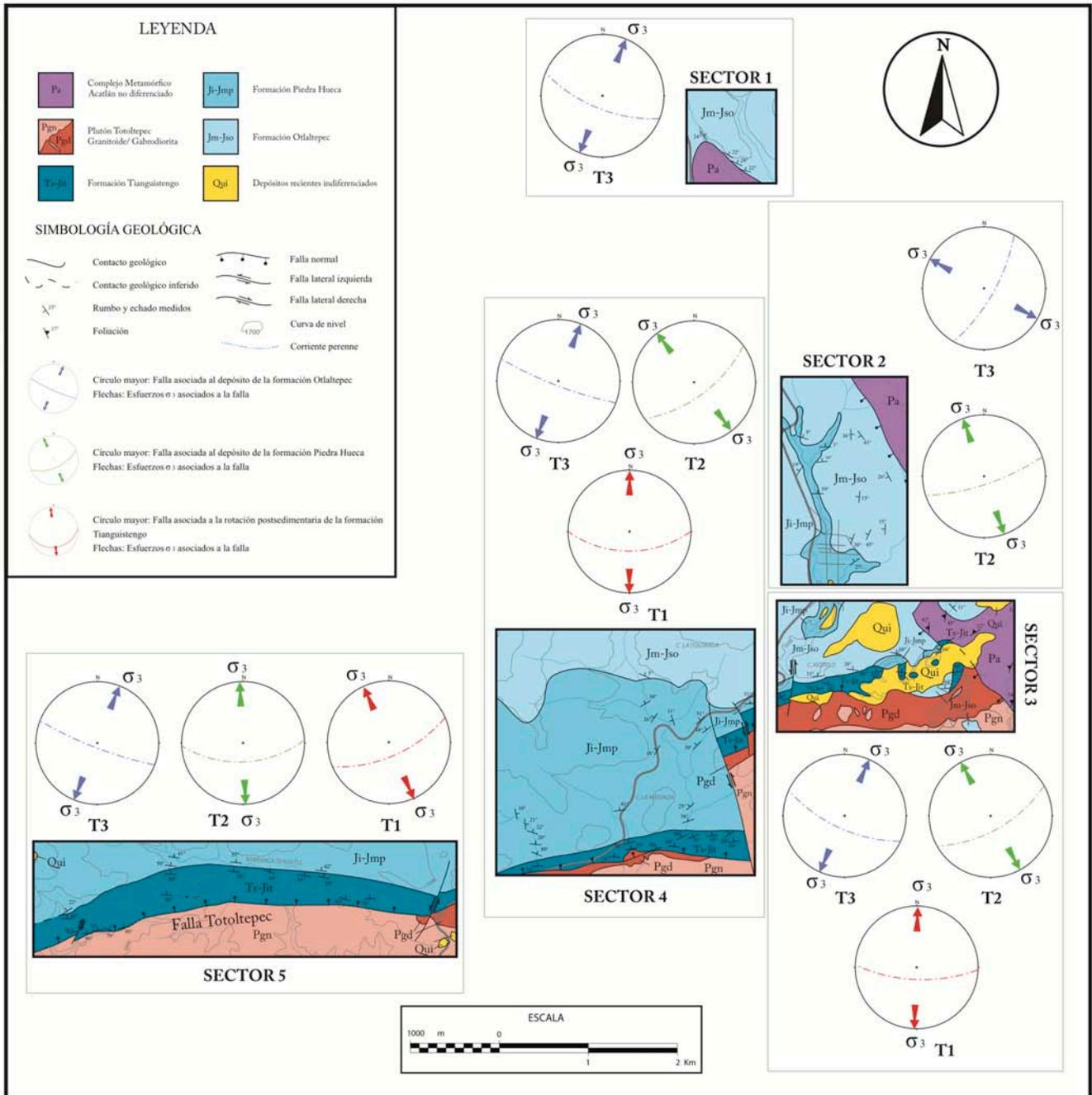


Fig. 5.5. Mapa geológico con las orientaciones de la falla asociada a la inclinación y depósito de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en los Sectores 1, 2, 3, 4 y 5, además se muestran las orientaciones de los esfuerzos σ_3 asociados a la formación de dichas fallas. Red de Wulff (OSXStereonet Versión 2.1).

5.2 FALLAS SINSEDIMENTARIAS EN LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

De acuerdo con la literatura (Middleton, 2003; Nichols, 2009), las fallas de crecimiento son estructuras sinsedimentarias, es decir, que tienen lugar durante el depósito de un estrato. El fallamiento ocurre en uno o varios estratos y se propaga sólo en ciertos niveles stratigráficos. Las fallas de crecimiento pueden ser distinguidas de fallamiento post-deposicional porque la falla sólo afecta a una parte de la sucesión sedimentaria, por lo que las capas superiores se depositan horizontalmente sobre las capas afectadas.

Los patrones de deformación en una sucesión sedimentaria pueden proveer información acerca de esfuerzos tectónicos presentes durante el depósito. Así pues, las fallas sinsedimentarias son evidencia de actividad tectónica durante la sedimentación. Este tipo de estructuras, que actúan como fallas normales, son evidencia de un ambiente tectónico extensional (Nichols, 2009) (Fig. 5.6).

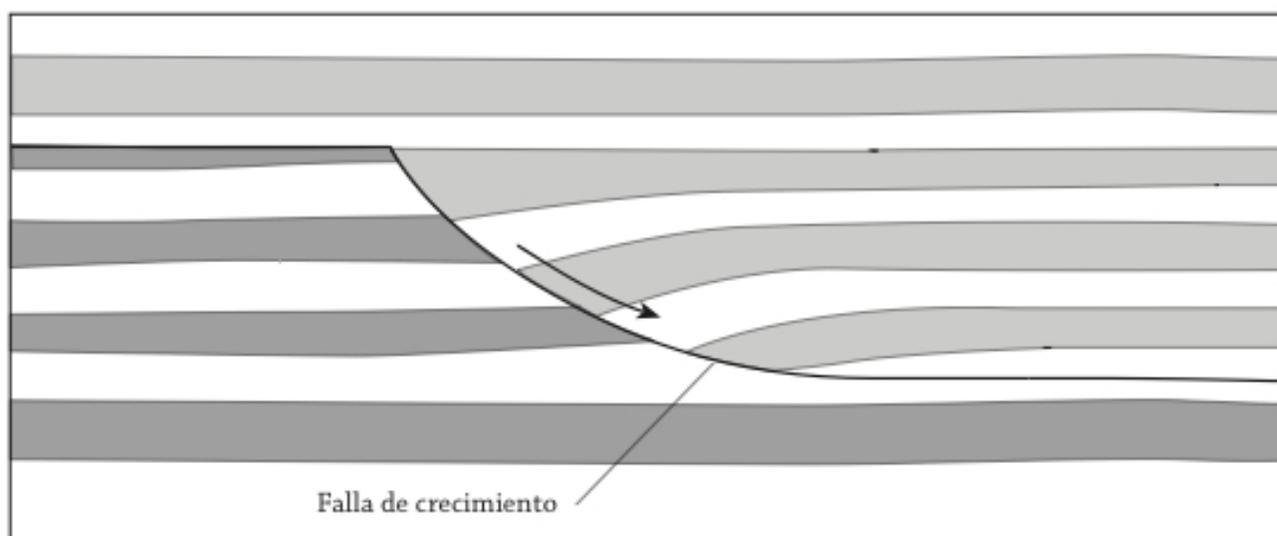


Fig. 5.6. Esquema que muestra la apariencia de una falla sinsedimentaria. Modificado de Nichols, 2009.

5.2.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FALLAS SINSEDIMENTARIAS EN LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

Durante el trabajo de campo se reconoció la existencia de fallas sinsedimentarias en las rocas de la formación Tanguistengo (Fig. 5.7). A fin de determinar los esfuerzos presentes durante el depósito

de los sedimentos en el Estadio T₀ (Jurásico Inferior) y el desarrollo de las fallas sinsedimentarias, se colectaron datos de rumbo y buzamiento de sesenta y un fallas distribuidas en treinta afloramientos en el área de estudio. La ubicación de dichos afloramientos y los datos colectados se indican en la Tabla AII.I (Apéndice I).

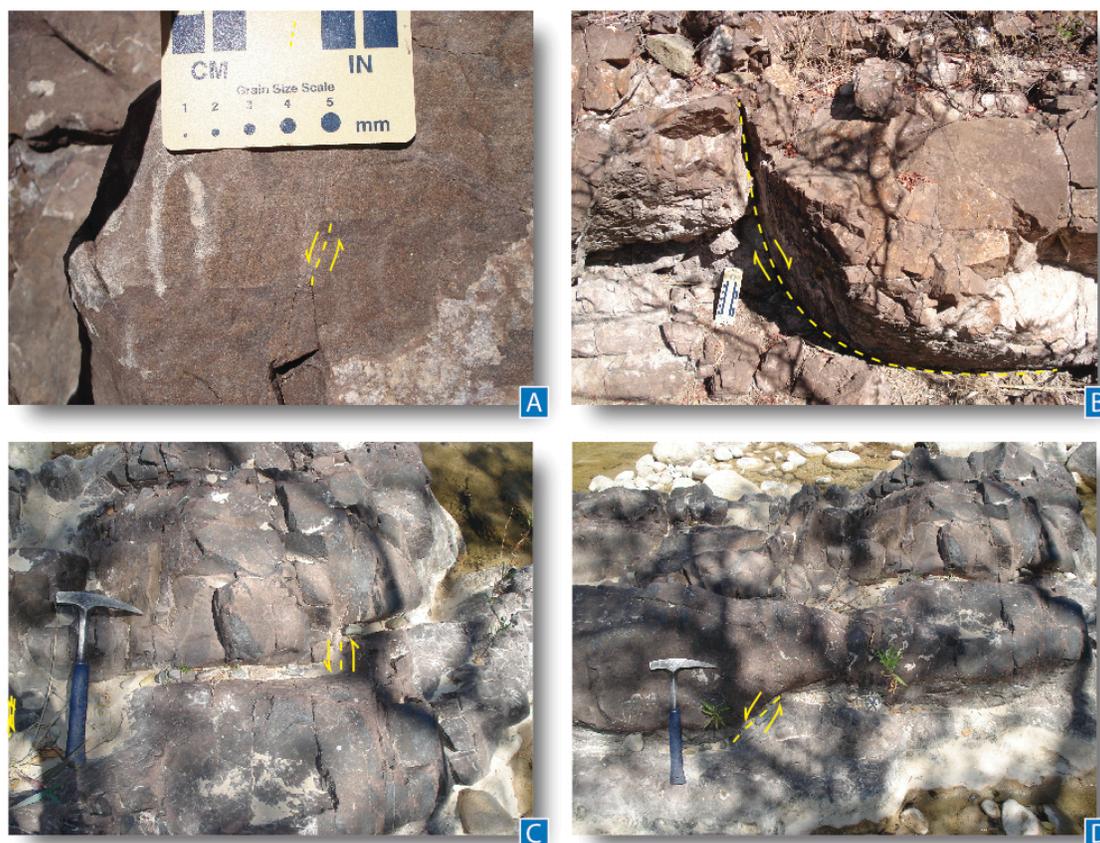


Fig. 5.7. Afloramientos que muestran la presencia de fallas sinsedimentarias. Localidades sobre el lecho del Río Magdalena. A) Afloramiento 4. B) Afloramiento 3. C y D) Afloramiento 5. E) Afloramiento 6. F) Afloramiento 8. Dimensión del martillo 41 cm.

El método utilizado para realizar este análisis consistió en obtener los datos estructurales de los planos de falla, de los estratos afectados y de las superficies S₀, todos de acuerdo con la regla de la mano derecha. Estos valores se ingresaron al software OSXStereonet Versión 2.1 para obtener la representación gráfica de los planos de falla y superficies de estratificación en una proyección estereográfica equiangular (Red de Wulff) (Figs. A.2.1, A.2.2 y A.2.3, Apéndice I). Posteriormente, se realizó la restauración a la paleohorizontal de los estratos contenedores de acuerdo a los datos

estructurales promedio de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec en los Sectores 3 y 4 para obtener la orientación original de las fallas sinsedimentarias (Fig. A.2.4, Apéndice I). Una vez rotadas las fallas a la horizontal, se procedió a obtener los esfuerzos σ_3 asociados a la formación de las fallas sinsedimentarias. Estas direcciones de esfuerzos fueron procesadas en la Red de Wulff como datos de líneas para obtener su representación gráfica (Figs. A.2.5, A.2.6 y A.2.7; Apéndice I).

La orientación de los esfuerzos σ_3 de cada falla fue plotada y por medio de un diagrama de densidad se demostró que los esfuerzos tienen direcciones preferenciales de 87° y 267° ; 95° y 275° ; y 97° y 277° en las localidades Barranca Magdalena 2, Barranca Cazahuate y Cerro Xiotillo, respectivamente (Fig. 5.8). Es decir, hay claramente una orientación preferencial E-W, aunque se observó un sesgo de 40° los datos hacia el NE y SW. Se infiere que este campo de esfuerzos tendría acción exclusivamente durante depósito de la formación Tianguistengo (Estadio T₀) y sería previo al depós:

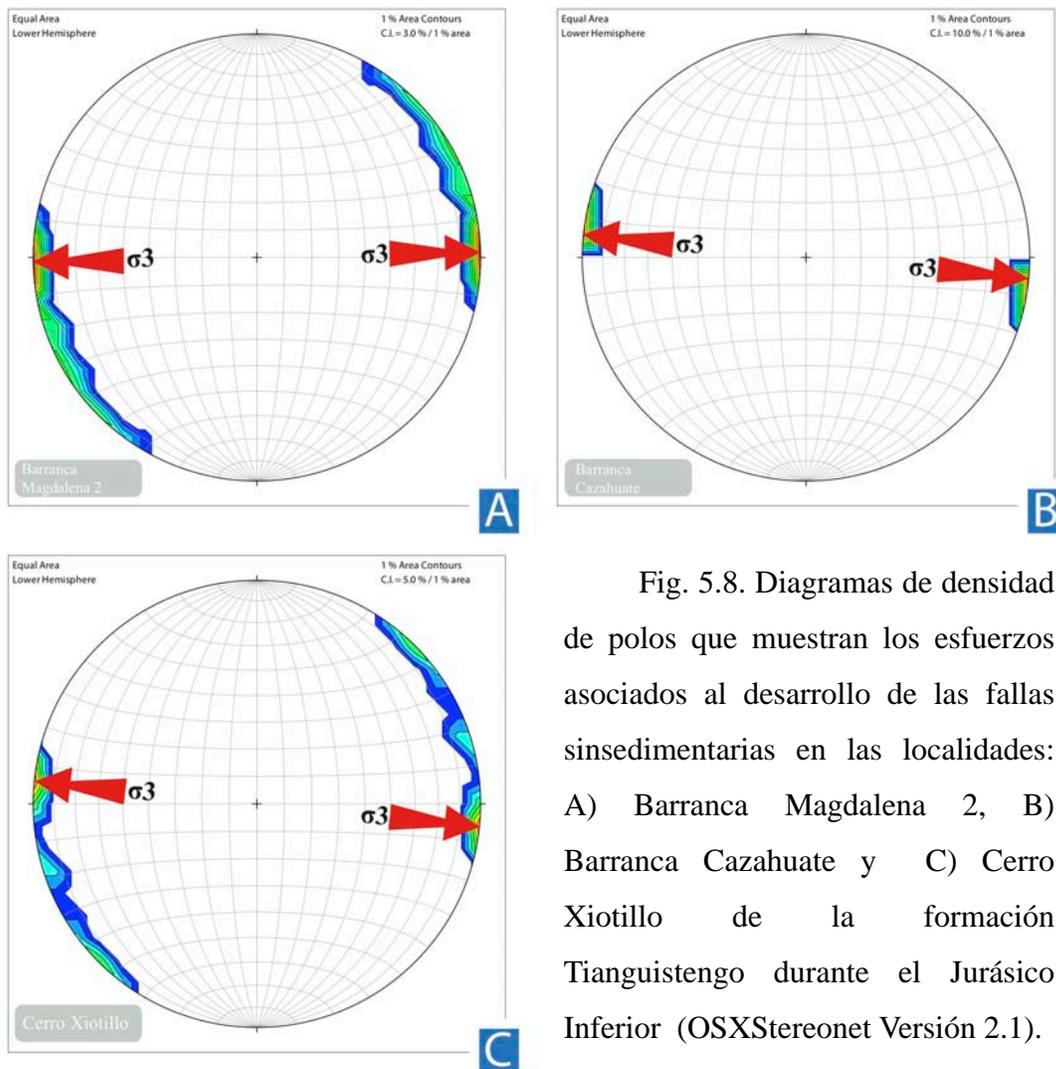


Fig. 5.8. Diagramas de densidad de polos que muestran los esfuerzos asociados al desarrollo de las fallas sinsedimentarias en las localidades: A) Barranca Magdalena 2, B) Barranca Cazahuate y C) Cerro Xiotillo de la formación Tianguistengo durante el Jurásico Inferior (OSXStereonet Versión 2.1).

5.3 DISCORDANCIAS INTERNAS EN LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

Se midieron diecinueve datos de rumbo y echado de estratificaciones, distribuidas en el afloramiento ubicado en las coordenadas 14 Q 625599 m E 2021648 m N a un costado del Cerro Xiotillo ubicado en el Sector 3 (Fig. 5.9; Tabla 5.3). Así mismo se colectaron los datos estructurales de la discordancia presente en este afloramiento. Se decidió realizar esta colecta de información debido a que en esta localidad pueden observarse un decremento progresivo (de más antiguo a más joven) en el buzamiento de las capas sedimentarias.

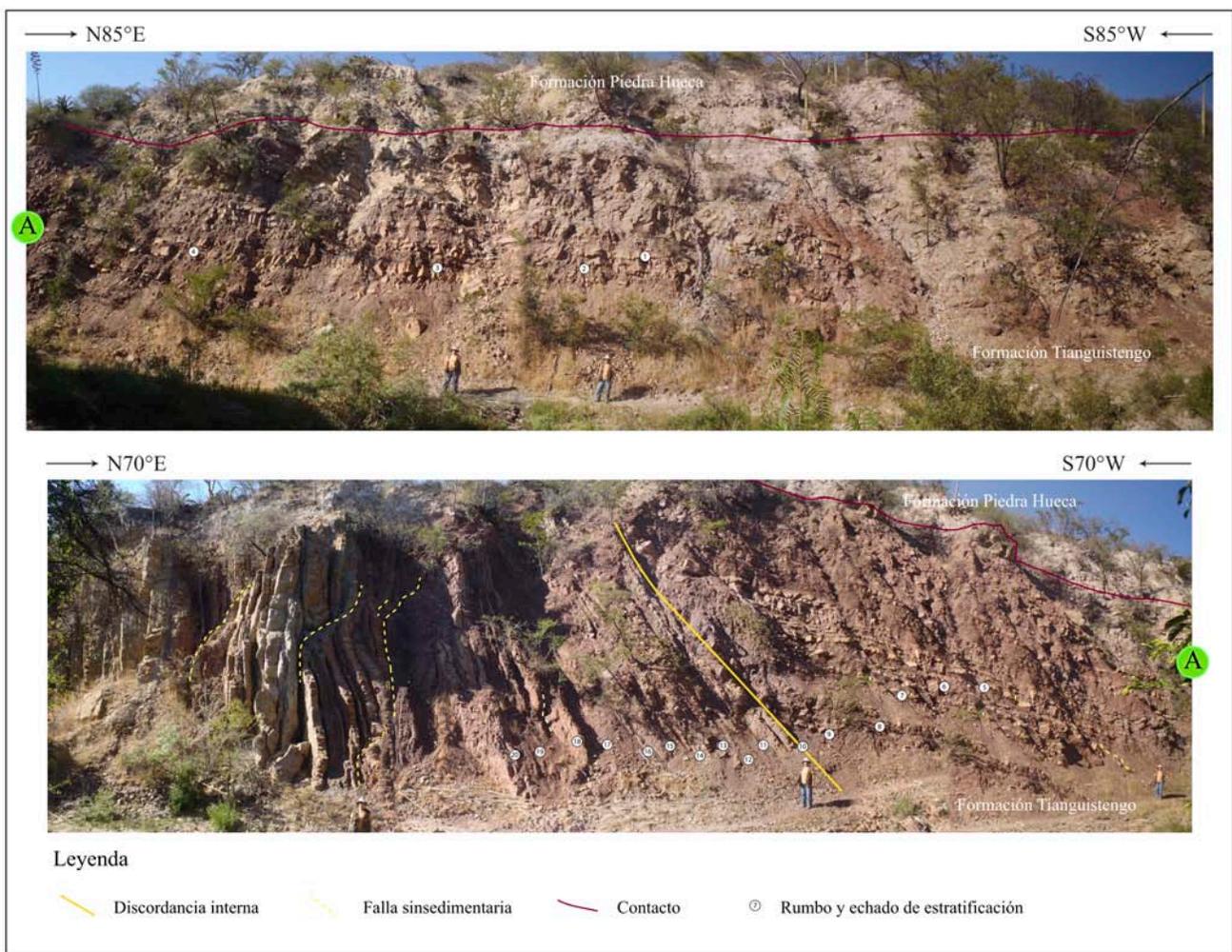


Fig. 5.9. Afloramiento Xiotillo-Magdalena, los números indican la zona de colecta de los datos de rumbo y echado. Como puede observarse los números aumentan hacia los estratos más antiguos. Ambas imágenes son contiguas y muestran algunas de las fallas sinsedimentarias analizadas en este capítulo.

Todos los datos fueron tomados de acuerdo con la regla de la mano derecha y estos valores se ingresaron al software OSXStereonet Versión 2.1 para obtener la representación gráfica de los planos de estratificación en una proyección estereográfica equiangular (Red de Wulff). Todos los datos de rumbo y buzamiento se restauraron a la paleohorizontal con los datos promedio del Sector 3 (Fig. A. 2.4, Apéndice I), los resultados de esta corrección estructural se muestran en la Tabla 5.3.

| NUMERACIÓN EN EL AFLORAMIENTO FIG. 5.9 | RUMBO Y BUZAMIENTO ESTRATO | RUMBO Y BUZAMIENTO DE ESTRATOS ROTADOS A LA HORIZONTAL | |
|--|----------------------------------|--|--------------|
| 1 | 300°/28° | 48.6°/31.7° | Estrato |
| 2 | 274°/32° | 62.8°/19.6° | Estrato |
| 3 | 268°/40° | 61°/11° | Estrato |
| 4 | 258°/40° | 96.4°/10.4° | Estrato |
| 5 | 274°/40° | 45.8°/13° | Estrato |
| 6 | 246°/44° | 139.5°/13° | Estrato |
| 7 | 274°/40° | 45.8°/13° | Estrato |
| 8 | 258°/46° | 117.3°/5° | Estrato |
| 9 | 256°/48° | 146.2°/5° | Estrato |
| 10 | 298°/66° | 335°/34° | Discordancia |
| 11 | 274°/78° | 286°/30° | Estrato |
| 12 | 278°/65° | 308.6°/20° | Estrato |
| 13 | 288°/66° | 323.6°/27° | Estrato |
| 14 | 286°/78° | 305.8°/35° | Estrato |
| 15 | 286°/84° | 300.8°/40.3° | Estrato |
| 16 | 285°/83° | 300°/39° | Estrato |
| 17 | 286°/86° | 299.3°/42° | Estrato |
| 18 | 296°/88° | 310°/49° | Estrato |
| 19 | 292°/88° | 305.3°/46.7° | Estrato |
| 20 | 279°/89° | 288°/42° | Estrato |

Tabla. 5.3. Datos de rumbo y echado colectados en el afloramiento Xiotillo-Magdalena y sus orientaciones originales al restaurarlos a la paleohorizontal.

Como puede observarse en la Figura 5.10, al realizar la corrección estructural los estratos que están sobre la discordancia, es decir aquellos que son más jóvenes que esta discontinuidad, obtienen una orientación subhorizontal, mientras que aquellos que están por debajo de la discordancia presentan echados entre 5° y 31° . Gracias a este arreglo puede interpretarse que la discordancia se había formado previo al depósito de las formaciones Piedra Hueca y Otlaltepec. Esta discordancia debe su formación a esfuerzos extensionales ocurridos durante la sedimentación de la formación Tianguistengo, cuyos esfuerzos σ_3 debieron haber hecho tener una orientación aproximada de 65° - 245° . Esta conclusión es compatible con los resultados obtenidos de la corrección estructural de las fallas sinsedimentarias analizadas en este capítulo.

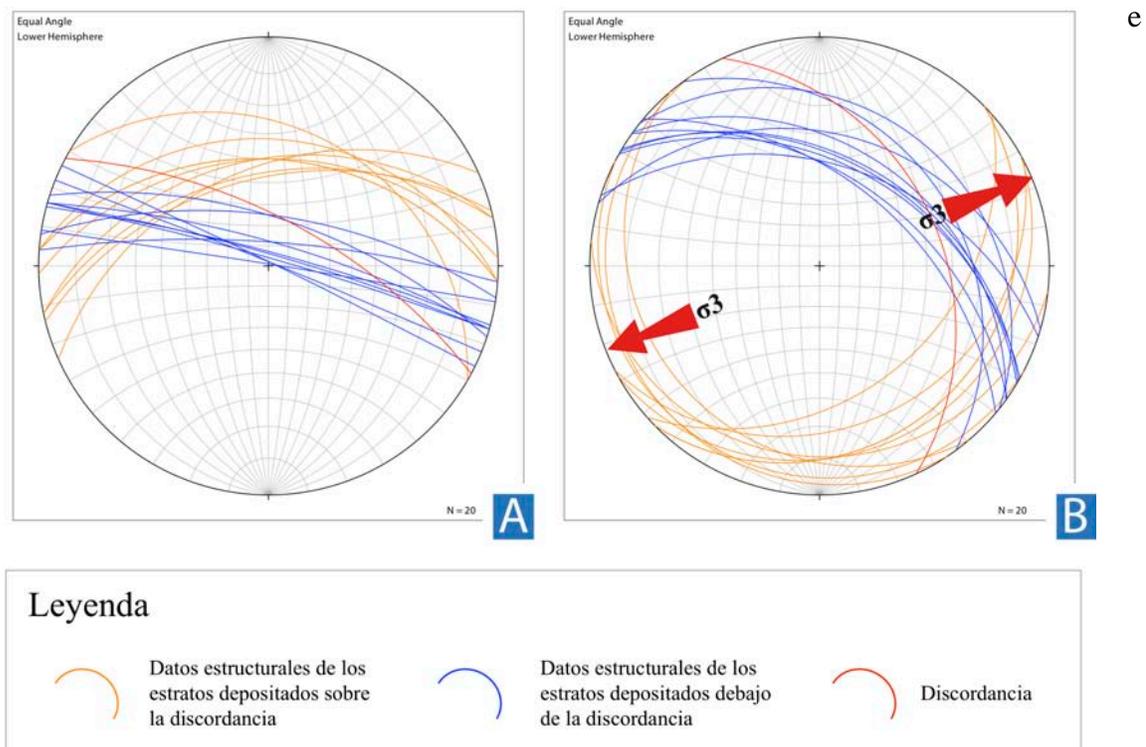


Fig. 5.10. Diagramas estereográficos del afloramiento Xiotillo-Magdalena. A) Datos de estratificación representados como círculos máximos, aquellos que están sobre la discordancia se presentan con un color naranja, en azul los que están debajo de la misma. La discordancia se presenta en rojo. B) Datos de estratificación después de aplicarles la corrección estructural (OSXStereonet Versión 2.1).

5.4 FAMILIAS DE FALLAS EN LAS FORMACIONES TIANGUISTENGO, PIEDRA HUECA Y OTLALTEPEC

Las fallas sinsedimentarias analizadas con anterioridad son datos obtenidos exclusivamente en la formación Tianguistengo, pero adicional a estos sistemas de fallas con orientación N-S y SE-NW se registró la presencia de otras discontinuidades que cortaban a las fallas sinsedimentarias (Figs. 5.11 y 5.12).



Fig. 5.11. Sistemas de fallas presentes en la formación Tianguistengo. A) Se observan dos sistemas con orientaciones aproximadamente perpendiculares, claramente se distingue que las fallas normales de rumbo N60°E son posteriores al desarrollo de las fallas con orientación S158°E. Afloramiento sobre el lecho del Río Magdalena. B) Vista lateral del afloramiento donde se observa el desplazamiento de las fallas normales de rumbo N60°E. Dimensión del martillo 41 cm.



Fig. 5.12. Sistemas de fallas observados en las rocas de la formación Tianguistengo. La falla con orientación N24°E claramente es posterior a la de rumbo S134°E.

En este ejercicio se observó, en la formación Tianguistengo, que las fallas claramente sinsedimentarias tienen una orientación preferencial N-S y NW-SE, mientras que las fallas posteriores están orientadas E-W, NE-SW y NW-SE. Se observó que las fallas de orientaciones E-W y NE-SW corresponden a sistemas de fallas que cortan a las fallas sinsedimentarias. Por otro lado, en las otras dos formaciones, se observó una tendencia al E-W en la orientación de las fallas, por lo que se concluye que el sistema de fallas de orientación preferencial E-W ocurrió en las posterior al depósito de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec (Fig. 5.13).

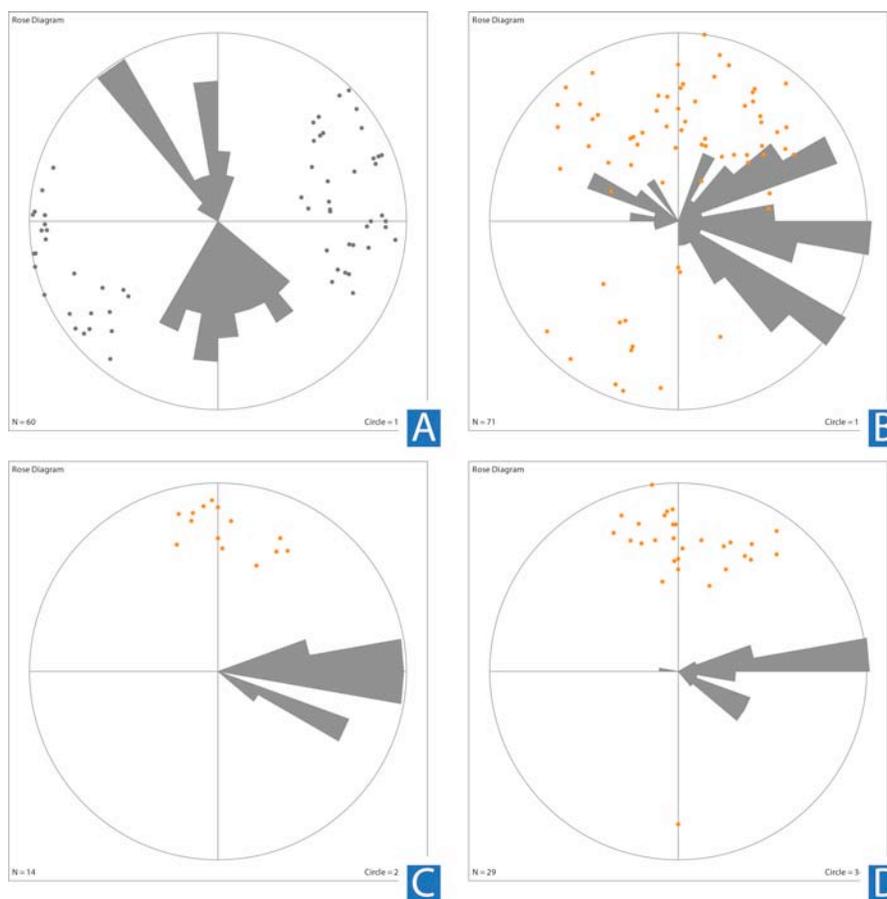


Fig. 5.13. Sistemas de fallas presentes en las rocas jurásicas de la cuenca Otlaltepec. Los puntos representan los polos de los datos estructurales. A) Diagrama de roseta que muestra la orientación promedio de las fallas sinsedimentarias en la formación Tianguistengo. B) Diagrama de roseta de las fallas posteriores a las fallas sinsedimentarias en la formación Tianguistengo. C) Diagrama de roseta de las fallas presentes en la formación Piedra Hueca. D) Diagrama de roseta de las fallas presentes en la formación Otlaltepec.

5.5 BRECHAS Y DEFORMACIÓN SINSEDIMENTARIA

Se registró la presencia de brechas tectónicas sinsedimentarias en las rocas de la formación Tianguistengo compuestas de fragmentos de arenisca de grano medio de coloración rojiza de bordes suaves que evidencian el desarrollo de las brechas mientras los sedimentos aún no estaban consolidados. Así mismo se encontraron afloramientos con pliegues con deformación suave, este tipo de estructuras son una expresión de actividad tectónica sinsedimentaria (Fig. 5.14).



Fig. 5.14. A y B) Brechas tectónicas sinsedimentarias. Afloramiento ubicado sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías de la Falla Tianguistengo. Tamaño de la brújula: 10x15 cm. C) Clásto localizado en la formación Piedra Hueca, presenta deformación en estado suave. Afloramiento ubicado las cercanías del cerro Xiotillo. D) Pliegues sinsedimentarios sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del Cerro Xiotillo. Longitud del martillo 41 cm. Formación Tianguistengo.

CAPÍTULO 6

GEOCRONOLOGÍA U-Pb DE CIRCONES DETRÍTICOS

Durante el trabajo de campo se realizó la colecta de dos muestras de areniscas (P.50 y P.53) para estudios de circones detríticos, con el objetivo de constreñir la edad máxima de depósito de la formación Tianguistengo. Debido a este interés, el proceso de selección de los circones utilizados en los análisis de U-Pb no fue aleatorio, pues se dio preferencia a los cristales euhedrales sobre aquellos que presentaban formas redondeadas con la suposición de que estos fueran los más jóvenes (Gehrels, 2012). Por lo tanto, los resultados de este muestreo dirigido pueden no reflejar la procedencia de las rocas de la formación Tianguistengo. La posición estratigráfica de estas muestras se observa en las figuras 4.2 y 4.8 del Capítulo 4. El listado de los resultados de los análisis por el método U-Pb se presenta en el Apéndice II de este trabajo.

6.1 ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO MUESTRA P.50

La muestra P.50 fue colectada en las cercanías de la ranchería La Huertilla, al oeste de área de estudio. Corresponde a la matriz de arena gruesa de un conglomerado polimíctico matriz-soportado con mala clasificación. Los clastos corresponden a fragmentos de granito, gabro, areniscas rojizas de grano fino, areniscas de grano medio color castaño, esquistos, cuarzo lechoso y rocas volcánicas, cuyo eje más largo varía de 2 hasta 12 cm. En general los clastos están bien redondeados y tienen baja esfericidad. La matriz de este conglomerado tiene una composición muy similar a la de los clastos.

Se efectuaron 99 análisis puntuales en 92 circones; en 6 granos se realizaron de 2 a 3 análisis, tanto en el centro como en el borde de los cristales, para determinar la existencia de un núcleo heredado, en el resto (86 circones) sólo se realizó un análisis por cada cristal (Tabla AII-I, Apéndice II) (Fig. 6.1).

Las edades obtenidas están en el rango de 1231 ± 61 a 248 ± 3 Ma y se presentan en tres grupos principales: i) Un rango de 248 a 340 Ma con un pico principal en ~ 276 Ma; ii) la segunda población con un rango de 466 a 597 Ma y iii) un tercer conjunto con un rango entre 878 a 1269 Ma (pico principal en ~ 956 Ma) (Fig. 6.2).

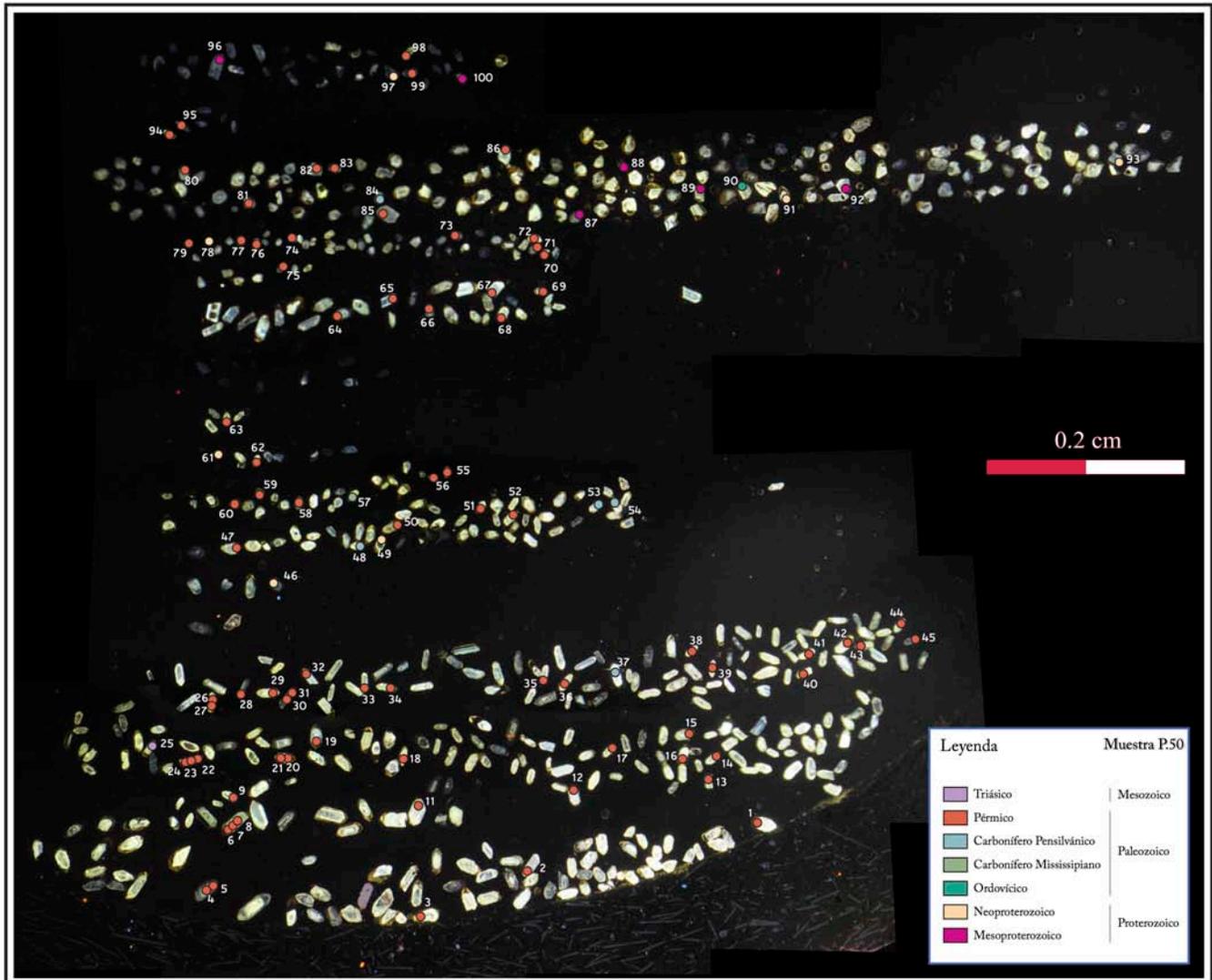


Fig. 6.1. Imagen de catodoluminiscencia de los cristales de la muestra P.50. Los círculos indican el análisis por ablación láser realizado (~23 micras). Puede observarse la distribución de las edades en las morfologías presentes en esta muestra que van desde edades proterozoicas hasta mesozoicas, en este caso predominan los circones de edad paleozoica.

Morfologías

Los cristales presentes en esta muestra pueden clasificarse en cinco poblaciones generales, basadas en características tales como la morfología, coloración, transparencia, alteración, grado de redondez y tamaño (criterios de clasificación en Corfu *et al.*, 2003) (Fig. 6.3). La relación entre las morfologías de circones y las edades se muestra en la figura 6.4.

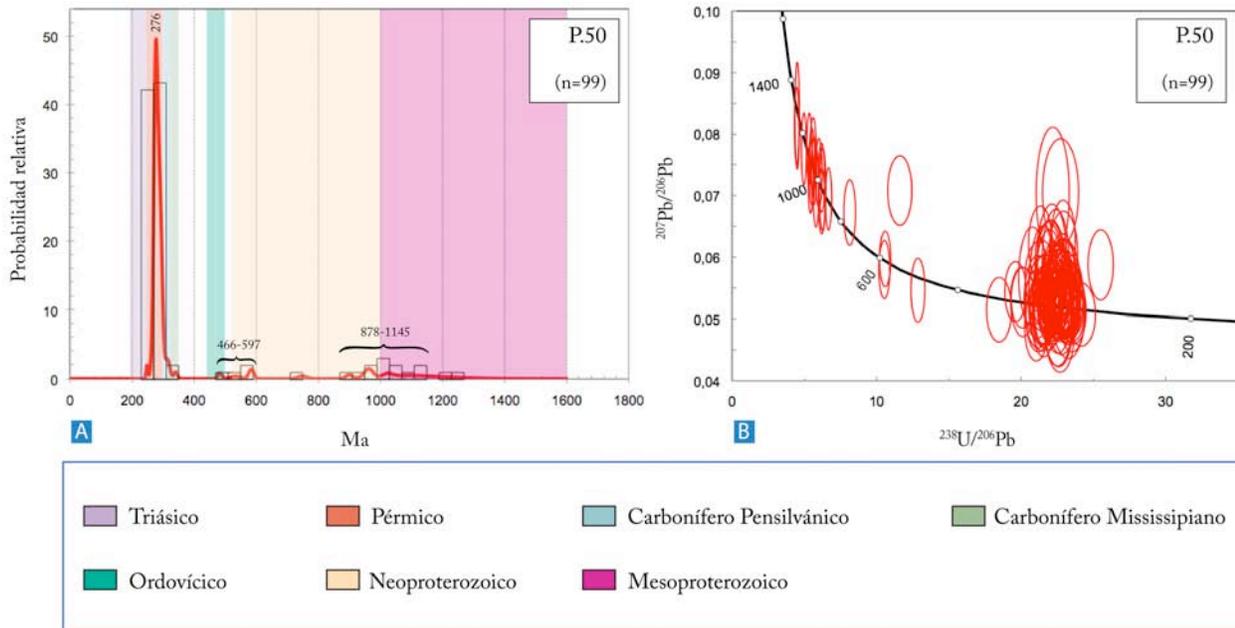


Fig. 6.2. A) Diagrama acumulativo de las edades U-Pb , donde se observan el pico principal de densidad en 276 Ma y otros rangos de edades importantes en la muestra. B) Diagrama de concordia Tera-Wasserburg que muestra las edades U-Pb obtenidas para los cristales de la muestra P.50.

Población 50.1. Circones euhedrales de forma prismática, elongados. Su coloración va de rosada a transparente. Tamaño promedio de 80 μm . La imagen de catodoluminiscencia muestra algunos cristales con zoneamiento, aunque otros cristales se muestran con una coloración amarilla natural. Las edades obtenidas en los ejemplares de esta población son: 248, 261, 267, 269, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 292, 295, 303 y 304 Ma (Fig. 6.3 A).

Población 50.2. Circones redondeados y subsféricos. Su coloración va de rosada a transparente. Su tamaño va de 40 a 100 μm . La imagen de catodoluminiscencia muestra zoneamiento ocasional. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 274, 275, 277, 278, 288, 291, 582, 586 y 748 Ma (Fig. 6.3 B).

Población 50.3. Cristales subangulares a subredondeados con fracturamiento común. Su coloración va de rosada a transparente. Tamaño promedio de 70 μm . La imagen de catodoluminiscencia muestra zoneamiento ocasional. Hay presencia de inclusiones. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 270, 271, 274, 276, 278, 279, 280, 282, 283, 285, 287, 292, 294, 295, 297, 298, 299, 313, 321, 533, 899, 965, 1024, 1032, 1119, 1137, 1136 y 1042 Ma (Fig. 6.3 C).

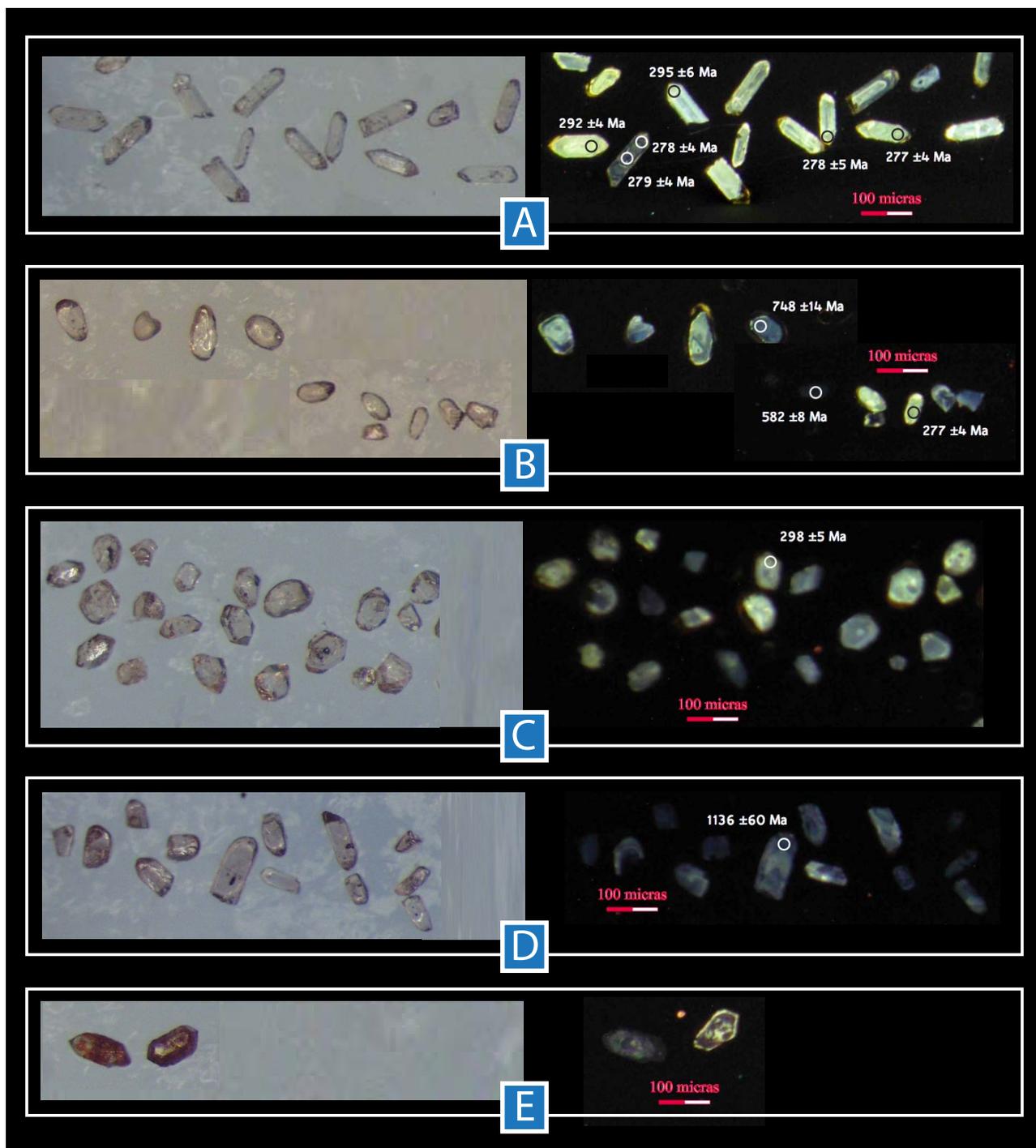


Fig. 6.3. Poblaciones principales de circones de la muestra P.50. Se muestran a la izquierda imágenes tomadas con el microscopio estereográfico e imágenes de catodoluminiscencia a la derecha. A) Población 50.1. B) Población 50.2. C) Población 50.3. D) Población 50.4. E) Población 50.5.

| Muestra P.50 | | | | |
|--------------------------|---|---|---|--|
| Edad | Poblaciones | | | |
| | 50.1 | 50.2 | 50.3 | 50.4 |
| Triásico |  | | | |
| Pérmico |  |  |  | |
| Carbonífero Pensilvánico |  |  |  | |
| Carbonífero Missisipiano | | | |  |
| Ordovícico | | | |  |
| Neoproterozoico | |  |  |  |
| Mesoproterozoico | | |  |  |

Fig. 6.4. Tabla que relaciona las morfologías y las edades presentes en la muestra P.50.

Población 50.4. Cristales subeuhedrales de forma prismática, muy redondeados. Su coloración es violeta. Su tamaño varía de 50 a 120 μm . La imagen de catodoluminiscencia los muestra uniformes. Hay presencia de inclusiones. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 340, 748, 954, 1136, 1137 y 1231 Ma (Fig. 6.3 D).

Población 50.5. Cristales euhedrales de forma prismática. Su coloración es castaño muy oscuro. Tamaño promedio de 80 μm . La imagen de catodoluminiscencia muestra algunos cristales con zoneamiento, en algunos casos aparece desarrollada alrededor de núcleos xenocrísticos. Otra característica importante es que el zoneamiento parece estar interrumpido por discontinuidades. No se obtuvieron edades de estos circones debido a que se consideraron inapropiados para el análisis U-Pb (Fig. 6.3 E).

6.2 ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO MUESTRA P.53

Este ejemplar fue colectado sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo. Se trata de una arenisca de grano fino a medio en estratos de 0.2 a 1 m de espesor con límites planares bien definidos. Es de color rojizo o castaño claro. Se compone principalmente de cuarzo, feldespatos y líticos de granito y esquisto. Se realizaron 98 análisis puntuales a 94 granos de circón. En 4 cristales se realizaron 2 análisis (centro y borde) con el fin de detectar la existencia de núcleos heredados, en los 90 restantes sólo se efectuó un análisis (Tabla AII-II, Apéndice II) (Fig. 6.5).

El rango de edades que comprende esta muestra va de 1536 ± 48 a 237 ± 4 Ma. Se observan dos grupos de principales: i) la primera con un rango que va de 237 a 318 Ma (pico principal en 285 Ma) y ii) con rango de 914 a 1536 Ma (pico principal en ~950 Ma) (Fig. 6.6).

Morfologías

Los circones montados en esta muestra se clasifican en 7 poblaciones, de acuerdo a sus características físicas (criterios de clasificación en Corfu *et al.*, 2003) (Fig. 6.7). Cinco de las poblaciones son muy similares a las definidas en la muestra P.50. La relación entre las morfologías de circones y las edades principales se muestra en la figura 6.8.

Población 53.1. Circones euhedrales de forma prismática, elongados. Su coloración natural es rosada, violeta o transparente. Su tamaño varía de 120 a 50 μm . La imagen de catodoluminiscencia muestra algunos cristales con zoneamiento. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 275, 276, 284, 285, 286, 290, 293, 295, 298, 303, 401 482 y 1321 Ma (Fig. 6.7 A).

Población 53.2. Circones subredondeados y subesféricos. Su coloración natural va de rosada a transparente. Su tamaño va de 100 a 25 μm , la variación de tamaño de esta población es de las más notorias en la muestra. La imagen de catodoluminiscencia muestra zoneamiento ocasional, presencia de núcleos xenocrísticos e inclusiones. Las edades obtenidas en algunos ejemplares de esta población son: 273, 275, 281, 286, 292, 298, 914, 947, 958, 973, 974, 1064, 1086, 1090, 1111, 1114, 1130, 1133, 1155, 1224, 1228, 1229, 1333, 1334, 1335 y 1463 Ma (Fig. 6.7 B).

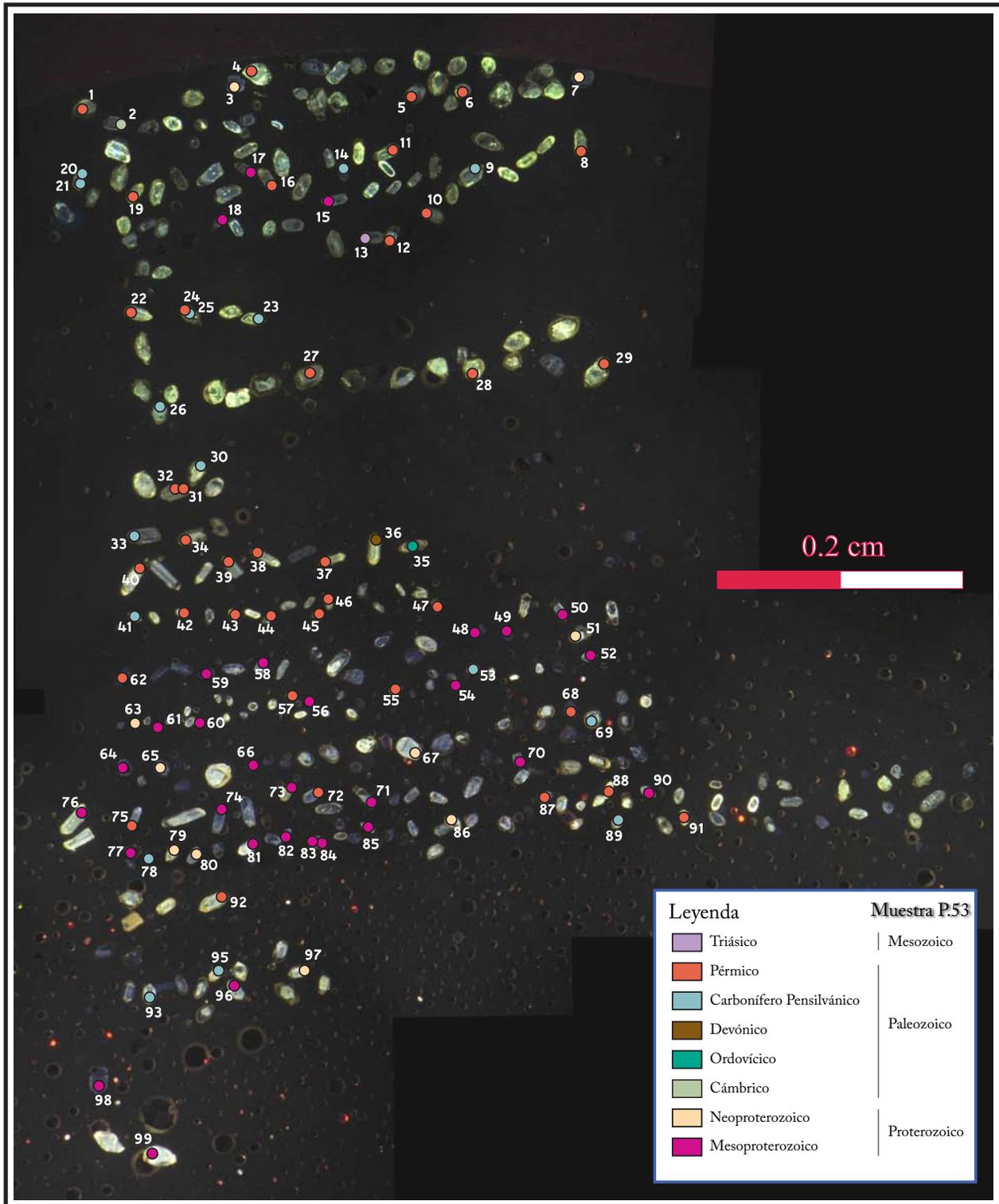


Fig. 6.5. Imagen de catodoluminiscencia de los cristales de la muestra P.53. Los círculos indican el análisis por ablación láser realizado (~23 micras). Puede observarse la distribución de las edades en las morfologías presentes en esta muestra que van desde edades proterozoicas hasta mesozoicas, en este

caso predominan los circones de edad paleozoica y los proterozoicos.

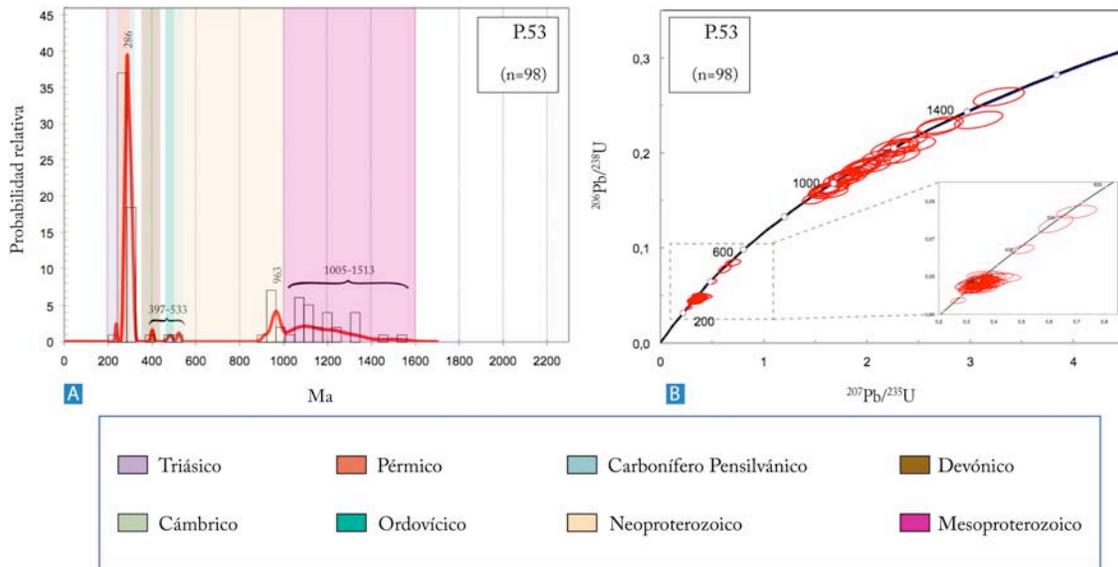


Fig. 6.6. A) Diagrama acumulativo de las edades U-Pb de la muestra P.53, donde se observan los picos principales de densidad en 286 y 949 Ma. B) Diagrama de concordia que muestra las edades U-Pb obtenidas para los cristales de la muestra P.53.

Población 53.3. Cristales subangulares a subredondeados con fracturamiento común. Su coloración natural es rosada, amarilla o transparente. Su tamaño promedio es de 80 μm . La imagen de catodoluminiscencia zoneamiento ocasional, presencia de núcleos xenocrísticos e inclusiones. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 273, 274, 275, 276, 282, 283, 285, 286, 287, 288, 291, 292, 293, 295, 296, 297, 301, 303, 307, 309, 310, 316, 318, 950, 965, 996, 1012, 1061, 1069, 1107 y 1269 Ma (Fig. 6.7 C).

Población 53.4. Cristales subeuhedrales de forma prismática, muy redondeados. Su coloración natural es violeta y su tamaño promedio es de 100 μm . La imagen de catodoluminiscencia los muestra con zoneamiento o uniformes. Las edades obtenidas en ejemplares de esta población son: 1013, 1035, 1073, 1109, 1240, 1243 y 1536 Ma (Fig. 6.7 D).

Población 53.5. Cristales subeuhedrales de forma prismática. Su coloración natural es violeta muy oscuro. Tamaño promedio de 80 μm . La imagen de catodoluminiscencia los muestra de color

negro uniforme. No se obtuvieron edades de estos circones debido a que se consideraron inapropiados para el análisis U-Pb (Fig. 6.7 E).

Población 53.6. Circones redondeados y esféricos. Su coloración natural va de rosada a violeta intenso. Su tamaño va de 500 a 10 μm . La imagen de catodoluminiscencia zoneamiento ocasional, presencia de núcleos xenocrísticos e inclusiones. Las edades obtenidas en algunos ejemplares de esta población son: 1084, 1164 y 1227 Ma (Fig. 6.7 F).

Población 53.7. Cristales subeuhedrales de forma subprismática. Su coloración natural es transparente o amarilla y su tamaño promedio es de 70 μm . La imagen de catodoluminiscencia los muestra de color amarillo uniforme, con zonación o con núcleos xenocrísticos. Las edades obtenidas en algunos ejemplares de esta población son: 237, 272, 284, 287, 301, 314, 522, 963 y 976 Ma (Fig. 6.7 G).

6.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO

Algunos estudios (Corfu *et al.*, 2003) concluyen que los circones de apariencia alargada son comunes en casos de cristalización rápida en granitos, grabros o en intrusiones de tipo subvolcánico. Además la presencia de zoneamiento bien desarrollado en los cristales es una característica típica de circones de origen magmático, así como ocurrencia de circones con núcleos xenocrísticos es una característica frecuente en las rocas ígneas.

Por lo cual se infiere que un gran porcentaje de los cristales analizados en ambas muestras procede fuentes de origen magmático. Además, como puede observarse en las Tablas AII-I y AII-II, la razón Th/U es mayor a 0.1 en la mayoría de los cristales de ambas muestras, lo cual ha sido reportado como una característica de circones de origen magmático (Rubatto, 2002) (en 88 circones en la muestra P.50 y 91 circones en la muestra P.53).

Por otro lado, el redondeamiento de algunos cristales se atribuye a procesos de transporte, por lo que los circones bien redondeados podrían registrar múltiples ciclos de sedimentación y reciclaje. Sin embargo, las poblaciones morfológicas no coinciden exactamente con poblaciones de edad.



Fig. 6.7. Poblaciones principales de circones de la muestra P.53. Se muestran a la izquierda imágenes tomadas con el microscopio estereográfico e imágenes de catodoluminiscencia a la derecha. A) Población 53.1. B) Población 53.2. C) Población 53.3. D) Población 53.4. E) Población 53.5. F) Población 53.6. G) Población 53.7.

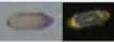
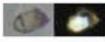
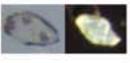
| Muestra P.53 | | | | | | |
|--------------------------|---|---|---|--|---|---|
| Edad | Poblaciones | | | | | |
| | 53.1 | 53.2 | 53.3 | 53.4 | 53.6 | 53.7 |
| Triásico | | | | | |  |
| Pérmico |  |  |  | | |  |
| Carbonífero Pensilvánico |  | |  | | |  |
| Devónico |  | | | | | |
| Cámbrico | | | | | |  |
| Ordovícico |  | | | | | |
| Neoproterozoico | |  |  | | |  |
| Mesoproterozoico |  |  |  |  |  | |

Fig. 6.8. Tabla que relaciona las morfologías y las edades presentes en la muestra P.53.

6.4 EDAD DE LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

Los circones detríticos analizados en ambas muestras (P.50 y P.53) presentan un amplio rango de edades que comprenden desde el Triásico hasta el Mesoproterozoico (Figs. 6.1 y 6.4). Se distinguieron los siguientes grupos en ambas muestras (Figs. 6.2 y 6.6):

- Circones proterozoicos con edades de ~914 a ~1536 Ma (pico principal en ~950 Ma) (muestra P.50) y de ~878 a ~1269 Ma (pico principal en ~956 Ma) (muestra P.53).

- Circones paleozoicos del Cámbrico, Ordovícico, Devónico, Carbonífero (Mississípico) de ~340 y ~483 Ma (dos cristales en la muestra P.50); ~401, ~482 y ~522 Ma (3 cristales muestra P. 53).
- Circones paleozoicos del Pérmico y Carbonífero (Pensilvánico) de ~261 a ~321 Ma con un máximo en ~276 Ma (muestra P.50) y circones de ~268 a ~318 Ma (pico principal en ~285 Ma) (muestra P.53).

Además de estos tres grupos cronológicos, cada muestra presentó un cristal de edad triásica (~248 Ma, Triásico Inferior y ~237 Ma, Triásico Medio-Superior), la cual es la edad más joven encontrada en estos estudios y es considerada como la edad máxima de depósito para la formación Tianguistengo.

La información geocronológica y las relaciones estratigráficas observadas en campo sugieren que la edad de la formación Tianguistengo es Triásico Superior-Jurásico Inferior. La unidad que la sobreyace (formación Piedra Hueca) es considerada como Jurásico Inferior-Medio y las edades de los circones más jóvenes estudiados son esencialmente pérmicos y del Triásico Inferior-Medio.

En este trabajo no se realizó un análisis de procedencia de las poblaciones de circones detríticos, sin embargo debe mencionarse que los resultados son muy similares a aquellas edades reportadas por Silva-Romo *et al.* (2015) en la Formación La Mora (Muestra TEZ-21), ubicada al sur del área de estudio de esta tesis. Estudios posteriores podrían develar una posible correlación entre las formaciones La Mora y Tianguistengo.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1 MODELO DE PALEOAMBIENTE DE DEPÓSITO DE LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

De acuerdo con la información obtenida en campo (columnas estratigráficas, muestras, descripción de afloramientos, etc.) y su respectivo análisis se interpretó un ambiente de depósito de tipo aluvial-fluvial para las rocas de la formación Tianguistengo.

Los depósitos de conglomerados y arenas del borde occidental de la cuenca han sido interpretados como canales, flujos de sedimentos por gravedad intercalados con depósitos de llanura de inundación (Columnas IV Tedigno y V Alegría). Al hacer el recorrido hacia el Este los depósitos de planicie de inundación son más abundantes y muestran vestigios de crecimiento de vegetación y formación de estanques de agua dulce donde hubo proliferación de ostrácodos (Columnas I Santo Domingo, II Magdalena y III Cazahuate). La vegetación y los estanques se consideran rasgos efímeros pues con cada nueva inundación se veían cubiertos por material clástico que evitó el crecimiento de las plantas y la conservación de sitios de reproducción de los ostrácodos y otros organismos. Las características observadas en las láminas delgadas que contienen microfósiles nos permiten inferir que el ambiente en el que se desarrollaron los ostrácodos y algas era un estanque de baja energía con influencia de sedimentos terrígenos en el ocasionalmente había flujos de alta energía.

Las asociaciones de facies observadas indican la existencia de elementos arquitectónicos propios de un ambiente aluvial-fluvial. Asimismo se registró un decremento en la granulometría de los sedimentos de Oeste a Este, por lo que el abanico estaría orientado hacia el Este. Dicho arreglo sugiere que la zona de canales se encontraba en la zona de la ranchería La Huertilla, mientras que la planicie de inundación se extendió hasta las cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo.

De acuerdo a estos resultados se elaboró un modelo esquemático que muestra la posición del los canales principales y la planicie de inundación mostrado en la Fig. 7.1.

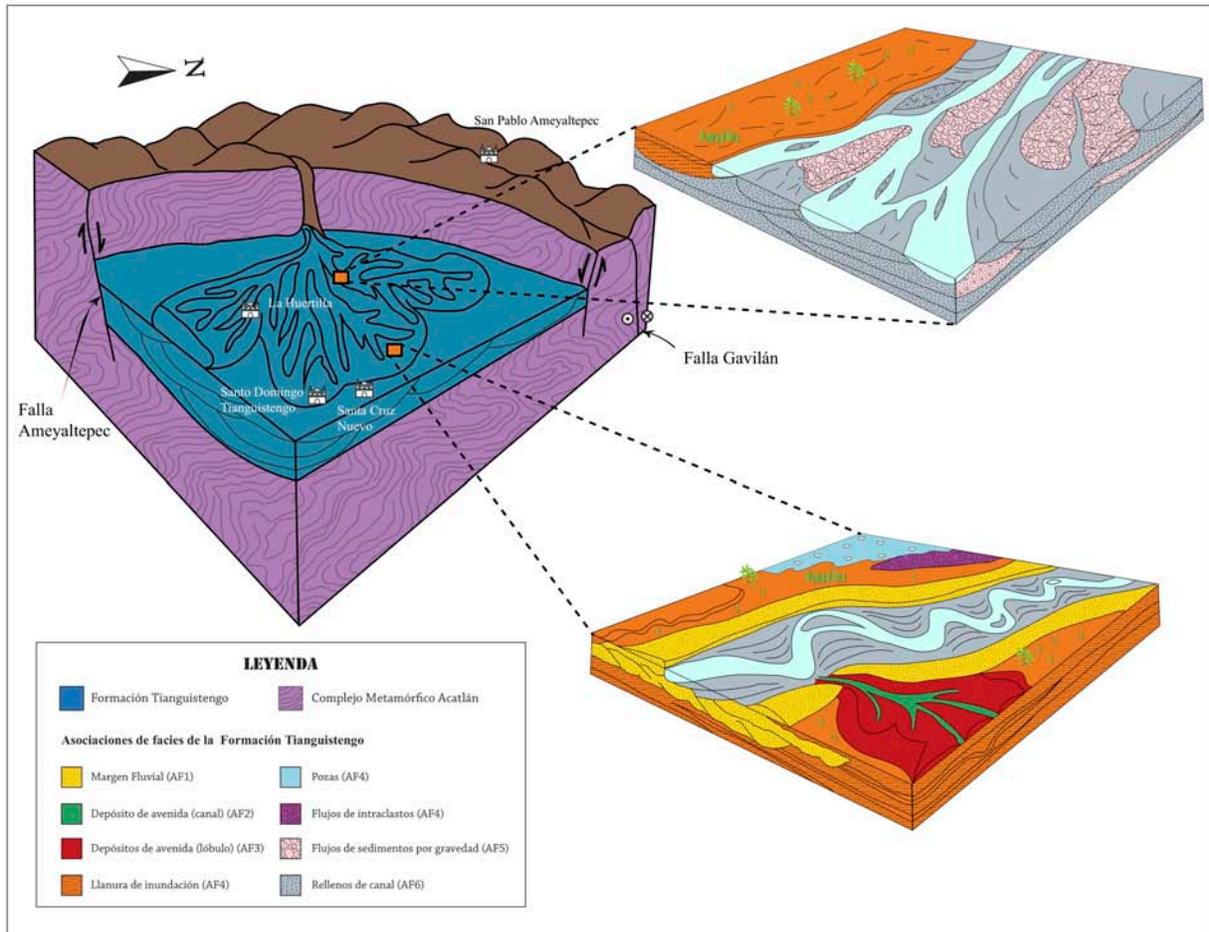


Fig. 7.1. Modelo de facies esquemático para la formación Tianguistengo, depositada en un sistema aluvial-fluvial asociado a una falla sinsedimentaria. Los números indican las asociaciones de facies presentes: 1) Levee, 2) Crevasse chanel, 3) Crevasse splay, 4) Planicie de inundación, 5) Arenas con intraclastos, 6) Flujos de sedimentos por gravedad y 7) Canales. Modificado de Miall (2006).

7.2 EDAD DE LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

El contenido paleontológico ofrece un rango muy amplio de edad, sin embargo la información geocronológica y las relaciones estratigráficas observadas en campo sugieren que la edad de la formación Tianguistengo es Triásico Superior-Jurásico Inferior.

7.3 TECTÓNICA SINSEDIMENTARIA

El análisis estructural en campo permitió determinar la existencia de rasgos tales como brechas, pliegues sinsedimentarios, fallas sinsedimentarias y discordancias que indican que el depósito de la formación Tianguistengo ocurrió en una cuenca tectónicamente activa, bajo un régimen extensional o transtensional. Se determinó que el campo de esfuerzos correspondiente tendría orientaciones E-W y NE-SW durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior.

Sin embargo, hay evidencias de que posterior a este régimen hubo un cambio en el campo de esfuerzos. Este cambio se determinó por medio del análisis de datos de estratificación y por la existencia de fallas que cortan perpendicularmente a las fallas sinsedimentarias de la formación Tianguistengo.

El segundo régimen se considera extensional o transtensional pero con un campo de esfuerzos con direcciones N-S y NW-SE y fue el causante del basculamiento (con eje E-W) de la formación Tianguistengo, previo al depósito de la formación Piedra Hueca, y continuó hasta el depósito de la formación Otlaltepec dando lugar a la serie de discordancias regionales que dividen estas unidades del Jurásico Inferior al Jurásico Superior. Este tipo de rotaciones y discordancias son muy similares a aquellas asociadas a una actividad de falla lítrica sinsedimentaria, cuya posición se ubica al norte del paquete sedimentario y podría corresponder a la Falla Ameyaltepec (Figs. 7.1 y 7.2).

Los límites de la cuenca Otlaltepec se desconocen hacia el Norte y Noreste de la región, ya que se encuentran cubiertos por depósitos del Cretácico, sin embargo en la región de Santo Domingo Tianguistengo se han delimitado con precisión. Los datos estructurales nos permiten establecer que en esta zona los sedimentos están alojados en el graben formado por las Fallas Ameyaltepec, Tianguistengo y Totoltepec (Fig. 7.2).

Las evidencias de la actividad de las fallas Ameyaltepec, Tianguistengo y Totoltepec durante el relleno de la cuenca Otlaltepec son:

- Los depósitos subhorizontales de la formación Tianguistengo, ubicados en las cercanías del poblado de Santo Tomás Otlaltepec, no presentan las rotaciones observadas dentro del graben delimitado por las fallas Ameyaltepec, Tianguistengo y Totoltepec, los cuales son un indicativo

de la actividad sinsedimentaria de la falla Tianguistengo. Asimismo la ausencia de los depósitos de la formación Piedra Hueca en esta zona nos permiten establecer que la falla Tianguistengo se encontraba de etapas tempranas aumentó su desplazamiento a partir del Jurásico Inferior (véase Mapa Geológico anexo).

- En las cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo se ubicó un depósito de la formación Otlaltepec subhorizontal, el cual es indicativo de la actividad pre-Jurásico Medio de la Falla Totoltepec, y por lo tanto, es otra evidencia que indica la rotación previa de las unidades Tianguistengo y Piedra Hueca (véase Mapa Geológico anexo).

Asimismo se ha reconocido una asimetría en la sedimentación que indica que el depocentro de la cuenca Otlaltepec se encuentra al norte, cercano a la Falla Ameyaltepec (Fig. 7.2).

7.4 AMBIENTE TECTÓNICO

Durante el periodo estimado para el depósito de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec se ha establecido con relativa certeza la ocurrencia de un evento tectónico de escala global: la ruptura de Pangea; fenómeno que inició hace 230 Ma y que precedió la formación del Golfo de México y del Océano Atlántico (McHone, 2000; Bird and Burke, 2006).

Aunque muchos modelos han sido propuestos, para describir la fragmentación de Pangea la mayoría de los autores coincide en que la apertura del Golfo de México fue producto de la rotación hacia la izquierda del Bloque de Yucatán con respecto a Norteamérica que necesariamente requería de un límite transforme para su desarrollo. Así mismo se ha sugerido que la rotación ocurrió entre 160 Ma y 140 Ma (Pindell, 1985, 1994; Marton and Buffler, 1994; Bird and Burke, 2006). Simultáneamente a este proceso ocurría la separación de Gondwana de Norteamérica (Pindell, 1994; Michalzik, 1991; Marton y Buffler, 1993; Bird *et al.*, 2005). Dicha apertura permitió el desarrollo de dos trazas donde ocurrió la formación de piso oceánico y que corresponden a los límites de Norteamérica y Gondwana, incluyendo el rift que limitó el bloque de Yucatán (Bird and Burke, 2006).

Una gran cantidad de autores coincide con que los esfuerzos de extensión están orientados

aproximadamente N-S a NW-SE (Anderson y Schmidt, 1983; Pindell, 1985; Salvador, 1991; Marton y Buffler, 1994; Dickinson and Lawton, 2001). Existe una gran variedad de modelos para la apertura del Golfo de México, sin embargo, de acuerdo con Mendoza-Rosales *et al.* (2010) el modelo conformado por dorsales separadas por fallas transformes es uno de los más probables de acuerdo con el registro geológico preservado en la cuenca de tipo extensional de Chivillas (zona ubicada al este del área de estudio) que aunque es más joven (~126 Ma) que la cuenca Otlaltepec presenta un estado de esfuerzos N-S asociado al proceso de rifting de la apertura del Golfo de México. A este modelo se le conoce como Intersección Dorsal-Transforme (Fig. 7.2).

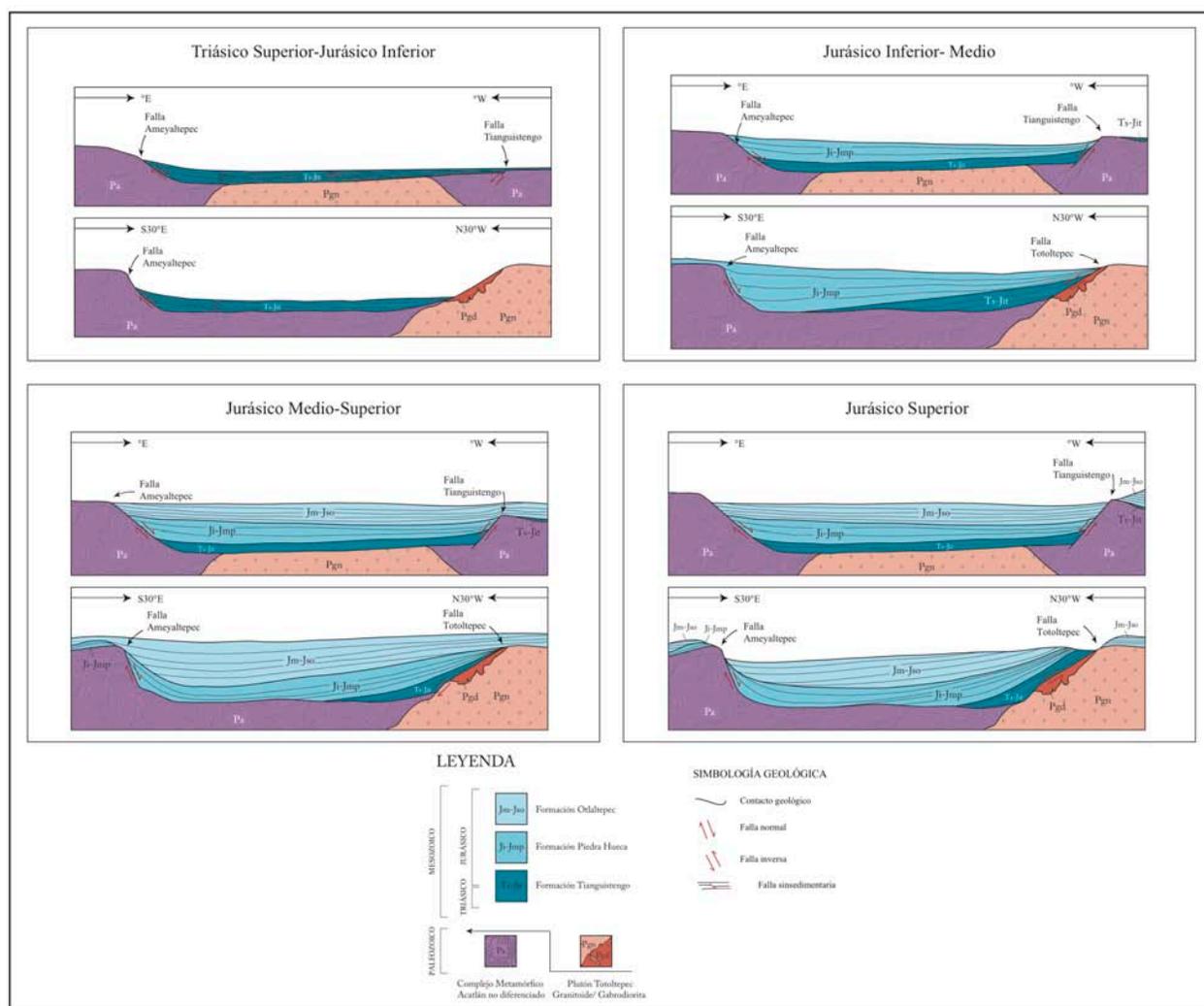


Fig. 7.2. Modelo esquemático que representa el relleno sedimentario de la cuenca Otlaltepec del Triásico Superior al Jurásico Superior. Región de Santo Domingo Tianguistengo.

En conclusión, la cuenca Otlaltepec podría corresponder al tipo de cuencas descrito en el modelo tectónico Intersección Dorsal-Transforme, así como el estado de esfuerzos que actuó en los depósitos de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se reconoció la existencia de nueve unidades estratigráficas en la zona de estudio que comprenden: rocas metamórficas e ígneas que conforman el basamento regional (Complejo Acatlán); una sucesión sedimentaria triásica-jurásica dividida en las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec; una cubierta sedimentaria cretácica deformada compuesta por la formación Magdalena, Caliza Coyotepec y Unidad Pozo Hondo; sedimentos pleistocénicos, domos e intrusivos de composición riolítica.

2. Se realizó el análisis de facies en los depósitos de la formación Tianguistengo, en las columnas se identificaron seis asociaciones de facies depositadas en un ambiente de depósito de tipo aluvial-fluvial, específicamente uno de tipo llanura de inundación, que se determinó de acuerdo a las estructuras primarias, fósiles, textura y distribución de las diferentes facies.

3. De acuerdo a los resultados geocronológicos obtenidos y a las relaciones estratigráficas observadas en campo se infiere que la edad de la formación Tianguistengo es Triásico Superior-Jurásico Inferior.

4. Se recomienda hacer un análisis de las edades de los circones detríticos y los resultados petrográficos de la formación Tianguistengo, a fin de concluir la procedencia de los sedimentos de esta unidad y establecer la correlación con otras formaciones similares ubicadas en el Terreno Mixteca.

5. Se determinó que cuenca Otlaltepec se encontraba tectónicamente activa durante el depósito de las unidades triásica y jurásicas bajo un régimen extensional o transtensional. Se determinó que existieron dos campos de esfuerzos, uno durante el depósito de la formación Tianguistengo con orientaciones E-W y NE-SW (Triásico Superior-Jurásico Inferior) y otro posterior al depósito de la unidad mencionada con orientaciones N-S y NW-SE que provocó el basculamiento progresivo de las unidades sedimentarias Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec y la formación de las discordancias entre ellas (Jurásico Inferior-Jurásico Superior).

6. Parte de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec se depositaron dentro del graben formado por las fallas Ameyaltepec, Tianguistengo y Totoltepec, sin embargo existen depósitos

de estas unidades fuera de los límites del graben, el área total de la cuenca Otlaltepec no se ha definido con certeza.

7. Con base en la reconstrucción de la historia geológica de México de diversos autores, se reconoce que durante el depósito de la sucesión jurásica de interés, se estaba llevando durante las etapas previas de la apertura del Golfo de México cuyo campo de esfuerzos N-S pudo ser el que generara las discordancias mayores entre las unidades Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec.

REFERENCIAS

- Aguilera, J. G., 1906, Excursión de Tehuacán a Zapotitlán y San Juan Raya, México. Décimo Congreso Geológico Internacional, Guía de excursiones: México, 7, 27 p.
- Alencaster-de Cserna, G. y Buitrón-Sánchez, B. E., 1965. Estratigrafía y Paleontología del Jurásico Superior de la parte centromeridional del estado de Puebla. Fauna del Jurásico Superior de la Región de Petlalcingo, estado de Puebla: Paleontología Mexicana, Inst. de Geología, UNAM. Núm. 21, 53 p.
- Anderson, T.H., Schmidt, V.A. 1983. The evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time. Geological Society of America Bulletin, 94, p. 941-966.
- Arp, G., 1995. Lacustrine bloherms, spring nounds, and marginal carbonates of the Ries-Impact-Crater (Miocene, Southern Germany), Facies, 33, p. 35-90.
- Bally, A. W., Bernoulli D., Davis, G. A., and Montadert, L., 1981. Listric normal faults: Oceanológica Acta, 26th International Geological Congress Proceedings, Paris, 1980, p. 87-101 in American Association of Petroleum Geologists, Treatise of Petroleum Geology Reprint Series No. 11, Structural concepts and techniques III, p. 1-15.
- Bird, D. E., Burke, K., Hall, S.A., Casey, J. F., 2005. Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot tracks, crustal boundaries, and early salt distribution: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 89, p. 311-328.
- Bird, D.E., Burke, K., Hall, S.A., Casey, J.F., 2005. Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot tracks, crustal boundaries, and early salt distribution. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 89: p. 311-328.
- Bird, D. E., and Burke, K., 2006. Pangea breakup: Mexico, Gulf of Mexico, and Central Atlantic Ocean: in, Expanded Abstracts of the Technical Program: Society of Exploration Geophysicists 76th Annual International Meeting and Exposition, p. 1013-1016.
- Boggs, S., 2006. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Ed. Pearson Prentice Hall, 662 p.
- Caballero-Miranda, C., Morán-Zenteno, D. J., Urrutia-Fucugauchi, J., Bohnel, H., Jurado-Chichay, Z., Cabral-Cano, E., Silva-Romo, G., 1990. Paleogeography of the northern portion of the Mixteca Terrane, Southern Mexico during the Middle Jurassic: Journal of South American Earth Sciences, V.3, N. 4, p. 195-211.

- Calderón-García., A., 1956. Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Puebla: Congreso Geológico Internacional XX Sesión, México, Libreto-guía, Exc. A-11, p. 9-27.
- Campa, M. F. y Coney, P. J., 1983. Tectonostratigraphic Terranes and Mineral Resource Distributions in Mexico: Canadian Journal Earth Science, 20, p. 1040-1051.
- Centeno-García, E., 2005. Review of Upper Paleozoic and Lower Mesozoic stratigraphy and depositional environments of central and west Mexico: Constraints on terrane analysis and paleogeography. In Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., and Steiner, M.B., eds., The Mojave-Sonora megashear hypothesis: Development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393, p. 233–258.
- Centeno-García, E., Guerrero, S. M., Talavera, M. O., 2008. The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone en Drauft, A., Clift, P. D. Scholl., W., Formation and Applications of the Sedimentary Record in Arc Collision Zones: Geological Society of America Special Paper 436, p. 279-308.
- Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C. C., Silva Romo, G., 2009. Sedimentología de la formación Matzitzi (Paleozoico superior) y significado de sus componentes volcánicos, región de Los Reyes Metzontla-San Luis Atlotitlán, Estado de Puebla: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26 (1), p. 18-36.
- Clausing, A., 1990. Mikrofazies lakustriner Karbonat- horizonte des Saar-Nahe-Beckens (Unterperm, Rot- liegend, SW-Deutschland): Facies, 23, p. 121-140.
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., and Kinny, P., 2003. Atlas of zircon textures: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 53, p. 469–500.
- Cruz-Cruz, Miguel Ángel., 2012. Análisis estratigráfico de la secuencia jurásica de la región de Santo Domingo Tianguistengo, Oaxaca Santa Cruz Nuevo, Puebla: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Licenciatura, 109 p.
- Dott, R. H., 1964, Wacke, greywacke and matrix-what approach to immature sandstone classification?: Journal of Sedimentary Petrology 34, p. 625-632.
- Dickinson, W.R., Lawton, T.F., 2001. Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. Bulletin of the Geological Society of America, 113 (9): p. 1142-1160.

- Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Sanchés-Zavala, J. L., Macías-Romo, C., Ortega-Rivera, A., Iriundo, A., 2005. La Falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre continentes del sur de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, Tomo 42 (1), p. 83-109.
- Ferrusquía, V. I. y Cruz, G. V., 2003. Advances in the study of Puebla's Pleistocene mammals; the Santa Cruz local fauna: Geological Society of America, Cordilleran Section, 99th Annual Meeting. Abstracts with Programs-Geological Society of America 35 (4), 69 p.
- Fisher, N.I., Lewis, T.L., and Embleton, B.J., 1987. Statistical analysis of spherical data. Cambridge University Press, 329 p.
- Flügel, E., 2004. Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application: Springer, Berlin, 976 p.
- Fries, C. Jr., Rincón-Orta, C., 1965, Nuevas aportaciones geocronológicas y técnicas empleadas en el laboratorio de geocronometría: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 73, p. 57-133.
- Fries, Carl, J., Rincón-Orta, C., Solorio-Munguía, J., Schmitter-Vilada, E. and Cserna, Z. d., 1970. Una edad radiométrica ordovícica de Totoltepec, Estado de Puebla: Libro-guía de la excursión México-Oaxaca, Sociedad Geológica Mexicana, México D.F., pp. 164–166.
- Gehrels, G., 2012. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities: in Busby, C. and Azor-Pérez, A., Tectonics of Sedimentary Basins, Recent Advances: Chichester, UK, John Wiley and Sons, p. 47-62.
- Hatcher, R. D., 1990. Structural Geology. Principles, Concepts, and Problems. Ed. Merrill Publishing Company. 531 p.
- Horne, D. J., Holmes, J., Rodríguez-Lazaro, J. and Viehberg, F. A., 2012. Ostracoda as proxies for quaternary climate change. Ed. Elsevier. 366 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012a. Carta topográfica E14-B74, San Juan Ixcaquixtla. Escala 1:50,000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2012b. Carta topográfica E14-B84, Petlalcingo. Escala 1:50,000.
- Keppie, J. D., Sandberg, C. A., Miller, B. V., Sánchez-Zavala, J. L., Nace, R. D. and 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, p. 745-753.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Murphy, J. B., and Nance, R. D., 2008. Synthesis and tectonic interpretation of the westernmost Paleozoic Variscan orogen in southern Mexico: from rifted Rheic margin to active Pacific margin: In Pereira M.F., Bozkurt E., Strachan R., and Quesada C. (Eds.), *The Foundations and Birth of the Rheic Ocean: Avalonian–Cadmian Orogenic Processes and Early Palaeozoic Rifting at the Northern Gondwana Margin*. *Tectonophysics*. 461, p. 277–290.
- Keppie, J. D., Galaz-Escamilla, G., Helbig, M. and Kirsch, M., 2012. Amalgamation and Breakup of Pangæa: the type example of the supercontinent Cycle, 108th Annual Meeting, Fieldtrip Guidebook 1, Geological Society of America, 17 p.
- Kirsch, M., 2012. Estudio de la Geoquímica, la Estructura y el Metamorfismo en el Este del Complejo Acatlán: Implicaciones Tectónicas y Paleogeográficas: Juriquilla, Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Tesis de Doctorado, 155 p.
- Kirsch, M., Keppie J. D., Murphy B., and Solari L., 2012, Permian–Carboniferous arc magmatism and basin evolution along the western margin of Pangea: Geochemical and geochronological evidence from the eastern Acatlán Complex, southern Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 124, no. 9-10, p. 1607-1628.
- Kirsch, M., Keppie, J. D., Murphy, J. B., Lee, J. K. W., 2013. Arc plutonism in a transtensional regime: the late Palaeozoic Totoltepec pluton, Acatlán Complex, southern Mexico: *International Geology Review*. Volume 55, Issue 3. p. 263-286.
- Kraus, M. J., 1999. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications. *Earth Science Reviews*. Vol. 47, 41-70.
- Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), 2012, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, Centro de Geociencias, consultado en Junio de 2013). http://www.geociencias.unam.mx/~solari/index_files/LEI/LA-ICPMS.html
- Lisle, R., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. *Journal of Structural Geology*. Volume 50. p. 35-43.
- Macías-Romo, C., 2008. Manual de procedimientos para la técnica de separación de minerales. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 39 p.

- Marriott, S. B., 1996. Analysis and modelling of overbank deposits. En: Floodplain Processes. Ed. Anderson. M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. Wiley, Chichester, p. 63-93.
- Marton, G., Buffler, R., T., 1994, Jurassic reconstruction of the Gulf of Mexico Basin: *International Geology Review*, 36, p. 545– 586.
- McCann, T. and Saintot, A., 2003. Tracing tectonic deformation using the sedimentary record: an overview: Geological Society, London, Special Publications, 208, p. 1-28.
- McHone, J. G., 2000. Non-plume magmatism and tectonics during the opening of the central Atlantic Ocean. *Tectonophysics*, 316, p. 287-296.
- Mendoza-Rosales, C.C., y Silva-Romo, G. 1998. Icnitas de dinosaurios en la región mixteca, sur de Puebla, Mex: Libro de Resúmenes. Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, México, D. F. p. 149.F
- Miall, A. D., 2006. The geology of fluvial deposits: Ed. Springer 4a impresión, Canadá, Toronto, 582 p.
- Michalzik, D., 1991. Facies sequence of Triassic-Jurassic red beds in the Sierra Madre Oriental (NE Mexico) and its relation to the early opening of the Gulf of Mexico: *Sedimentary Geology*, 71, 3-4, 243-259.
- Middleton, V. (Ed.), 2003. *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Series: Encyclopedia of Earth Sciences Series. Ed. Springer. 928 p.
- Molostovskaya, I. I., 2000. The evolutionary history of Late Permian Darwinulocopina Sohn, 1988 (Ostracoda) from the Russian Plate in Horne, D. J. and Martens, K., 2000. *Evolutionary Biology and Ecology of Ostracoda*. Ed. Kluwer Academic Publishers, 130 p.
- Morales-Gómez M, Keppie, J.D., Norman, M., 2008. Ordovician–Silurian rift-passive margin on the Mexican margin of the Rheic Ocean overlain by Carboniferous–Permian periarc rocks: Evidence from the eastern Acatlán Complex, southern Mexico *Tectonophysics* 461, 1-4, p. 291-310.
- Morales-Gómez M., Keppie, J.D., Dostal J., 2009. Carboniferous tholeiitic dikes in the Salada unit, Acatlán Complex, southern Mexico: A record of extension on the western margin of Pangea. *Revista Mexicana Mexicana de Ciencias Geológicas* 26, 1, p. 133-142.
- Morales-Gómez, M., 2011. Estudio geológico-estructural tectónico del área de Xayacatlán del Complejo Acatlán, Puebla, Sur de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctorado, 132 p.

- Morán-Zenteno, D. J., 1987. Paleografía y paleomagnetismo precenozoicos del terreno mixteco. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis Maestría, 180 p.
- Morán-Zenteno, D. J., Caballero-Miranda, C. C., Silva-Romo, G., Ortega-Guerrero, B. y González-Torres, E., 1993. Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca terrane, Southern Mexico. *Geofísica Internacional*, vol. 32, núm 3, p. 453-473.
- Nance, R. D., Miller, B. V., Keppie, J. D., Murphy, J. B., Dostal, J., 2006. Acatlán Complex, southern Mexico: Record spanning the assembly and breakup of Pangea: *Geology*, 34, p. 857-860.
- Naylor, M. A., Larroque, J.M., Gauthier, B.D.M., 1994. Understanding extensional tectonics: insights from sand-box models, Roure F., *Geodynamic Evolution of Sedimentary Basins*, International Symposium, Moscow, 1994, 69 - 83, Editions Technif, Paris.
- Nichols, G., 2009. *Sedimentology & Stratigraphy*, Wiley-Blackwell, Malden, MA. 419 p.
- Ordóñez, E., 1905. Las rocas arcaicas de México: Memoria y Revista de la Sociedad Científica "Antonio Alzate" (México), 22, p. 315-331.
- Ordóñez, E., 1906. L'Archaique du Cañon de Tomellin, en X Congress Geologique Internationale, Guide d'excursion: México, El Congreso 5, 30 p.
- Ortega-Guerrero, B., 1989. Paleomagnetismo y Geología de las unidades clásticas Mesozoicas del área Totoltepec-Ixcaquixtla, estados de Puebla y Oaxaca: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, 155 p., inédita.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1970. Geología del cuadrángulo suroccidental de la hoja Tehuacán, estados de Puebla y Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de licenciatura, 130 p.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978. Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 2, p. 112-131.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1981. Metamorphic belts in southern Mexico and their tectonic significance: *Geofísica Internacional*, v. 20, p. 112-131.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías Romo, M. C. and López, R., 1999. Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in Southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections: *Geology*, v. 27, p. 719-722.

- Retallack, G.J., 2001. *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology*: Oxford, R.U., Blackwell Science, 404 p.
- Pérez-Alvarado, L., Alfaro, G., Palmieri, M., Dix, M., Maldonado, M., Islebe, G., Scharf, B., Schwalb, A., 2008. Paleoclima y paleoecología de las tierras bajas del norte de los neotrópicos: investigación limnológica y extracción de sedimentos del lago Petén Itzá (Guatemala): *Revista Universidad del Valle de Guatemala*, 18, p. 65-83.
- Pérez-Ibargüengoitia, J. M., Hokuto-Castillo, A. y De Cserna, Z., 1965. Estratigrafía y Paleontología del Jurásico Superior de la parte centro meridional del estado de Puebla. Reconocimiento geológico del área de Petlalcingo-Santa Cruz, Municipio de Acatlán, estado de Puebla. *Paleontología Mexicana*, Inst. de Geología, UNAM Núm. 21, 22 p.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1972. *Sand and sandstone*: Springer, Berlín, 618 p.
- Pindell, J. L., 1985. Alleghanian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and Proto-Caribbean, *Tectonics* 4, p. 1–39.
- Pindell, J. L., 1994. Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean, en S.K. Donovan, T.A. Jackson, eds., *Caribbean geology: An introduction*: Kingston, University of the West Indies Publishers Association, p. 13– 39.
- Ramos-Leal, J. A., 1989. *Estratigrafía y evolución Paleambiental del área de San Juan Ixcaquixtla, Edo. de Puebla*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 70 p. inédita.
- Ramsay, J.G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill Book Company, 568 p.
- Rubatto, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism: *Chemical Geology*, v. 184, p. 123–138.
- Ruíz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutiérrez, F. 1988. Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of Mexico from Nd isotopic studies: *Geological Society of America Bulletin*, 100, p. 274–281.
- Salas, G. P., 1949. Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca: *Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros*. V. 1, p. 79-156.
- Salvador, A., 1991. Origin and development of the Gulf of Mexico Basin. En A. Salvador, ed., *The Gulf of Mexico Basin: Geological Society of America. The Geology of North America*, J: 389– 444.

- Sánchez-Zavala, J. L., 2008. Estratigrafía, sedimentología y análisis de procedencia de la Formación Tecomate y su papel en la evolución del Complejo Acatlán, Sur de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctorado, 201 p.
- Sánchez-Zavala, J. L., Ortega-Gutiérrez, F., Duncan Keppie, J., Jenner, G. A., Belousova, E. and Macías-Romo, C., 2004. Ordovician and Mesoproterozoic Zircons from the Tecomate Formation and Esperanza Granitoids, Acatlán Complex, Southern Mexico: Local Provenance in the Acatlán and Oaxacan Complexes. *International Geology Review* 46, 11, p.1005-1021.
- Schweigert, G., 1996. Vergleichende Faziesanalyse, Paläo-ökologie und, paläogeographisches Umfeld tertiärer SiB- wasserkarbonate auf der westlichen Schwabischen Alb und im Hegau (Baden-Württemberg), *Profil*, 9, p. 1-100.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., Speed, R. C. 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geological Society of America, Special Paper* 278. 153 p.
- Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C. C., 2000. La Unidad Piedra Hueca secuencia clásica Paleozoica (sur de Puebla). Resúmenes y Programa de la 2da. Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. *GEOS Boletín informativo Unión Geofísica Mexicana*, A. C. Época II. 20.
- Silva-Romo, G., 2010. Origen tectónico y evolución de la Cuenca Tehuiztingo-Tepexi, Estado de Puebla: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctorado, 196 p.
- Silva-Romo, G. y Mendoza-Rosales, C. C., 2011. Manual para el Trabajo Geológico de Campo. México, UNAM, Facultad de Ingeniería. Primera edición, 372 p.
- Silva-Romo G. Mendoza-Rosales C. C., Campos-Madrigal E., Centeno-García E., Peralta-Salazar R. 2015. Early Mesozoic Southern Mexico–Amazonian connection based on U–Pb ages from detrital zircons: The La Mora Paleo-River in the Mixteca Terrane and its paleogeographic and tectonic implications. *Gondwana Research* 28, p. 689-701.
- Shelton, J. W., 1984. Listric Normal Faults: An Illustrated Summary. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol 68, No 7, p. 801-015 in *American Association of Petroleum Geologists, Treatise of Petroleum Geology Reprint Series No. 11, Structural concepts and techniques III*, p. 17–31.

- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010. U-Pb Zircon Geochronology with an Integrated LA-ICP-MS Microanalytical Workstation: Achievements in Precision and Accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*. Volume 34, Issue 1, p. 5–18.
- Solari, L. and Tanner, M., 2011. UPb age, a fast data reduction script for LA-ICP-MS U-Pb geochronology, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28 (1), p. 83–91.
- Solari, L. A., Keppie, J. D., Ortega-Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Lopez, R., and Hames, W. E., 2003. 990 and 1100 Ma Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: Roots of an orogen: *Tectonophysics*, V. 365, no. 1–4, p. 257–282.
- Spahic, D., Exner, U., Behm, M., Grasemann, B., Haring, A. and Pretsch, H., 2011. Listric versus planar normal fault geometry: an example from the Eisenstadt-Sopron Basin (E Austria), *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 100, p. 1685-1695.
- Stapf, K. R. G., 1989. Biogene fluvio-lakustrine Sedimentation im Rotliegend des permokarbonen Saar-Nahe- Beckens (SW-Deutschland), *Facies* 20, p. 169-198.
- Talavera-Mendoza, O., Ruíz, J., Gehrels, G. E., Meza-Figueroa, D. M., Vega-Granillo, R., Campa-Uranga, 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*, v. 235, p. 682–699.
- Tera, F., and Wasserburg, G.J., 1972. U-Th-Pb systematic in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 14, p. 281–304.
- Thorp, J. T. and Covich A. P., 2010. Ecology and classification of North American freshwaters invertebrates. Ed. Academic Press. 1021 p.
- Tolson, G., 2005. La falla Chacalapa en el sur de Oaxaca: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen Conmemorativo del Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México. V. 57, p. 111-122.
- Tovar-Liceaga, R. E., 2005. Fauna pleistocénica de Santa Cruz Nuevo, Puebla: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de licenciatura, 120 p.

-
- Vachard, D., de Dios, A. F., Buitrón, B. E., and Grajales, M., 2000. Biostratigraphie par fusulines des calcaires Carbonifères et Permians de San Salvador Patlanoaya (Puebla, Mexique): *Geobios*, v. 33, no. 1, p. 5–33.
- Wernicke, B., and Burchfiel, B. C., 1981. Modes of extensional tectonics: *Journal of Structural Geology*, v. 4, no. 2, p. 105-115.
- Yañez, P., Ruíz, J., Patchett, J. P., Ortega-Gutiérrez, F., and Gehrels, G. E., 1991. Isotopic studies of the Acatlán Complex, southern Mexico: implications for Paleozoic North American tectonics. *Geological Society of America Bulletin* 103, p. 817–828.

APÉNDICE I

TECTÓNICA SINSEDIMENTARIA

I.I. DATOS ESTRUCTURALES PARA MODELO DE SEDIMENTACIÓN SINTECTÓNICA

Tabla A.I.I. Datos de rumbo y echado de los planos de estratificación de las sucesiones sedimentarias mayores identificadas en el Sector 1, la localidad de medición se ubica sobre la Barranca El Chorrillo al noreste del área de estudio.

| SECTOR 1 | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|------------|-----------------------|----------|-----------|------------|-----------------------|
| FORMACIÓN OTLALTEPEC | | | | | | | |
| LOCALIDAD: BARRANCA EL CHORRILLO | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 310 | 20 | Barranca El Chorrillo | 23 | 330 | 38 | Barranca El Chorrillo |
| 2 | 315 | 20 | | 24 | 310 | 25 | |
| 3 | 290 | 25 | | 25 | 300 | 20 | |
| 4 | 300 | 20 | | 26 | 290 | 20 | |
| 5 | 318 | 18 | | 27 | 310 | 24 | |
| 6 | 318 | 20 | | 28 | 270 | 32 | |
| 7 | 305 | 32 | | 29 | 330 | 24 | |
| 8 | 270 | 18 | | 30 | 300 | 22 | |
| 9 | 295 | 28 | | 31 | 300 | 25 | |
| 10 | 305 | 28 | | 32 | 302 | 22 | |
| 11 | 318 | 20 | | 33 | 306 | 28 | |
| 12 | 290 | 20 | | 34 | 292 | 24 | |
| 13 | 268 | 20 | | 35 | 270 | 45 | |
| 14 | 295 | 28 | | 36 | 280 | 50 | |
| 15 | 258 | 30 | | 37 | 246 | 30 | |
| 16 | 276 | 22 | | 38 | 250 | 26 | |
| 17 | 292 | 24 | | 39 | 280 | 50 | |
| 18 | 292 | 4 | | 40 | 240 | 28 | |
| 19 | 284 | 20 | | 41 | 258 | 28 | |
| 20 | 295 | 30 | | 42 | 284 | 24 | |
| 21 | 315 | 26 | | 43 | 290 | 17 | |
| 22 | 310 | 22 | | 44 | 268 | 31 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|----------------------|
| 45 | 264 | 20 | Barranca El Chorillo |
| 46 | 268 | 20 | |
| 47 | 264 | 19 | |
| 48 | 278 | 27 | |
| 49 | 271 | 20 | |
| 50 | 295 | 12 | |
| 51 | 294 | 37 | |
| 52 | 298 | 24 | |
| 53 | 303 | 22 | |
| 54 | 326 | 25 | |
| 55 | 339 | 25 | |
| 56 | 317 | 22 | |
| 57 | 277 | 29 | |
| 58 | 289 | 26 | |
| 59 | 299 | 12 | |
| 60 | 261 | 19 | |
| 61 | 262 | 20 | |
| 62 | 274 | 26 | |
| 63 | 289 | 14 | |
| 64 | 293 | 33 | |
| 65 | 291 | 29 | |
| 66 | 293 | 29 | |
| 67 | 298 | 19 | |
| 68 | 300 | 22 | |
| 69 | 300 | 20 | |
| 70 | 295 | 20 | |
| 71 | 280 | 22 | |
| 72 | 292 | 18 | |
| 73 | 294 | 22 | |
| 74 | 290 | 18 | |
| 75 | 275 | 20 | |
| 76 | 278 | 24 | |
| 77 | 300 | 22 | |
| 78 | 302 | 40 | |
| 79 | 282 | 22 | |
| 80 | 276 | 24 | |
| 81 | 282 | 24 | |
| 82 | 300 | 24 | |
| 83 | 304 | 38 | |
| 84 | 324 | 24 | |
| 85 | 298 | 36 | |
| 86 | 308 | 38 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|----------------------|
| 87 | 314 | 36 | Barranca El Chorillo |
| 88 | 290 | 30 | |
| 89 | 316 | 10 | |
| 90 | 288 | 22 | |
| 91 | 280 | 40 | |
| 92 | 294 | 24 | |
| 93 | 290 | 32 | |
| 94 | 294 | 18 | |
| 95 | 305 | 38 | |
| 96 | 288 | 32 | |
| 97 | 292 | 24 | |
| 98 | 310 | 20 | |
| 99 | 298 | 34 | |
| 100 | 300 | 30 | |
| 101 | 302 | 32 | |

Tabla AI.II. Datos de rumbo y echado de los planos de estratificación de las sucesiones sedimentarias mayores identificadas en el Sector 2, la localidad de medición se ubica sobre la Barranca Agua León y en las cercanías del Poblado Santa Cruz Nuevo al noreste del área de estudio.

| SECTOR 2 | | | | | | | |
|--|--------------|---------------|--------------------------------|---|--------------|---------------|-----------------------|
| FORMACIÓN PIEDRA HUECA LOCALIDAD: POBLADO SANTA CRUZ NUEVO | | | | FORMACIÓN OTLALTEPEC LOCALIDADES: BARRANCA AGUA LEÓN Y POBLADO SANTA CRUZ NUEVO | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 225 | 27 | Poblado Santa Cruz Nuevo | 1 | 227 | 9 | Barranca Agua León |
| 2 | 220 | 30 | | 2 | 273 | 19 | |
| 3 | 220 | 35 | | 3 | 280 | 8 | |
| 4 | 220 | 35 | | 4 | 225 | 19 | |
| 5 | 218 | 40 | | 5 | 236 | 16 | |
| 6 | 230 | 28 | | 6 | 270 | 3 | |
| 7 | 232 | 30 | | 7 | 240 | 35 | |
| 8 | 235 | 32 | | 8 | 228 | 10 | |
| 9 | 240 | 40 | | 9 | 236 | 20 | |
| 10 | 242 | 33 | | 10 | 240 | 18 | |
| 11 | 245 | 34 | | 11 | 236 | 22 | |
| 12 | 224 | 26 | | 12 | 240 | 21 | |
| 13 | 226 | 27 | | 13 | 180 | 35 | |
| | | | 14 | 190 | 45 | | |
| | | | 15 | 210 | 30 | | |
| | | | 16 | 195 | 10 | | |
| | | | 17 | 200 | 20 | | |
| | | | 18 | 180 | 32 | | |
| | | | 19 | 190 | 30 | | |
| | | | 20 | 200 | 20 | | |
| | | | 21 | 200 | 10 | | |
| | | | 22 | 198 | 15 | | |
| | | | 23 | 195 | 16 | | |
| | | | 24 | 199 | 17 | | |
| | | | 25 | 195 | 25 | | |
| | | | 26 | 198 | 22 | | |
| | | | 27 | 180 | 30 | | |

Tabla AI.III. Datos de rumbo y echado de los planos de estratificación de las sucesiones sedimentarias mayores identificadas en el Sector 3, la localidad de medición se ubica sobre la Barranca Agua León y en las cercanías del Poblado Santa Cruz Nuevo al noreste del área de estudio.

| SECTOR 3 | | | | | | | |
|---|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| FORMACIÓN TIANGUISTENGO | | | | | | | |
| LOCALIDADES: BARRANCA MAGDALENA 1, BARRANCA MAGDALENA 2, POBLADO SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO Y CERRO XIOTILLO | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 240 | 80 | Barranca Magdalena 1 | 32 | 268 | 68 | Barranca Magdalena 1 |
| 2 | 238 | 80 | | 33 | 270 | 70 | |
| 3 | 254 | 84 | | 34 | 270 | 64 | |
| 4 | 244 | 76 | | 35 | 270 | 62 | |
| 5 | 254 | 80 | | 36 | 266 | 72 | |
| 6 | 300 | 75 | | 37 | 262 | 70 | |
| 7 | 300 | 80 | | 38 | 256 | 65 | |
| 8 | 260 | 64 | | 39 | 272 | 55 | |
| 9 | 260 | 70 | | 40 | 257 | 69 | |
| 10 | 252 | 50 | | 41 | 265 | 71 | |
| 11 | 260 | 76 | | 42 | 280 | 80 | |
| 12 | 250 | 70 | | 43 | 273 | 69 | |
| 13 | 260 | 48 | | 44 | 270 | 69 | |
| 14 | 222 | 64 | | 45 | 270 | 58 | |
| 15 | 232 | 60 | | 46 | 271 | 70 | |
| 16 | 276 | 62 | | 47 | 258 | 72 | |
| 17 | 272 | 60 | | 48 | 263 | 72 | |
| 18 | 274 | 76 | | 49 | 260 | 70 | |
| 19 | 260 | 76 | | 50 | 262 | 62 | |
| 20 | 270 | 62 | | 51 | 258 | 72 | |
| 21 | 258 | 74 | | 52 | 268 | 76 | |
| 22 | 262 | 68 | | 53 | 272 | 70 | |
| 23 | 266 | 66 | | 54 | 264 | 62 | |
| 24 | 256 | 74 | | 55 | 268 | 74 | |
| 25 | 290 | 76 | | 56 | 282 | 72 | |
| 26 | 262 | 76 | | 57 | 274 | 82 | |
| 27 | 260 | 60 | | 58 | 264 | 74 | |
| 28 | 270 | 70 | | 59 | 266 | 72 | |
| 29 | 262 | 70 | | 60 | 260 | 82 | |
| 30 | 268 | 74 | | 61 | 242 | 74 | |
| 31 | 266 | 70 | | 62 | 258 | 70 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|----------------|-------------------------------------|
| 63 | 264 | 78 | Barranca Magdalena 1 | 93 | 270 | 90 | Barranca Magdalena 2 |
| 64 | 262 | 72 | | 94 | 290 | 90 | |
| 65 | 168 | 78 | | 95 | 245 | 64 | Poblado Santo Domingo Tianguistengo |
| 66 | 170 | 78 | | 96 | 270 | 68 | |
| 67 | 258 | 68 | | 97 | 250 | 68 | |
| 68 | 266 | 78 | | 98 | 268 | 60 | |
| 69 | 266 | 72 | | 99 | 265 | 68 | |
| 70 | 300 | 28 | | 100 | 279 | 62 | |
| 71 | 274 | 32 | | 101 | 270 | 70 | |
| 72 | 258 | 40 | | 102 | 255 | 65 | |
| 73 | 246 | 44 | 103 | 256 | 63 | | |
| 74 | 258 | 46 | 104 | 257 | 64 | | |
| 75 | 248 | 40 | 105 | 260 | 65 | Cerro Xiotillo | |
| 76 | 274 | 40 | 106 | 270 | 69 | | |
| 77 | 260 | 32 | 107 | 255 | 70 | | |
| 78 | 254 | 46 | 108 | 254 | 70 | | |
| 79 | 274 | 78 | 109 | 255 | 70 | | |
| 80 | 262 | 62 | 110 | 240 | 51 | | |
| 81 | 268 | 78 | 111 | 250 | 85 | | |
| 82 | 288 | 50 | 112 | 265 | 55 | | |
| 83 | 286 | 78 | 113 | 275 | 51 | | |
| 84 | 284 | 82 | 114 | 265 | 70 | | |
| 85 | 276 | 74 | 115 | 266 | 70 | | |
| 86 | 286 | 86 | 116 | 268 | 66 | | |
| 87 | 296 | 89 | 117 | 271 | 67 | | |
| 88 | 279 | 80 | 118 | 272 | 80 | | |
| 89 | 252 | 66 | 119 | 273 | 65 | | |
| 90 | 280 | 86 | 120 | 269 | 60 | | |
| 91 | 284 | 89 | 121 | 258 | 70 | | |
| 92 | 276 | 50 | | | | | |

| FORMACIÓN PIEDRA HUECA | | | | | | | |
|---|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| LOCALIDADES: BARRANCA MAGDALENA 1, POBLADO SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO Y CERRO XIOTILLO | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 267 | 47 | Barranca Magdalena 1 | 6 | 272 | 62 | Barranca Magdalena 1 |
| 2 | 268 | 38 | | 7 | 265 | 65 | |
| 3 | 266 | 50 | | 8 | 260 | 50 | |
| 4 | 256 | 56 | | 9 | 235 | 60 | |
| 5 | 258 | 65 | | 10 | 262 | 58 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| 11 | 248 | 55 | Barranca Magdalena 1 | 53 | 252 | 50 | Barranca Magdalena 1 |
| 12 | 245 | 20 | | 54 | 234 | 50 | |
| 13 | 284 | 40 | | 55 | 240 | 82 | |
| 14 | 270 | 34 | | 56 | 264 | 38 | |
| 15 | 286 | 49 | | 57 | 266 | 42 | |
| 16 | 289 | 45 | | 58 | 264 | 50 | |
| 17 | 274 | 44 | | 59 | 256 | 54 | |
| 18 | 270 | 52 | | 60 | 246 | 70 | |
| 19 | 276 | 50 | | 61 | 248 | 74 | |
| 20 | 270 | 48 | | 62 | 252 | 66 | |
| 21 | 280 | 44 | | 63 | 268 | 50 | |
| 22 | 280 | 30 | | 64 | 260 | 50 | |
| 23 | 300 | 30 | | 65 | 256 | 54 | |
| 24 | 290 | 32 | | 66 | 252 | 38 | |
| 25 | 272 | 20 | | 67 | 300 | 20 | |
| 26 | 268 | 30 | | 68 | 254 | 60 | |
| 27 | 280 | 28 | | 69 | 242 | 40 | |
| 28 | 274 | 40 | | 70 | 256 | 66 | |
| 29 | 290 | 36 | | 71 | 250 | 64 | |
| 30 | 262 | 40 | | 72 | 254 | 60 | |
| 31 | 258 | 35 | | 73 | 242 | 50 | |
| 32 | 260 | 30 | | 74 | 254 | 56 | |
| 33 | 284 | 30 | | 75 | 262 | 72 | |
| 34 | 310 | 30 | | 76 | 254 | 48 | |
| 35 | 280 | 24 | | 77 | 278 | 44 | |
| 36 | 276 | 32 | | 78 | 254 | 54 | |
| 37 | 309 | 48 | | 79 | 266 | 20 | |
| 38 | 290 | 30 | | 80 | 270 | 32 | |
| 39 | 332 | 22 | | 81 | 270 | 34 | |
| 40 | 254 | 20 | | 82 | 270 | 30 | |
| 41 | 270 | 60 | | 83 | 252 | 48 | |
| 42 | 258 | 48 | | 84 | 260 | 52 | |
| 43 | 281 | 27 | | 85 | 264 | 44 | |
| 44 | 284 | 30 | | 86 | 260 | 64 | |
| 45 | 287 | 20 | | 87 | 258 | 50 | |
| 46 | 262 | 32 | | 88 | 255 | 62 | |
| 47 | 250 | 54 | | 89 | 252 | 68 | |
| 48 | 262 | 50 | | 90 | 268 | 58 | |
| 49 | 268 | 70 | | 91 | 260 | 60 | |
| 50 | 250 | 38 | | 92 | 264 | 70 | |
| 51 | 268 | 48 | | 93 | 264 | 46 | |
| 52 | 264 | 34 | | 94 | 260 | 70 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|------------|-------------------------------------|
| 95 | 268 | 75 | Barranca Magdalena 1 | 109 | 272 | 44 | Poblado Santo Domingo Tianguistengo |
| 96 | 260 | 58 | | 110 | 250 | 40 | |
| 97 | 252 | 62 | | 111 | 260 | 45 | |
| 98 | 256 | 36 | | 112 | 268 | 42 | |
| 99 | 240 | 50 | | 113 | 285 | 60 | |
| 100 | 270 | 30 | | 114 | 270 | 33 | Cerro Xiotillo |
| 101 | 270 | 50 | | 115 | 255 | 56 | |
| 102 | 258 | 46 | | 116 | 255 | 40 | |
| 103 | 270 | 45 | | 117 | 260 | 36 | |
| 104 | 272 | 40 | | 118 | 269 | 37 | |
| 105 | 268 | 41 | 119 | 268 | 40 | | |
| 106 | 267 | 38 | 120 | 259 | 41 | | |
| 107 | 250 | 39 | 121 | 258 | 42 | | |
| 108 | 270 | 44 | 122 | 260 | 59 | | |

| FORMACIÓN OTLALTEPEC | | | | | | | |
|---|-----------|------------|----------------------|----------|-----------|------------|----------------------|
| LOCALIDADES: BARRANCA MAGDALENA 1, POBLADO SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO Y RINCÓN EL COCO | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 259 | 30 | Barranca Magdalena 1 | 22 | 290 | 25 | Barranca Magdalena 1 |
| 2 | 253 | 15 | | 23 | 300 | 20 | |
| 3 | 293 | 22 | | 24 | 318 | 18 | |
| 4 | 278 | 32 | | 25 | 318 | 20 | |
| 5 | 290 | 25 | | 26 | 305 | 32 | |
| 6 | 252 | 38 | | 27 | 270 | 18 | |
| 7 | 293 | 28 | | 28 | 295 | 28 | |
| 8 | 330 | 25 | | 29 | 305 | 28 | |
| 9 | 316 | 25 | | 30 | 318 | 20 | |
| 10 | 303 | 26 | | 31 | 290 | 20 | |
| 11 | 310 | 25 | | 32 | 268 | 20 | |
| 12 | 324 | 23 | | 33 | 295 | 28 | |
| 13 | 292 | 24 | | 34 | 258 | 30 | |
| 14 | 90 | 10 | | 35 | 276 | 22 | |
| 15 | 120 | 22 | | 36 | 292 | 24 | |
| 16 | 116 | 30 | | 37 | 292 | 4 | |
| 17 | 126 | 20 | | 38 | 284 | 20 | |
| 18 | 98 | 22 | | 39 | 295 | 30 | |
| 19 | 128 | 20 | | 40 | 315 | 26 | |
| 20 | 310 | 20 | | 41 | 310 | 22 | |
| 21 | 315 | 20 | | 42 | 330 | 38 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | |
|----------|-----------|------------|----------------------|-------------------------------------|
| 43 | 310 | 25 | Barranca Magdalena 1 | |
| 44 | 300 | 20 | | |
| 45 | 290 | 20 | | |
| 46 | 310 | 24 | | |
| 47 | 270 | 32 | | |
| 48 | 330 | 24 | | |
| 49 | 300 | 22 | | |
| 50 | 300 | 25 | | |
| 51 | 302 | 22 | | |
| 52 | 306 | 28 | | |
| 53 | 292 | 24 | | |
| 54 | 270 | 45 | | |
| 55 | 280 | 50 | | |
| 56 | 246 | 30 | | |
| 57 | 250 | 26 | | |
| 58 | 280 | 50 | | |
| 59 | 240 | 28 | | |
| 60 | 320 | 24 | | Poblado Santo Domingo Tianguistengo |
| 61 | 322 | 21 | | |
| 62 | 318 | 16 | | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|-------------------------------------|
| 63 | 320 | 19 | Poblado Santo Domingo Tianguistengo |
| 64 | 317 | 15 | |
| 65 | 321 | 25 | |
| 66 | 323 | 18 | |
| 67 | 325 | 20 | |
| 68 | 322 | 20 | |
| 69 | 318 | 14 | |
| 70 | 278 | 46 | |
| 71 | 302 | 48 | |
| 72 | 290 | 44 | |
| 73 | 288 | 42 | |
| 74 | 286 | 41 | |
| 75 | 291 | 42 | |
| 76 | 292 | 44 | |
| 77 | 290 | 30 | |

Tabla AI.IV. Datos de rumbo y echado de los planos de estratificación de las sucesiones sedimentarias mayores identificadas en el Sector 4, la localidad de medición se ubica sobre la Barranca Cazahuate, Barranca Piedra Hueca y sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del Cerro La Matanza.

| SECTOR 4 | | | | | | | | |
|--|-----------|------------|--------------------|----|----------|-----------|------------|------------------|
| FORMACIÓN TIANGUISTENGO | | | | | | | | |
| LOCALIDADES: BARRANCA CAZAHUATE Y CERRO LA MATANZA | | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 266 | 62 | Barranca Cazahuate | | 19 | 250 | 62 | Cerro La Matanza |
| 2 | 267 | 60 | | | 20 | 240 | 60 | |
| 3 | 256 | 60 | | | 21 | 240 | 63 | |
| 4 | 267 | 71 | | | 22 | 250 | 76 | |
| 5 | 265 | 69 | | | 23 | 262 | 68 | |
| 6 | 267 | 70 | | | 24 | 260 | 68 | |
| 7 | 263 | 72 | | | 25 | 258 | 76 | |
| 8 | 262 | 70 | | | 26 | 270 | 70 | |
| 9 | 262 | 60 | | | 27 | 260 | 60 | |
| 10 | 260 | 69 | | | 28 | 240 | 60 | |
| 11 | 285 | 71 | | | 29 | 260 | 49 | |
| 12 | 266 | 79 | | | 30 | 243 | 54 | |
| 13 | 283 | 79 | | | 31 | 245 | 60 | |
| 14 | 282 | 83 | | | 32 | 240 | 55 | |
| 15 | 260 | 75 | | | 33 | 257 | 62 | |
| 16 | 270 | 62 | Cerro La Matanza | 34 | 259 | 70 | | |
| 17 | 258 | 74 | | | 35 | 256 | 72 | |
| 18 | 250 | 50 | | | | | | |

| FORMACIÓN PIEDRA HUECA | | | | | | | | |
|---|-----------|------------|--------------------|--|----------|-----------|------------|--------------------|
| LOCALIDADES: BARRANCA CAZAHUATE, CERRO LA MATANZA Y BARRANCA PIEDRA HUECA | | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 250 | 49 | Barranca Cazahuate | | 6 | 243 | 68 | Barranca Cazahuate |
| 2 | 236 | 52 | | | 7 | 241 | 59 | |
| 3 | 257 | 59 | | | 8 | 273 | 48 | |
| 4 | 258 | 52 | | | 9 | 253 | 28 | |
| 5 | 242 | 53 | | | 10 | 269 | 26 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|-----------------------|----------|-----------|------------|--------------------------|
| 11 | 273 | 39 | Barranca Cazahuate | 43 | 200 | 58 | Barranca Piedra Hueca |
| 12 | 224 | 33 | | 44 | 201 | 40 | |
| 13 | 300 | 26 | | 45 | 208 | 26 | |
| 14 | 238 | 25 | | 46 | 245 | 70 | |
| 15 | 314 | 30 | | 47 | 240 | 38 | |
| 16 | 273 | 30 | | 48 | 242 | 54 | |
| 17 | 276 | 35 | | 49 | 194 | 20 | |
| 18 | 255 | 29 | | 50 | 164 | 18 | |
| 19 | 278 | 24 | | 51 | 160 | 16 | |
| 20 | 306 | 24 | | 52 | 250 | 10 | |
| 21 | 330 | 49 | | 53 | 190 | 26 | |
| 22 | 262 | 20 | | 54 | 220 | 20 | |
| 23 | 350 | 20 | | 55 | 240 | 20 | |
| 24 | 247 | 22 | | 56 | 258 | 50 | |
| 25 | 300 | 24 | | 57 | 260 | 52 | |
| 26 | 259 | 30 | | 58 | 248 | 50 | |
| 27 | 253 | 15 | | 59 | 233 | 44 | |
| 28 | 293 | 22 | | 60 | 235 | 35 | |
| 29 | 278 | 32 | | 61 | 243 | 47 | |
| 30 | 290 | 25 | | 62 | 252 | 45 | |
| 31 | 252 | 38 | | 63 | 230 | 61 | |
| 32 | 252 | 38 | | 64 | 195 | 42 | |
| 33 | 250 | 34 | | 65 | 190 | 44 | |
| 34 | 248 | 49 | | 66 | 209 | 36 | |
| 35 | 245 | 25 | | 67 | 232 | 35 | |
| 36 | 226 | 30 | | 68 | 210 | 39 | |
| 37 | 240 | 27 | | 69 | 244 | 12 | |
| 38 | 230 | 25 | | 70 | 225 | 11 | |
| 39 | 240 | 50 | | 71 | 225 | 31 | |
| 40 | 245 | 27 | | 72 | 240 | 44 | |
| 41 | 255 | 48 | 73 | 255 | 24 | | |
| 42 | 253 | 39 | | | | | |
| | | | Cerro La Matanza | | | | |

**FORMACIÓN OTLALTEPEC
LOCALIDAD: BARRANCA PIEDRA HUECA**

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|--------------------------|----------|-----------|------------|--------------------------|
| 1 | 300 | 5 | Barranca Piedra Hueca | 4 | 300 | 8 | Barranca Piedra Hueca |
| 2 | 255 | 15 | | 5 | 292 | 10 | |
| 3 | 295 | 5 | | 6 | 290 | 15 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|--------------------------|
| 7 | 300 | 6 | Barranca Piedra Hueca |
| 8 | 301 | 7 | |
| 9 | 299 | 10 | |
| 10 | 298 | 11 | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|--------------------------|
| 11 | 300 | 8 | Barranca Piedra Hueca |
| 12 | 295 | 8 | |
| 13 | 290 | 11 | |

Tabla AI.V. Datos de rumbo y echado de los planos de estratificación de las sucesiones sedimentarias mayores identificadas en el Sector 5, la localidad de medición se ubica sobre la Barranca Cazahuate, Barranca Piedra Hueca y sobre el lecho del Río Magdalena en las cercanías del Cerro La Matanza.

| SECTOR 5 | | | | | | | |
|---|-----------|------------|------------------|----------|-----------|------------|-----------------------|
| FORMACIÓN TIANGUISTENGO | | | | | | | |
| LOCALIDADES: CERRO ALEGRÍA, BARRANCA TEDIGNO 1 Y BARRANCA TEDIGNO 2 | | | | | | | |
| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
| 1 | 276 | 70 | Cerro Alegría | 30 | 265 | 76 | Barranca Tedigno 1 |
| 2 | 279 | 69 | | 31 | 260 | 75 | |
| 3 | 278 | 66 | | 32 | 255 | 38 | |
| 4 | 270 | 48 | | 33 | 270 | 53 | |
| 5 | 272 | 65 | | 34 | 258 | 74 | |
| 6 | 258 | 69 | | 35 | 230 | 54 | |
| 7 | 266 | 70 | | 36 | 208 | 48 | |
| 8 | 268 | 71 | | 37 | 250 | 50 | |
| 9 | 273 | 71 | | 38 | 240 | 51 | |
| 10 | 274 | 69 | | 39 | 250 | 62 | |
| 11 | 278 | 64 | | 40 | 240 | 60 | |
| 12 | 269 | 73 | | 41 | 230 | 58 | |
| 13 | 244 | 80 | 42 | 240 | 63 | | |
| 14 | 243 | 85 | 43 | 250 | 76 | | |
| 15 | 244 | 90 | 44 | 262 | 68 | | |
| 16 | 237 | 88 | 45 | 216 | 68 | | |
| 17 | 226 | 80 | 46 | 260 | 68 | | |
| 18 | 242 | 80 | 47 | 262 | 64 | | |
| 19 | 252 | 68 | 48 | 269 | 62 | | |
| 20 | 261 | 85 | 49 | 278 | 60 | | |
| 21 | 254 | 69 | 50 | 265 | 62 | | |
| 22 | 228 | 60 | 51 | 256 | 64 | | |
| 23 | 259 | 53 | 52 | 225 | 60 | | |
| 24 | 263 | 79 | 53 | 270 | 84 | | |
| 25 | 274 | 73 | 54 | 261 | 70 | | |
| 26 | 273 | 68 | 55 | 258 | 76 | | |
| 27 | 288 | 77 | 56 | 270 | 70 | | |
| 28 | 284 | 78 | 57 | 270 | 78 | | |
| 29 | 275 | 75 | 58 | 270 | 79 | | |

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|--------------------|----------|-----------|------------|--------------------|
| 59 | 260 | 78 | Barranca Tedigno 2 | 66 | 270 | 75 | Barranca Tedigno 2 |
| 60 | 250 | 44 | | 67 | 269 | 72 | |
| 61 | 250 | 45 | | 68 | 265 | 55 | |
| 62 | 264 | 70 | | 69 | 270 | 60 | |
| 63 | 265 | 51 | | 70 | 259 | 61 | |
| 64 | 269 | 63 | | 71 | 269 | 59 | |
| 65 | 268 | 90 | | 72 | 268 | 72 | |

FORMACIÓN PIEDRA HUECA
LOCALIDAD: BARRANCA TEDIGNO 2

| Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad | Medición | Rumbo (°) | Echado (°) | Localidad |
|----------|-----------|------------|--------------------|----------|-----------|------------|--------------------|
| 1 | 278 | 42 | Barranca Tedigno 2 | 7 | 273 | 45 | Barranca Tedigno 2 |
| 2 | 275 | 40 | | 8 | 275 | 45 | |
| 3 | 260 | 46 | | 9 | 280 | 45 | |
| 4 | 273 | 50 | | 10 | 280 | 42 | |
| 5 | 255 | 40 | | 11 | 281 | 39 | |
| 6 | 254 | 40 | | | | | |

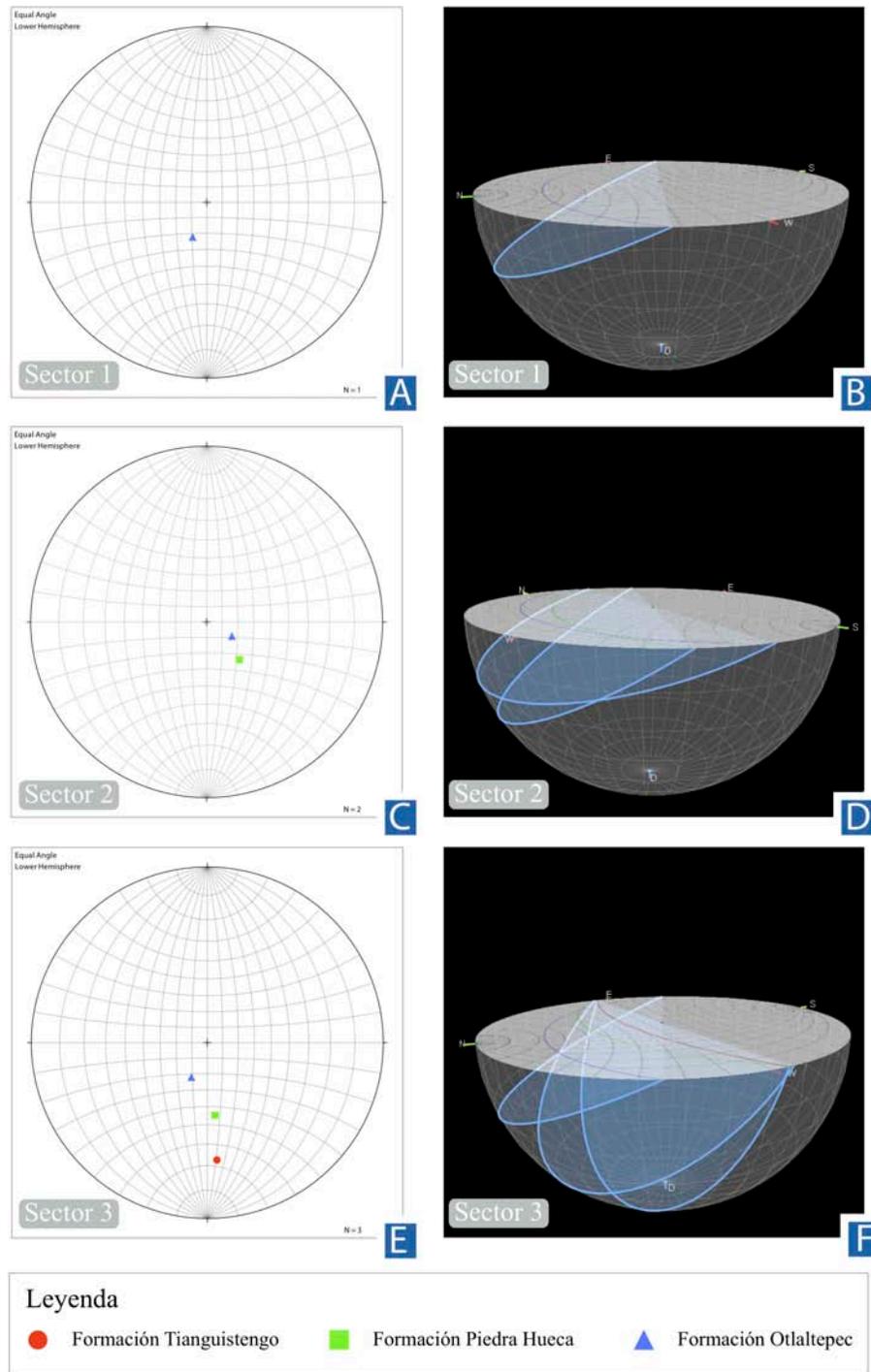


Fig. A.1.1. A, C y E) Diagramas estereográficos en los que se observan los polos de los valores promedio de las estratificaciones de las sucesiones sedimentarias documentadas en este trabajo, en los Sectores 1, 2 y 3. B, D y E) Representación de los planos promedio de estratificación de las sucesiones sedimentarias en vista 3D (OSXStereonet Versión 2.1).

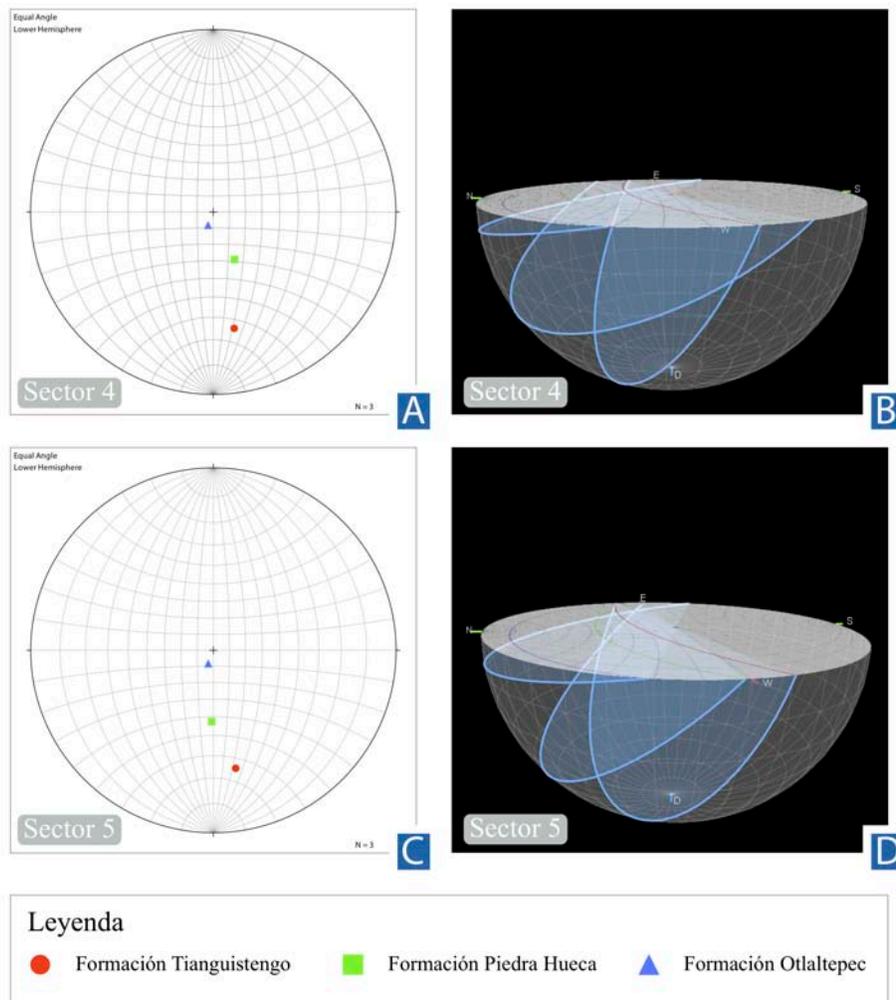


Fig. A.1.2. A, C y E) Diagramas estereográficos en los que se observan los polos de los valores promedio de las estratificaciones de las sucesiones sedimentarias documentadas en este trabajo, en los Sectores 4 y 5. B, D y E) Representación de los planos promedio de estratificación de las sucesiones sedimentarias en vista 3D (OSXStereonet Versión 2.1).

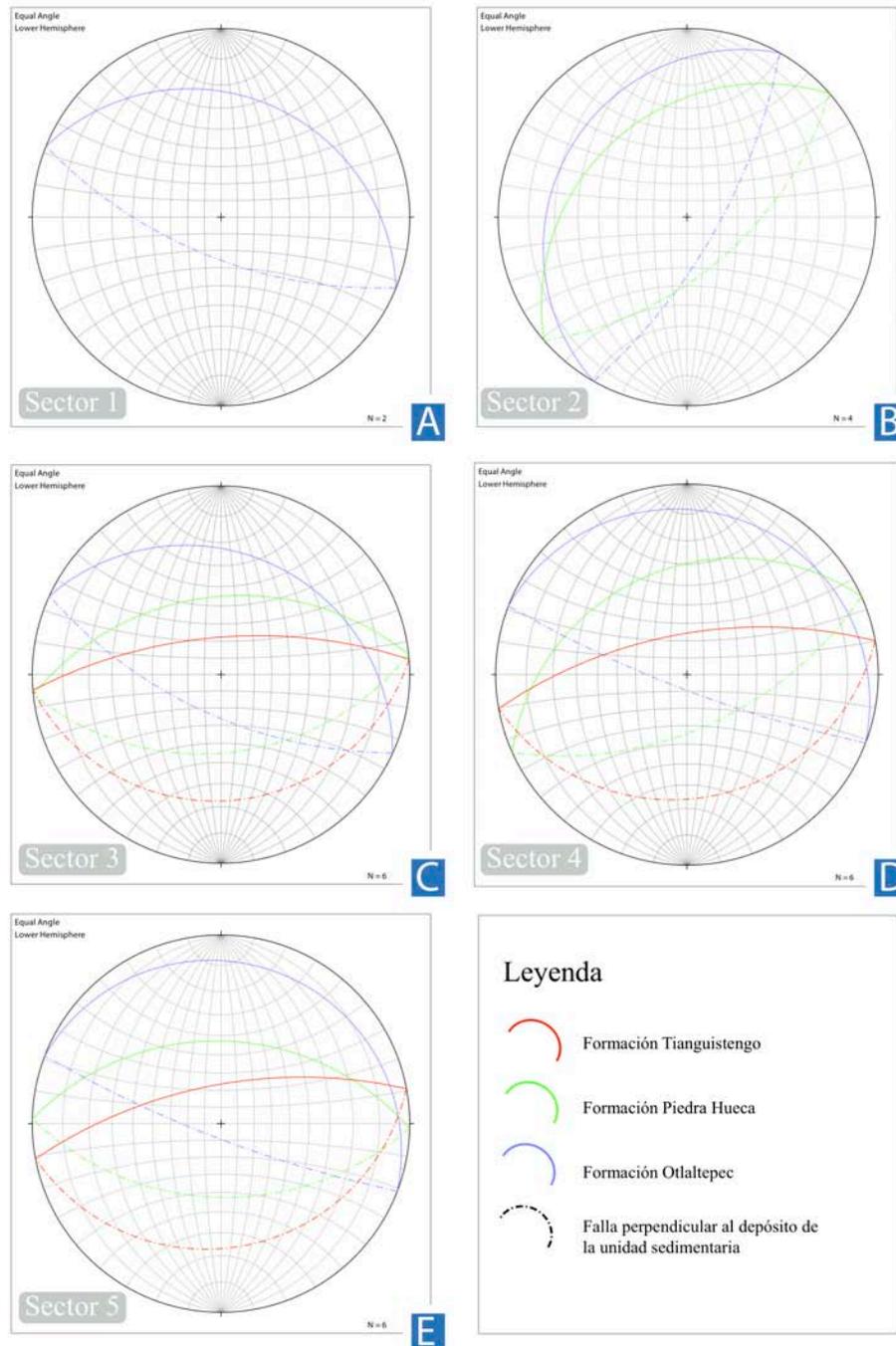


Fig. A.1.3. En línea continua: planos representados por círculos máximos que indican el promedio de las estratificaciones de las formaciones Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec. En línea discontinua: planos de falla asociados a la rotación sinsedimentaria de dichas unidades sedimentarias en el estadio T₃. A) Sector 1; B) Sector 2; C) Sector 3; D) Sector 4 y E) Sector 5 (OSXStereonet Versión 2.1).

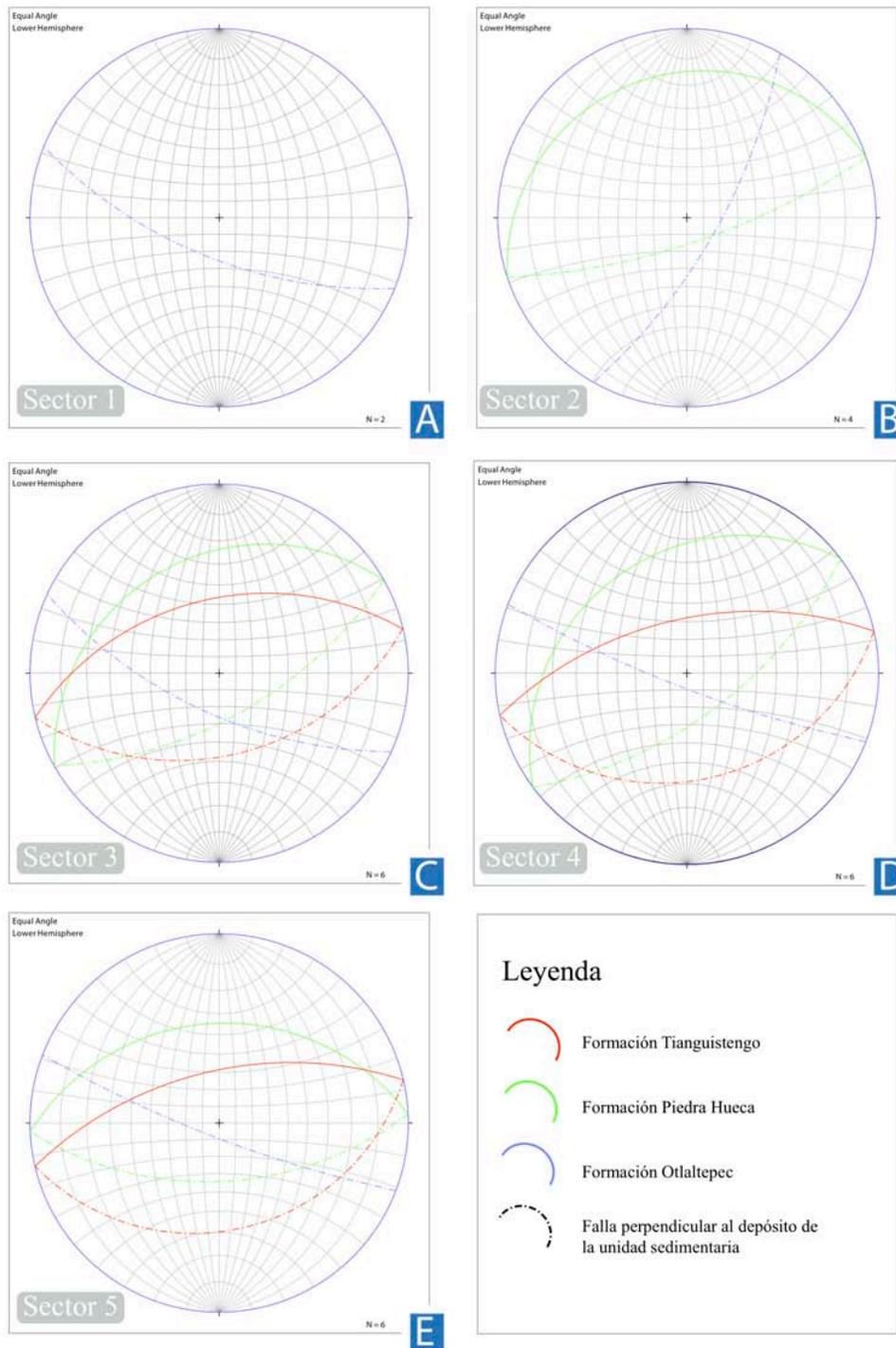


Fig. A.1.4. En línea continua: planos representados por círculos máximos que indican el promedio de las estratificaciones de las unidades sedimentarias Tianguistengo, Piedra Hueca y Otlaltepec. En línea discontinua: planos de falla asociados a la rotación sinsedimentaria de dichas formaciones en el estadio T₂. A) Sector 1; B) Sector 2; C) Sector 3; D) Sector 4 y E) Sector 5 (OSXStereonet Versión 2.1).

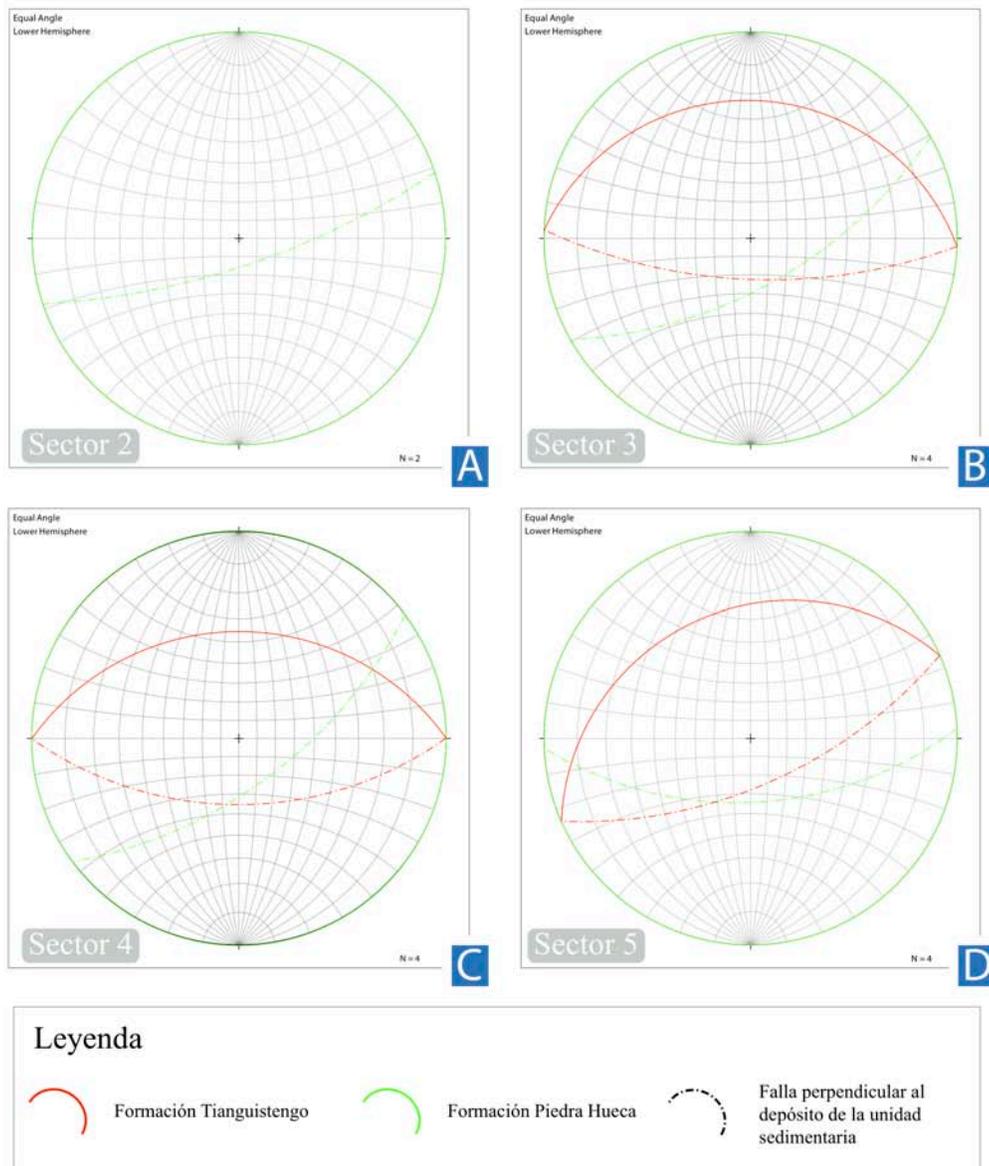


Fig. A.1.5. En línea continua: planos representados por círculos máximos que indican el promedio de las estratificaciones de las unidades sedimentarias Tianguistengo y Piedra Hueca. En línea discontinua: planos de falla asociados a la rotación sinsedimentaria de dichas formaciones en el estadio T₁. A) Sector 2; B) Sector 3; C) Sector 4 y D) Sector 5 (OSXStereonet Versión 2.1).

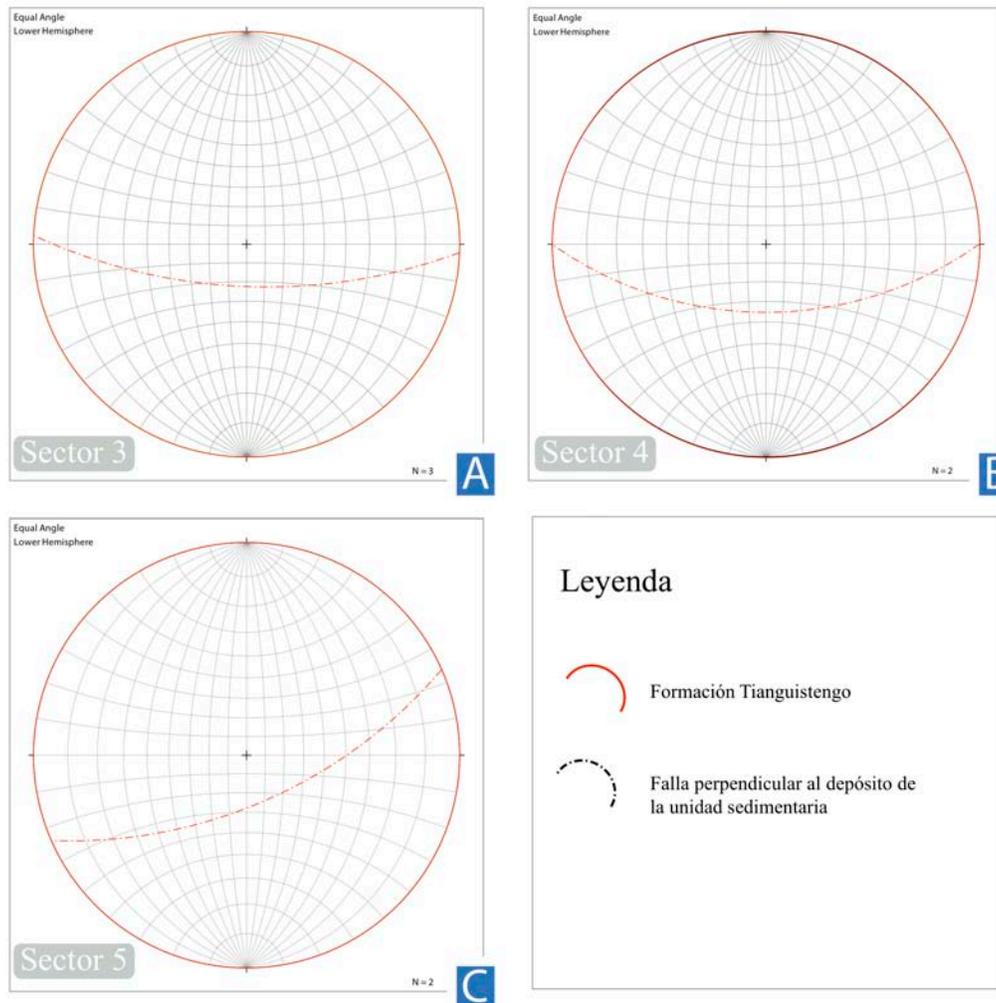


Fig. A.1.6. En línea continua: planos representados por círculos máximos que indican el promedio de las estratificaciones de las formación Tianguistengo. En línea discontinua: planos de falla asociados a la rotación de dicha unidad posterior a su depósito en T_0 A) Sector 3; B) Sector 4 y C) Sector 5 (OSXStereonet Versión 2.1).

I.II. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE FALLAS SINSEDIMENTARIAS EN LA FORMACIÓN TIANGUISTENGO

Tabla AII.I Datos estructurales de las fallas sinsedimentarias, su ubicación y los resultados de su corrección estructural.

| AFLORAMIENTO | LOCALIDAD | COORDENADAS | RUMBO Y ECHADO DE LOS ESTRATOS CONTENEDORES | N° DE FALLA | RUMBO Y ECHADO FALLAS | RUMBO Y ECHADO DE FALLAS ROTADAS A LA HORIZONTAL | ORIENTACIÓN DE ESFUERZOS σ ₃ |
|--|-------------------------|--------------------------------|---|-------------|-----------------------|--|--|
| PLANOS DE ROTACIÓN PARA CORRECCIÓN ESTRUCTURAL (SECTOR 4) | | | | | | | Otlaltepec - 291°/9° |
| | | | | | | | Piedra Hueca - 246°/32° |
| | | | | | | | Tianguiستengo - 260°/66° |
| 1 | Barranca | 14 Q 623789 m E | 250°/40° | 1 | 140°/62° | 128.3°/80.4° | 38° y 218° |
| | Magdalena 2 | 2019855 m N | | 2 | 160°/52° | 134.4°/61.9° | 44° y 224° |
| 2 | Barranca | 14 Q 623789 m E | 250°/40° | 3 | 302°/82° | 315.2°/60.1° | 45° y 225° |
| | Magdalena 2 | 2019855 m N | | | | | |
| 3 | Barranca | 14 Q 623789 m E | 262°/84° | 4 | 320°/88° | 345.9°/58° | 76° y 256° |
| | Magdalena 2 | 2019855 m N | | | | | |
| 4 | Barranca | 14 Q 623789 m E | 264°/58° | 5 | 320°/78° | 343°/55° | 73° y 253° |
| | Magdalena 2 | 2019855 m N | | | | | |
| 5 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623889 m E 2019848 m N | 278°/64° | 6 | 170°/50° | 137.3°/86° | 47° y 227° |
| | | | | 7 | 182°/68° | 158.1°/85.6° | 68° y 248° |
| | | | | 8 | 239°/71° | 183.1°/36.6° | 93° y 273° |
| 6 | Barranca | 14 Q 623913 m E | 262°/52° | 9 | 224°/38° | 129.4°/29.3° | 39° y 219° |
| | Magdalena 2 | 2019857 m N | | | | | |
| 7 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623972 m E 2019878 m N | 264°/38° | 10 | 180°/78° | 169.8°/76.9° | 80° y 260° |
| | | | | 11 | 208°/70° | 187.4°/53.6° | 97° y 277° |
| | | | | 12 | 195°/50° | 158.5°/47.5° | 68° y 248° |
| | | | | 13 | 202°/58° | 171.7°/48.6° | 82° y 262° |
| | | | | 14 | 202°/64° | 177.1°/52.9° | 87° y 267° |
| | | | | 15 | 208°/58° | 176.4°/44.8° | 86° y 266° |
| | | | | 16 | 202°/78° | 187.7°/63.5° | 98° y 278° |
| | | | | 17 | 201°/70° | 181.1°/57.9° | 91° y 271° |
| 18 | 178°/76° | 166.9°/76.6° | 77° y 257° | | | | |

| AFLORAMIENTO | LOCALIDAD | COORDENADAS | RUMBO Y ECHADO DE LOS ESTRATOS CONTENEDORES | Nº DE FALLA | RUMBO Y ECHADO FALLAS | RUMBO Y ECHADO DE FALLAS ROTADAS A LA HORIZONTAL | ORIENTACIÓN DE ESFUERZOS σ ₃ |
|--------------|----------------------|--------------------------------|---|-------------|-----------------------|--|--|
| 8 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 624085 m E 2019982 m N | 250°/45° | 19 | 190°/60° | 157.3°/48.8° | 67° y 247° |
| | | | | 20 | 300°/70° | 333.4°/54.4° | 63° y 243° |
| 9 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 624088 m E 2019995 m N | 240°/54° | 21 | 290°/70° | 327.1°/46.4° | 57° y 237° |
| | | | | 22 | 134°/66° | 305.2°/86.1° | 35° y 215° |
| 10 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 238°/70° | 23 | 266°/75° | 326.3°/27.2° | 56° y 236° |
| | | | | 24 | 135°/88° | 327.7°/54.2° | 58° y 238° |
| 11 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 268°/62° | 25 | 147°/80° | 328.6°/68.5° | 59° y 239° |
| | | | | 26 | 182°/68° | 155.6°/81.2° | 66° y 246° |
| 12 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623889 m E 2019848 m N | 272°/66° | 27 | 346°/90° | 76.3°/84.7° | 166° y 346° |
| | | | | 28 | 3°/87° | 176.6°/81.4° | 87° y 267° |
| 13 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 262°/64° | 29 | 18°/81° | 189.5°/71.3° | 100° y 280° |
| | | | | 30 | 354°/81° | 358°/87.8° | 88° y 268° |
| 14 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 268°/74° | 31 | 350°/89° | 348.9°/87.8° | 78° y 258° |
| | | | | 32 | 357°/83° | 177.5°/88.6° | 89° y 269° |
| 15 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 267°/48° | 33 | 323°/84° | 348.1°/54.8° | 78° y 258° |
| | | | | 34 | 337°/90° | 346°/70° | 76° y 256° |
| 16 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 298°/78° | 35 | 141°/84° | 333.7°/56.9° | 64° y 244° |
| | | | | 36 | 359°/81° | 1°/88.5° | 91° y 271° |
| 17 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 272°/70° | 37 | 357°/80° | 1.4°/86.3 | 91° y 271° |
| | | | | 38 | 2°/81° | 181.9°/88.7° | 91° y 271° |
| 15 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 267°/48° | 39 | 324°/52° | 8.6°/42.9° | 99° y 279° |
| 16 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 298°/78° | 40 | 186°/84° | 0.6°/70° | 91° y 271° |
| 17 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 272°/70° | 41 | 10°/84° | 183.7°/84.5° | 94° y 274° |

| AFLORAMIENTO | LOCALIDAD | COORDENADAS | RUMBO Y ECHADO DE LOS ESTRATOS CONTENEDORES | N° DE FALLA | RUMBO Y ECHADO FALLAS | RUMBO Y ECHADO DE FALLAS ROTADAS A LA HORIZONTAL | ORIENTACIÓN DE ESFUERZOS σ ₃ |
|--|----------------------|--------------------------------|---|-------------|-----------------------|--|--|
| 18 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623818 m E 2019870 m N | 252°/68° | 42 | 190°/62° | 142.2°/55.9° | 52° y 232° |
| | | | | 43 | 202°/62° | 143.7°/45.3° | 54° y 234° |
| | | | | 44 | 174°/50° | 133°/57.2° | 43° y 223° |
| 19 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 250°/52° | 45 | 140°/60° | 125.5°/85.8° | 36° y 216° |
| | | | | 46 | 134°/62° | 303.3°/89.1° | 33° y 213° |
| 20 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 278°/62° | 47 | 175°/50° | 139.7°/81.4° | 50° y 230° |
| 21 | Barranca Magdalena 2 | 14 Q 623789 m E 2019855 m N | 254°/74° | 48 | 294°/72° | 351.8°/38.8° | 82° y 262° |
| 22 | Barranca Cahahuate | 14 Q 622450 m E 2019713 m N | 270°/70° | 49 | 298°/64° | 12.3°/26.4° | 102° y 282° |
| PLANOS DE ROTACIÓN PARA CORRECCIÓN ESTRUCTURAL (SECTOR 3) | | | | | | Otlaltepec - 294.6°/24.4° | |
| | | | | | | Piedra Hueca - 264°/45° | |
| | | | | | | Tiangüstengo - 265.3°/67.6° | |
| 23 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 250°/46° | 50 | 140°/56° | 131.5°/79.4° | 42° y 222° |
| | | | | 51 | 120°/66° | 303.9°/81.9° | 34° y 214° |
| 24 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 250°/52° | 52 | 190°/70° | 171°/54.5° | 81° y 261° |
| 25 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 250°/42° | 53 | 150°/48° | 132.1°/65.8° | 42° y 222° |
| 26 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 278°/48° | 54 | 2°/88° | 5.9°/84.2° | 96° y 276° |
| 27 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 258°/36° | 55 | 308°/82° | 324.4°/60.9° | 54° y 234° |
| 28 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 290°/82° | 56 | 164°/38° | 312.3°/75.6° | 42° y 222° |
| | | | | 57 | 172°/40° | 316.6°/78.9° | 47° y 227° |
| 29 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 262°/40° | 58 | 328°/82° | 343.7°/68.6° | 74° y 254° |
| | | | | 59 | 320°/52° | 3.8°/42.3° | 94° y 274° |
| | | | | 60 | 330°/60° | 2.5°/53.8° | 93° y 273° |
| 30 | Cerro Xiotillo | 14 Q 625740 m E 2021756 m N | 252°/54° | 61 | 160°/78° | 160.1°/84.6° | 70° y 250° |

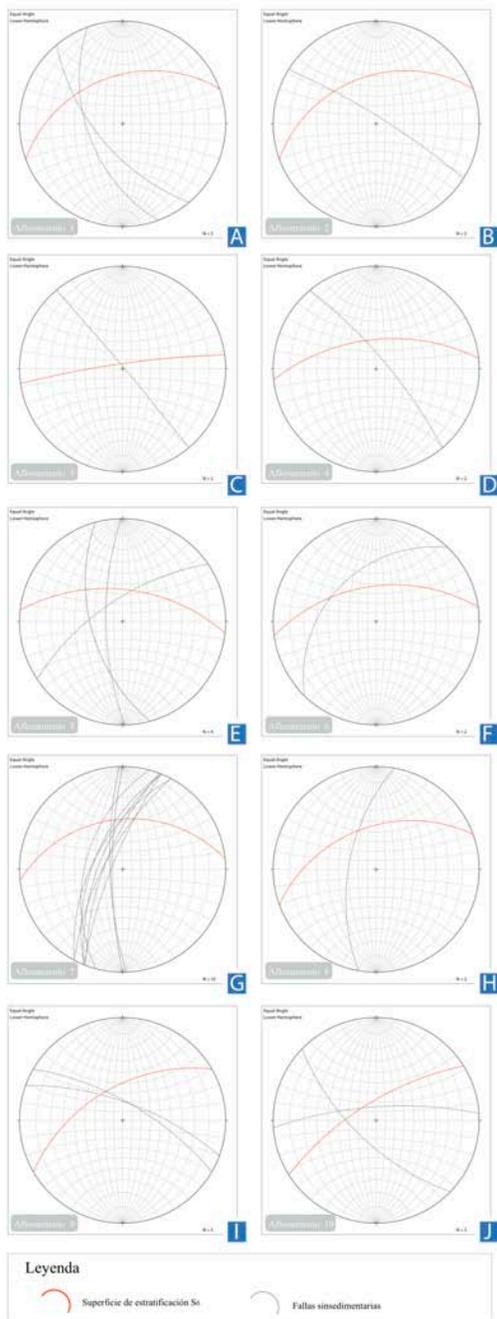


Fig. A.2.1. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 1 a 10 en los que se observan de los datos estructurales de las fallas sinsedimentarias y sus estratos contenedores (S0) en rojo (OSXStereonet Versión 2.1).

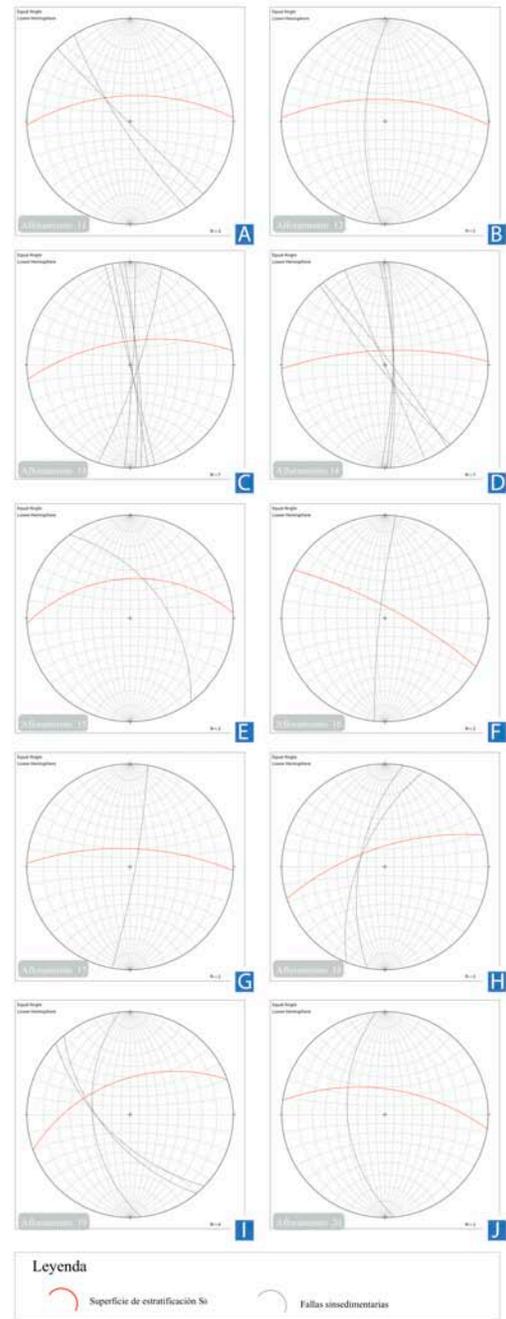


Fig. A.2.2. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 11 a 20 en los que se observan de los datos estructurales de las fallas sinsedimentarias y sus estratos contenedores (S0) en rojo (OSXStereonet Versión 2.1).

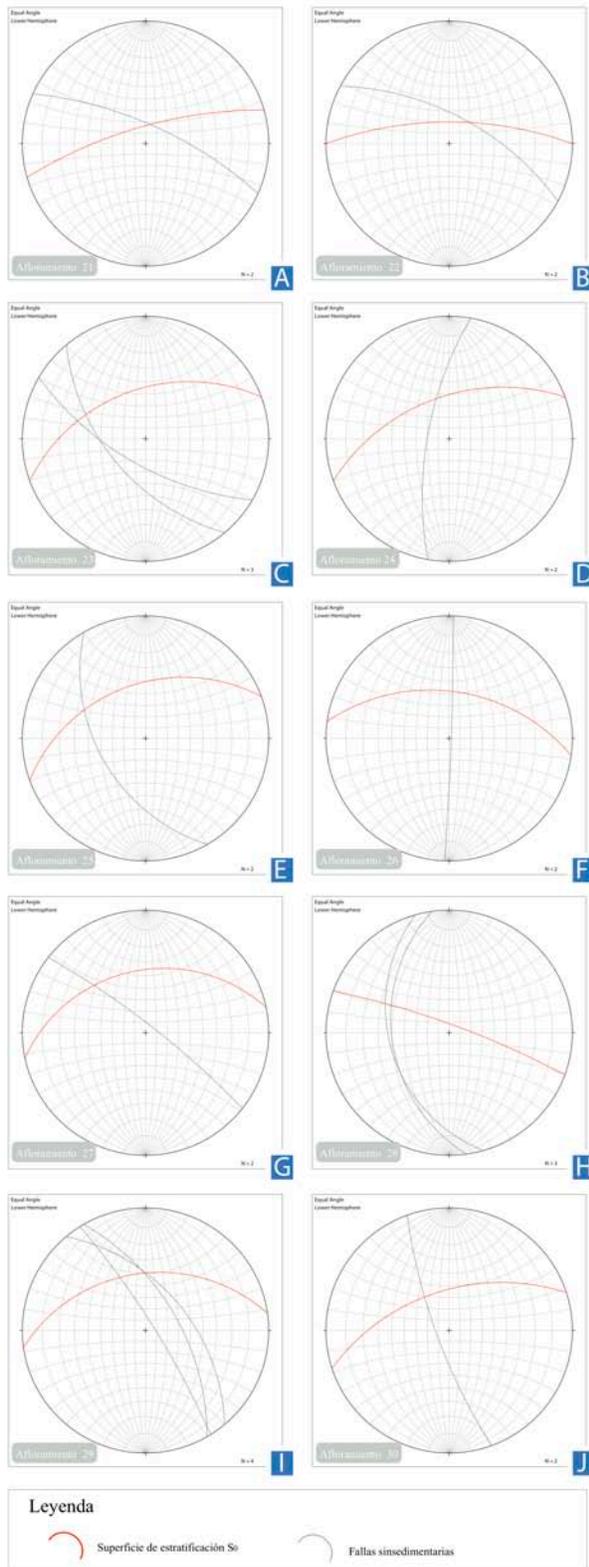


Fig. A.2.3. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 21 a 30 en los que se observan de los datos estructurales de las fallas sinsedimentarias y sus estratos contenedores (S_0) en rojo (OSXStereonet Versión 2.1).

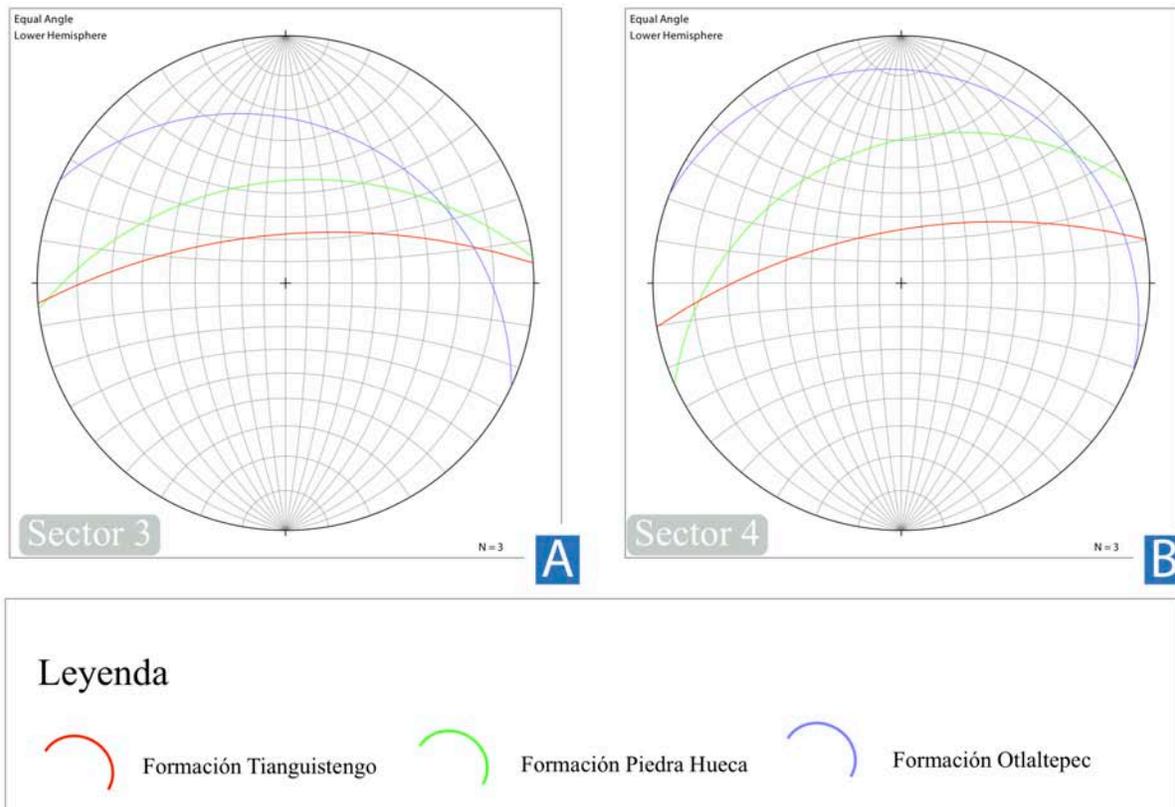


Fig. A.2.4. Diagramas estereográficos que muestran datos estructurales de rumbo y echado considerados para realizar la corrección estructural de las fallas sinsedimentarias. Se optó por representar los valores como círculos máximos en la Red de Wulff y diferenciarlos por colores de acuerdo a la unidad sedimentaria que representan. A) Datos de la localidad Barranca Magdalena 2 y Barranca Cazahuate (Sector 4). B) Datos de la localidad Cerro Xiotillo (Sector 3) (OSXStereonet Versión 2.1).

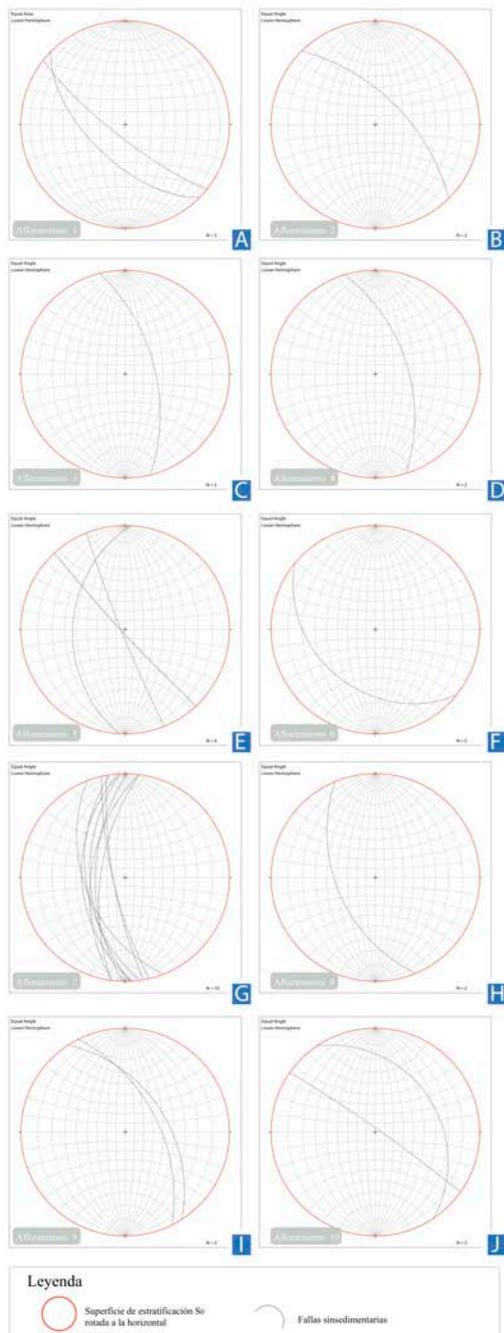


Fig. A.2.5. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 1 a 10 en los que se observan los resultados de rotar a la horizontal a los estratos contenedores (S0) de las fallas sinsedimentarias (OSXStereonet Versión 2.1).

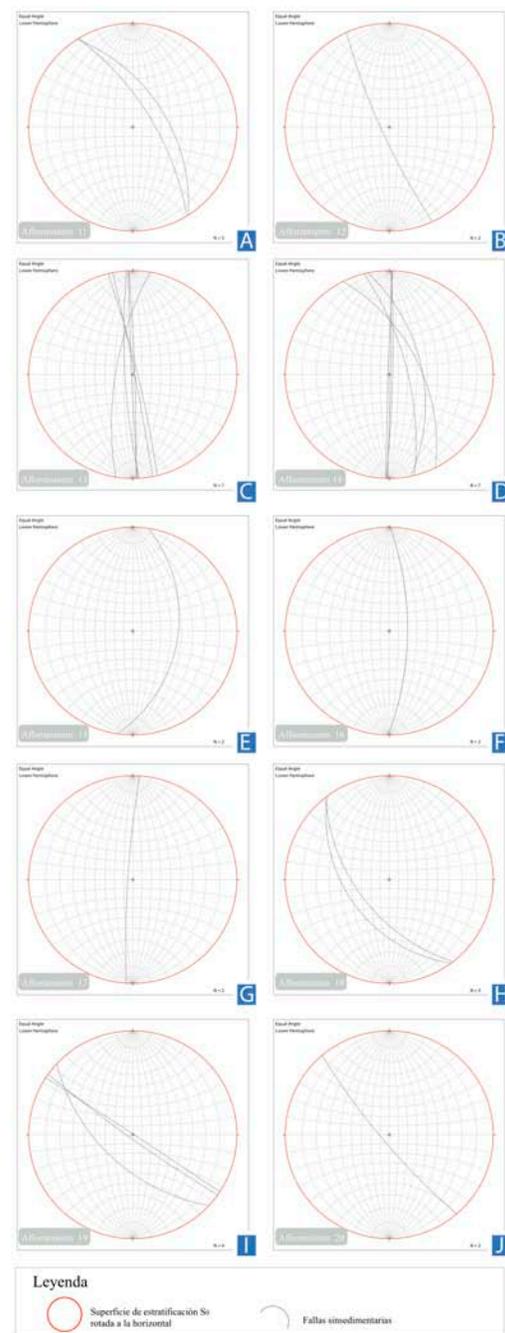


Fig. A.2.6. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 11 a 20 en los que se observan los resultados de rotar a la horizontal a los estratos contenedores (S0) de las fallas sinsedimentarias (OSXStereonet Versión 2.1).

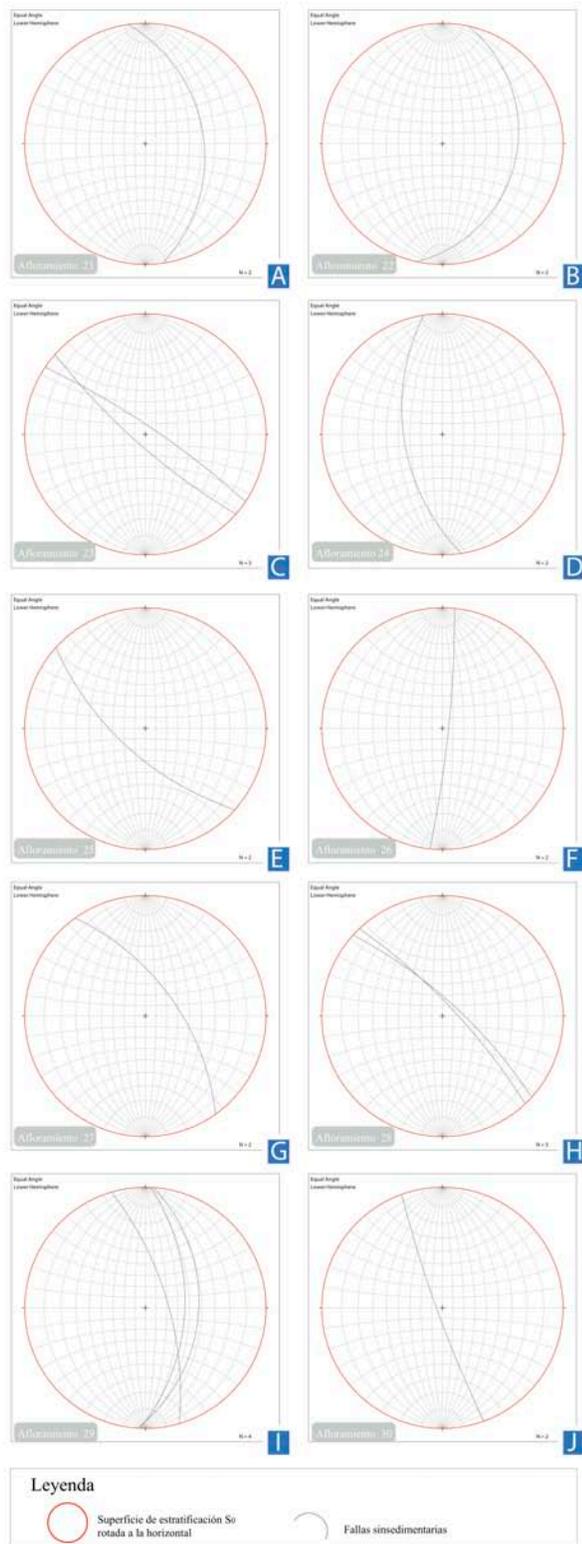


Fig. A.2.7. Diagramas estereográficos de los Afloramientos 21 a 30 en los que se observan los resultados de rotar a la horizontal a los estratos contenedores de las fallas sinsedimentarias. (OSXStereonet Versión 2.1).

APÉNDICE II

ANÁLISIS GEOCRONOLÓGICO DE CIRCONES DETRÍTICOS

Tabla AII.I. Resultados de análisis geocronológico U-Pb de circones detríticos de la formación Tianguistengo. Muestra P.50 colectada en las cercanías de la ranchería la Higuerrilla al pie del Cerro La Alegría. Coordenadas UTM: 14Q0617251 m E, 2018924 m N.

| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | Mejor edad (Ma) | ± | | |
|----------|---------|-----------------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|----------------------------|---|----------------------------|----|----------------------------|-----|-----------------|----|----------------------------|-----|
| | | $\frac{Tl}{U}$ | $\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ | ± (%) | $\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ | ± (%) | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± (%) | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± (%) | Error | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± | $\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ | ± | $\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ | ± | | | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± |
| 1 | 239 | 0.37 | 0.05563 | 0.296 | 0.33194 | 1.881 | 0.04352 | 0.084 | 0.01333 | 0.074 | 0.34 | 275 | 5 | 291 | 14 | 438 | 112 | 268 | 15 | 275 | 5.0 |
| 2 | 691 | 1.05 | 0.05346 | 0.189 | 0.33249 | 1.284 | 0.04523 | 0.07 | 0.01317 | 0.067 | 0.4 | 285 | 4 | 291 | 10 | 348 | 76 | 264 | 13 | 285 | 4.0 |
| 3 | 169 | 0.40 | 0.05198 | 0.245 | 0.32246 | 1.635 | 0.04519 | 0.084 | 0.01527 | 0.086 | 0.37 | 285 | 5 | 284 | 13 | 285 | 102 | 306 | 17 | 285 | 5.0 |
| 4 | 66 | 0.62 | 0.07042 | 0.438 | 0.43301 | 2.845 | 0.04509 | 0.095 | 0.01481 | 0.091 | 0.32 | 284 | 6 | 365 | 20 | 941 | 121 | 297 | 18 | 284 | 6.0 |
| 5 | 525 | 0.10 | 0.05088 | 0.184 | 0.2986 | 1.172 | 0.04262 | 0.066 | 0.01413 | 0.086 | 0.39 | 269 | 4 | 265 | 9 | 235 | 78 | 284 | 17 | 269 | 4.0 |
| 6 | 275 | 0.35 | 0.05192 | 0.203 | 0.31427 | 1.32 | 0.04412 | 0.068 | 0.01356 | 0.074 | 0.37 | 278 | 4 | 277 | 10 | 282 | 85 | 272 | 15 | 278 | 4.0 |
| 7 | 240 | 0.57 | 0.05671 | 0.239 | 0.34995 | 1.582 | 0.04485 | 0.073 | 0.01424 | 0.074 | 0.36 | 283 | 5 | 305 | 12 | 480 | 88 | 286 | 15 | 283 | 5.0 |
| 8 | 304 | 0.47 | 0.05217 | 0.216 | 0.32074 | 1.41 | 0.04474 | 0.066 | 0.01404 | 0.075 | 0.34 | 282 | 4 | 282 | 11 | 293 | 93 | 282 | 15 | 282 | 4.0 |
| 9 | 169 | 0.42 | 0.05077 | 0.206 | 0.28886 | 1.263 | 0.04137 | 0.067 | 0.01188 | 0.065 | 0.37 | 261 | 4 | 258 | 10 | 230 | 92 | 239 | 13 | 261 | 4.0 |
| 11 | 79 | 0.60 | 0.05277 | 0.348 | 0.32071 | 2.211 | 0.04388 | 0.089 | 0.01365 | 0.086 | 0.29 | 277 | 5 | 282 | 17 | 319 | 146 | 274 | 17 | 277 | 5.0 |
| 12 | 92 | 0.59 | 0.05254 | 0.332 | 0.31999 | 2.106 | 0.04439 | 0.082 | 0.01393 | 0.084 | 0.28 | 280 | 5 | 282 | 16 | 309 | 140 | 280 | 17 | 280 | 5.0 |
| 13 | 265 | 0.66 | 0.05234 | 0.213 | 0.31121 | 1.361 | 0.04314 | 0.07 | 0.01273 | 0.067 | 0.37 | 272 | 4 | 275 | 11 | 300 | 91 | 256 | 13 | 272 | 4.0 |
| 14 | 502 | 0.43 | 0.05275 | 0.194 | 0.31561 | 1.252 | 0.04347 | 0.064 | 0.01324 | 0.07 | 0.37 | 274 | 4 | 279 | 10 | 318 | 82 | 266 | 14 | 274 | 4.0 |
| 15 | 395 | 0.51 | 0.05531 | 0.242 | 0.34382 | 1.591 | 0.04519 | 0.067 | 0.01406 | 0.076 | 0.33 | 285 | 4 | 300 | 12 | 425 | 96 | 282 | 15 | 285 | 4.0 |
| 16 | 130 | 0.54 | 0.05769 | 0.338 | 0.35712 | 2.187 | 0.04545 | 0.081 | 0.01426 | 0.078 | 0.29 | 287 | 5 | 310 | 16 | 518 | 127 | 286 | 16 | 287 | 5.0 |
| 17 | 196 | 0.49 | 0.05158 | 0.23 | 0.30536 | 1.443 | 0.04312 | 0.067 | 0.0129 | 0.069 | 0.33 | 272 | 4 | 271 | 11 | 267 | 100 | 259 | 14 | 272 | 4.0 |
| 18 | 97 | 0.47 | 0.05282 | 0.258 | 0.32745 | 1.703 | 0.04509 | 0.08 | 0.01366 | 0.079 | 0.34 | 284 | 5 | 288 | 13 | 321 | 109 | 274 | 16 | 284 | 5.0 |
| 19 | 112 | 0.43 | 0.05949 | 0.266 | 0.36891 | 1.773 | 0.04533 | 0.08 | 0.01434 | 0.08 | 0.37 | 286 | 5 | 319 | 13 | 585 | 95 | 288 | 16 | 286 | 5.0 |
| 20 | 124 | 0.33 | 0.05597 | 0.348 | 0.3478 | 2.251 | 0.04554 | 0.081 | 0.01475 | 0.083 | 0.28 | 287 | 5 | 303 | 17 | 451 | 136 | 296 | 17 | 287 | 5.0 |
| 21 | 171 | 0.46 | 0.04804 | 0.235 | 0.29062 | 1.497 | 0.0443 | 0.072 | 0.01387 | 0.077 | 0.31 | 279 | 4 | 259 | 12 | 101 | 106 | 278 | 15 | 279 | 4.0 |
| 22 | 460 | 0.22 | 0.05325 | 0.221 | 0.3157 | 1.386 | 0.04329 | 0.063 | 0.01253 | 0.07 | 0.33 | 273 | 4 | 279 | 11 | 339 | 92 | 252 | 14 | 273 | 4.0 |
| 23 | 377 | 0.26 | 0.05277 | 0.219 | 0.31433 | 1.38 | 0.04341 | 0.063 | 0.01279 | 0.07 | 0.33 | 274 | 4 | 278 | 11 | 319 | 93 | 257 | 14 | 274 | 4.0 |
| 24 | 286 | 0.44 | 0.06225 | 0.248 | 0.39985 | 1.709 | 0.04689 | 0.073 | 0.01801 | 0.097 | 0.36 | 295 | 4 | 342 | 12 | 683 | 83 | 361 | 19 | 295 | 4.0 |
| 25 | 389 | 0.44 | 0.05872 | 0.234 | 0.31518 | 1.332 | 0.03921 | 0.055 | 0.01313 | 0.07 | 0.33 | 248 | 3 | 278 | 10 | 557 | 88 | 264 | 14 | 248 | 3.0 |
| 26 | 401 | 0.43 | 0.05175 | 0.187 | 0.3034 | 1.179 | 0.0426 | 0.062 | 0.01294 | 0.068 | 0.37 | 269 | 4 | 269 | 9 | 274 | 84 | 260 | 14 | 269 | 4.0 |
| 27 | 303 | 0.26 | 0.05127 | 0.216 | 0.29976 | 1.341 | 0.04232 | 0.063 | 0.01419 | 0.078 | 0.34 | 267 | 4 | 266 | 10 | 253 | 97 | 285 | 16 | 267 | 4.0 |
| 28 | 797 | 0.11 | 0.0525 | 0.165 | 0.32804 | 1.127 | 0.04523 | 0.063 | 0.01436 | 0.078 | 0.4 | 285 | 4 | 288 | 9 | 307 | 72 | 288 | 16 | 285 | 4.0 |
| 29 | 135 | 0.54 | 0.05131 | 0.221 | 0.32592 | 1.483 | 0.04629 | 0.068 | 0.01425 | 0.078 | 0.32 | 292 | 4 | 286 | 11 | 255 | 99 | 286 | 16 | 292 | 4.0 |
| 30 | 690 | 0.23 | 0.05264 | 0.182 | 0.32088 | 1.2 | 0.04427 | 0.062 | 0.01358 | 0.072 | 0.38 | 279 | 4 | 283 | 9 | 313 | 79 | 273 | 14 | 279 | 4.0 |
| 31 | 788 | 0.12 | 0.05369 | 0.182 | 0.32606 | 1.198 | 0.0441 | 0.061 | 0.01392 | 0.076 | 0.39 | 278 | 4 | 287 | 9 | 358 | 77 | 279 | 15 | 278 | 4.0 |
| 32 | 113 | 0.65 | 0.05688 | 0.24 | 0.36556 | 1.724 | 0.04681 | 0.098 | 0.01465 | 0.079 | 0.45 | 295 | 6 | 316 | 13 | 487 | 94 | 294 | 16 | 295 | 6.0 |
| 33 | 218 | 0.60 | 0.04701 | 0.226 | 0.28583 | 1.456 | 0.04406 | 0.075 | 0.01288 | 0.069 | 0.33 | 278 | 5 | 255 | 11 | 50 | 104 | 259 | 14 | 278 | 5.0 |
| 34 | 203 | 0.51 | 0.05328 | 0.238 | 0.32258 | 1.525 | 0.04389 | 0.068 | 0.0137 | 0.074 | 0.33 | 277 | 4 | 284 | 12 | 341 | 102 | 275 | 15 | 277 | 4.0 |
| 35 | 409 | 0.73 | 0.05279 | 0.194 | 0.31371 | 1.242 | 0.0432 | 0.063 | 0.01297 | 0.067 | 0.37 | 273 | 4 | 277 | 10 | 320 | 84 | 260 | 13 | 273 | 4.0 |
| 36 | 211 | 0.50 | 0.05113 | 0.25 | 0.32073 | 1.668 | 0.04574 | 0.081 | 0.01407 | 0.084 | 0.34 | 288 | 5 | 282 | 13 | 247 | 113 | 282 | 17 | 288 | 5.0 |

| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | | | Mejor edad | | | |
|----------|---------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------|------|-----|------------|----|------------|------|
| | | $\frac{Tl}{U}$ | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ | $\frac{^{235}Th}{^{235}U}$ (%) | $\frac{^{235}Th}{^{235}U}$ (%) | $\frac{^{236}Th}{^{235}U}$ (%) | $\frac{^{236}Th}{^{235}U}$ (%) | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ (%) | Error | $\frac{^{236}Th}{^{235}U}$ | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ | $\frac{^{237}Th}{^{235}U}$ | (Ma) | (Ma) | | | | | |
| 37 | 64 | 0.25 | 0.05687 | 0.328 | 0.37688 | 2.284 | 0.04815 | 0.089 | 0.01591 | 0.117 | 0.31 | 303 | 5 | 325 | 17 | 487 | 129 | 319 | 23 | 303 | 5.0 |
| 38 | 250 | 0.61 | 0.0536 | 0.226 | 0.33736 | 1.509 | 0.04575 | 0.068 | 0.01476 | 0.076 | 0.33 | 288 | 4 | 295 | 11 | 354 | 96 | 296 | 15 | 288 | 4.0 |
| 39 | 399 | 0.62 | 0.05229 | 0.208 | 0.30981 | 1.316 | 0.04304 | 0.064 | 0.01341 | 0.07 | 0.35 | 272 | 4 | 274 | 10 | 298 | 92 | 269 | 14 | 272 | 4.0 |
| 40 | 306 | 0.44 | 0.05325 | 0.208 | 0.33299 | 1.391 | 0.04541 | 0.067 | 0.01447 | 0.078 | 0.35 | 286 | 4 | 292 | 11 | 339 | 89 | 290 | 16 | 286 | 4.0 |
| 41 | 299 | 0.52 | 0.06255 | 0.274 | 0.3767 | 1.743 | 0.04371 | 0.065 | 0.01454 | 0.078 | 0.32 | 276 | 4 | 325 | 13 | 693 | 94 | 292 | 16 | 276 | 4.0 |
| 42 | 110 | 0.38 | 0.05473 | 0.326 | 0.32374 | 2.01 | 0.0433 | 0.077 | 0.01228 | 0.074 | 0.28 | 273 | 5 | 285 | 15 | 401 | 129 | 247 | 15 | 273 | 5.0 |
| 43 | 236 | 0.50 | 0.05592 | 0.241 | 0.34032 | 1.556 | 0.04431 | 0.069 | 0.01454 | 0.078 | 0.33 | 279 | 4 | 297 | 12 | 449 | 92 | 292 | 16 | 279 | 4.0 |
| 44 | 221 | 0.41 | 0.05421 | 0.216 | 0.33317 | 1.433 | 0.0446 | 0.072 | 0.01411 | 0.077 | 0.38 | 281 | 4 | 292 | 11 | 380 | 86 | 283 | 15 | 281 | 4.0 |
| 45 | 661 | 0.11 | 0.05071 | 0.176 | 0.30807 | 1.157 | 0.0441 | 0.064 | 0.01367 | 0.073 | 0.38 | 278 | 4 | 273 | 9 | 228 | 76 | 274 | 15 | 278 | 4.0 |
| 46 | 313 | 0.82 | 0.06729 | 0.216 | 1.1595 | 4.39 | 0.12305 | 0.248 | 0.03093 | 0.16 | 0.53 | 748 | 14 | 782 | 21 | 847 | 64 | 616 | 31 | 748 | 14.0 |
| 47 | 109 | 0.55 | 0.04863 | 0.255 | 0.29564 | 1.627 | 0.0444 | 0.075 | 0.01389 | 0.076 | 0.3 | 280 | 5 | 263 | 13 | 130 | 112 | 279 | 15 | 280 | 5.0 |
| 48 | 146 | 0.48 | 0.05276 | 0.227 | 0.35874 | 1.659 | 0.04971 | 0.084 | 0.01571 | 0.085 | 0.37 | 313 | 5 | 311 | 12 | 318 | 94 | 315 | 17 | 313 | 5.0 |
| 49 | 775 | 0.11 | 0.06953 | 0.206 | 1.4352 | 4.686 | 0.14963 | 0.203 | 0.04626 | 0.235 | 0.42 | 899 | 11 | 904 | 20 | 915 | 58 | 914 | 45 | 899 | 11.0 |
| 50 | 493 | 0.39 | 0.05244 | 0.189 | 0.31297 | 1.219 | 0.04336 | 0.064 | 0.01365 | 0.071 | 0.38 | 274 | 4 | 276 | 9 | 305 | 79 | 274 | 14 | 274 | 4.0 |
| 51 | 148 | 0.51 | 0.05454 | 0.434 | 0.34894 | 3.08 | 0.0464 | 0.09 | 0.01449 | 0.028 | 0.33 | 292 | 6 | 304 | 23 | 393 | 172 | 291 | 6 | 292 | 6.0 |
| 52 | 108 | 0.34 | 0.05244 | 0.226 | 0.34158 | 1.58 | 0.04733 | 0.08 | 0.01506 | 0.089 | 0.36 | 298 | 5 | 298 | 12 | 305 | 94 | 302 | 18 | 298 | 5.0 |
| 53 | 402 | 0.82 | 0.05447 | 0.197 | 0.38307 | 1.504 | 0.05101 | 0.079 | 0.0161 | 0.083 | 0.39 | 321 | 5 | 329 | 11 | 391 | 78 | 323 | 17 | 321 | 5.0 |
| 54 | 320 | 0.59 | 0.05346 | 0.201 | 0.36639 | 1.498 | 0.04982 | 0.081 | 0.01543 | 0.081 | 0.39 | 313 | 5 | 317 | 11 | 348 | 81 | 309 | 16 | 313 | 5.0 |
| 55 | 204 | 1.04 | 0.07052 | 0.357 | 0.41995 | 2.331 | 0.04399 | 0.1 | 0.01246 | 0.071 | 0.41 | 278 | 6 | 356 | 17 | 944 | 100 | 250 | 14 | 278 | 6.0 |
| 56 | 259 | 0.68 | 0.05273 | 0.21 | 0.3205 | 1.37 | 0.04414 | 0.068 | 0.0135 | 0.069 | 0.36 | 278 | 4 | 282 | 11 | 317 | 87 | 271 | 14 | 278 | 4.0 |
| 57 | 166 | 0.41 | 0.0515 | 0.213 | 0.39048 | 1.785 | 0.05412 | 0.105 | 0.01594 | 0.088 | 0.43 | 340 | 6 | 335 | 13 | 263 | 93 | 320 | 18 | 340 | 6.0 |
| 58 | 366 | 1.14 | 0.05052 | 0.205 | 0.32226 | 1.393 | 0.04639 | 0.069 | 0.01396 | 0.072 | 0.34 | 292 | 4 | 284 | 11 | 219 | 92 | 280 | 14 | 292 | 4.0 |
| 59 | 225 | 0.66 | 0.05495 | 0.219 | 0.33927 | 1.442 | 0.04485 | 0.066 | 0.01447 | 0.079 | 0.35 | 283 | 4 | 297 | 11 | 410 | 88 | 290 | 16 | 283 | 4.0 |
| 60 | 113 | 0.81 | 0.05129 | 0.264 | 0.32867 | 1.767 | 0.04664 | 0.072 | 0.01269 | 0.066 | 0.29 | 294 | 4 | 289 | 14 | 254 | 116 | 255 | 13 | 294 | 4.0 |
| 61 | 543 | 0.38 | 0.0597 | 0.184 | 0.7783 | 2.658 | 0.09453 | 0.139 | 0.02858 | 0.147 | 0.43 | 582 | 8 | 585 | 15 | 593 | 65 | 570 | 29 | 582 | 8.0 |
| 62 | 237 | 0.61 | 0.05173 | 0.19 | 0.31117 | 1.234 | 0.04384 | 0.065 | 0.01268 | 0.066 | 0.38 | 277 | 4 | 275 | 10 | 273 | 83 | 255 | 13 | 277 | 4.0 |
| 63 | 375 | 0.70 | 0.05079 | 0.187 | 0.30403 | 1.195 | 0.04334 | 0.06 | 0.01286 | 0.065 | 0.35 | 274 | 4 | 270 | 9 | 231 | 84 | 258 | 13 | 274 | 4.0 |
| 64 | 126 | 0.70 | 0.0518 | 0.24 | 0.33077 | 1.624 | 0.04677 | 0.076 | 0.01422 | 0.077 | 0.33 | 295 | 5 | 290 | 12 | 277 | 105 | 285 | 15 | 295 | 5.0 |
| 65 | 108 | 0.57 | 0.05536 | 0.314 | 0.33074 | 1.968 | 0.04372 | 0.078 | 0.01402 | 0.077 | 0.3 | 276 | 5 | 290 | 15 | 427 | 125 | 281 | 15 | 276 | 5.0 |
| 66 | 578 | 0.45 | 0.05132 | 0.178 | 0.30705 | 1.15 | 0.04349 | 0.062 | 0.01354 | 0.068 | 0.38 | 274 | 4 | 272 | 9 | 255 | 78 | 272 | 14 | 274 | 4.0 |
| 67 | 89 | 0.73 | 0.05147 | 0.32 | 0.30165 | 1.974 | 0.04301 | 0.087 | 0.01297 | 0.072 | 0.31 | 271 | 5 | 268 | 15 | 262 | 138 | 260 | 14 | 271 | 5.0 |
| 68 | 151 | 0.70 | 0.05597 | 0.223 | 0.33759 | 1.452 | 0.04409 | 0.071 | 0.01305 | 0.069 | 0.38 | 278 | 4 | 295 | 11 | 451 | 87 | 262 | 14 | 278 | 4.0 |
| 69 | 139 | 0.65 | 0.05418 | 0.247 | 0.34788 | 1.689 | 0.0467 | 0.079 | 0.01421 | 0.077 | 0.34 | 294 | 5 | 303 | 13 | 379 | 101 | 285 | 15 | 294 | 5.0 |
| 70 | 103 | 0.56 | 0.05535 | 0.275 | 0.34157 | 1.804 | 0.04465 | 0.079 | 0.01285 | 0.072 | 0.34 | 282 | 5 | 298 | 14 | 426 | 109 | 258 | 14 | 282 | 5.0 |
| 71 | 541 | 0.60 | 0.05321 | 0.188 | 0.34009 | 1.295 | 0.04638 | 0.066 | 0.01477 | 0.075 | 0.37 | 292 | 4 | 297 | 10 | 338 | 79 | 296 | 15 | 292 | 4.0 |
| 72 | 114 | 0.72 | 0.06013 | 0.347 | 0.37408 | 2.267 | 0.04521 | 0.084 | 0.01475 | 0.083 | 0.31 | 285 | 5 | 323 | 17 | 608 | 124 | 296 | 17 | 285 | 5.0 |
| 73 | 246 | 1.17 | 0.05193 | 0.199 | 0.32601 | 1.338 | 0.04553 | 0.067 | 0.01402 | 0.071 | 0.36 | 287 | 4 | 287 | 10 | 282 | 86 | 281 | 14 | 287 | 4.0 |
| 74 | 98 | 0.49 | 0.06071 | 0.276 | 0.36459 | 1.78 | 0.04361 | 0.077 | 0.01399 | 0.081 | 0.36 | 275 | 5 | 316 | 13 | 629 | 98 | 281 | 16 | 275 | 5.0 |
| 75 | 184 | 0.66 | 0.05541 | 0.208 | 0.35149 | 1.428 | 0.04615 | 0.071 | 0.00993 | 0.065 | 0.38 | 291 | 4 | 306 | 11 | 429 | 84 | 200 | 13 | 291 | 4.0 |
| 76 | 201 | 0.54 | 0.05523 | 0.238 | 0.33449 | 1.529 | 0.0441 | 0.068 | 0.01406 | 0.075 | 0.33 | 278 | 4 | 293 | 12 | 422 | 96 | 282 | 15 | 278 | 4.0 |
| 77 | 106 | 0.63 | 0.05437 | 0.275 | 0.32486 | 1.734 | 0.04334 | 0.073 | 0.01263 | 0.071 | 0.32 | 274 | 5 | 286 | 13 | 386 | 114 | 254 | 14 | 274 | 5.0 |
| 78 | 408 | 0.06 | 0.058 | 0.193 | 0.75897 | 2.748 | 0.09508 | 0.135 | 0.02985 | 0.169 | 0.39 | 586 | 8 | 573 | 16 | 530 | 73 | 595 | 33 | 586 | 8.0 |
| 79 | 173 | 0.67 | 0.05941 | 0.256 | 0.3752 | 1.735 | 0.04574 | 0.078 | 0.01465 | 0.081 | 0.36 | 288 | 5 | 324 | 13 | 582 | 94 | 294 | 16 | 288 | 5.0 |
| 80 | 113 | 0.64 | 0.05283 | 0.305 | 0.33949 | 2.058 | 0.04726 | 0.088 | 0.01451 | 0.077 | 0.3 | 298 | 5 | 297 | 16 | 322 | 131 | 291 | 15 | 298 | 5.0 |
| 81 | 128 | 1.03 | 0.05222 | 0.26 | 0.33223 | 1.724 | 0.0464 | 0.069 | 0.01425 | 0.075 | 0.28 | 292 | 4 | 291 | 13 | 295 | 113 | 286 | 15 | 292 | 4.0 |
| 82 | 199 | 0.36 | 0.05023 | 0.229 | 0.32758 | 1.582 | 0.04723 | 0.077 | 0.0141 | 0.079 | 0.33 | 297 | 5 | 288 | 12 | 206 | 104 | 283 | 16 | 297 | 5.0 |
| 83 | 185 | 0.43 | 0.05602 | 0.26 | 0.34715 | 1.704 | 0.04429 | 0.072 | 0.01551 | 0.085 | 0.33 | 279 | 4 | 303 | 13 | 453 | 103 | 311 | 17 | 279 | 4.0 |
| 84 | 152 | 0.60 | 0.04871 | 0.226 | 0.31973 | 1.562 | 0.04754 | 0.074 | 0.01521 | 0.08 | 0.31 | 299 | 5 | 282 | 12 | 134 | 104 | 305 | 16 | 299 | 5.0 |
| 85 | 273 | 0.80 | 0.05362 | 0.271 | 0.31478 | 1.66 | 0.04271 | 0.063 | 0.01328 | 0.068 | 0.29 | 270 | 4 | 278 | 13 | 355 | 115 | 267 | 14 | 270 | 4.0 |

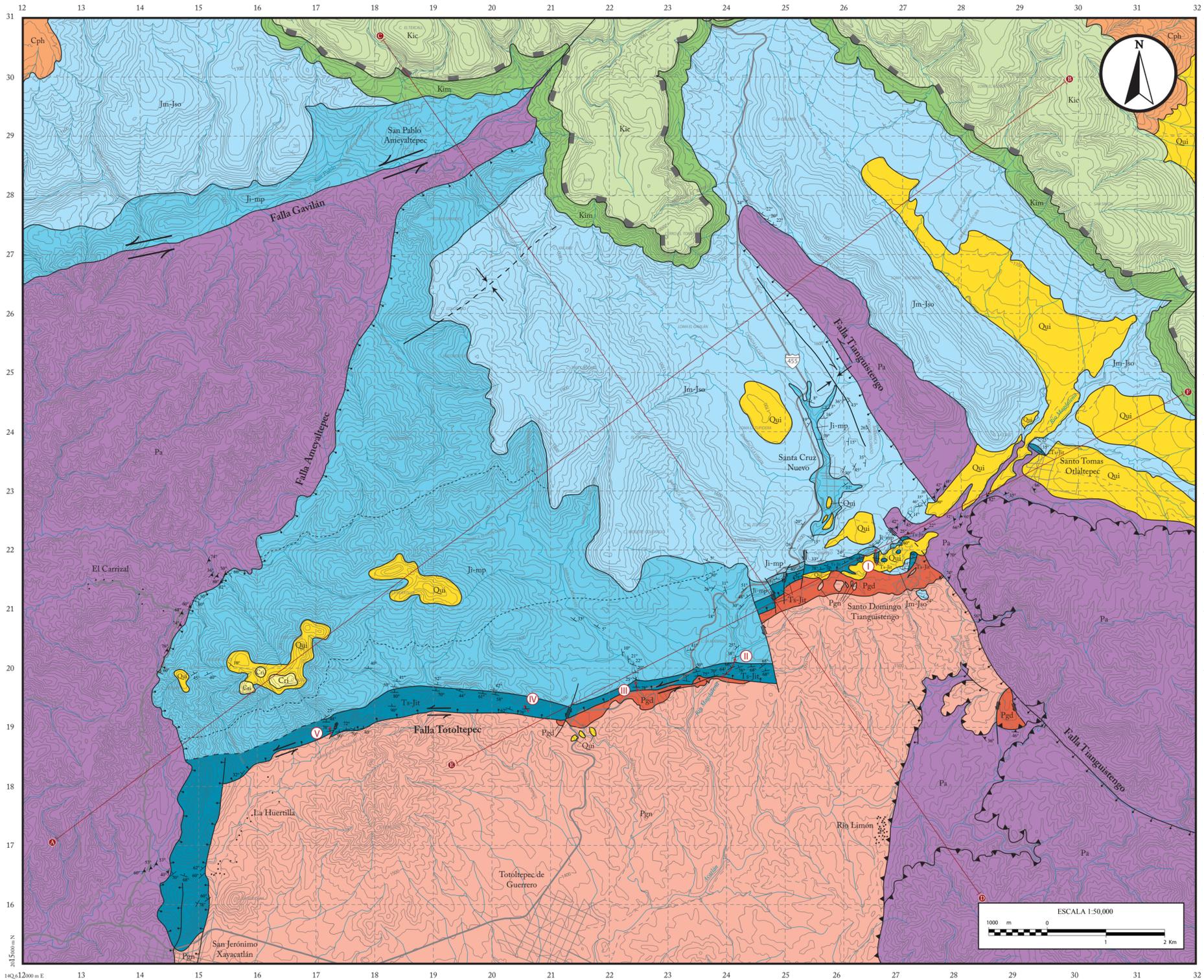
| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | Mejor edad | | | |
|----------|------------|-----------------------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------------|------|
| | | $\frac{Ta}{U}$ | $\frac{^{177}Zr}{^{138}Zr}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{176}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{231}Pb}{^{232}Th}$ | \pm | Error | $\frac{^{234}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}Zr}$ | \pm | $\frac{^{231}Pb}{^{232}Th}$ | \pm | (Ma) | (Ma) |
| 86 | 88 | 0.61 | 0.05925 | 0.347 | 0.36117 | 2.204 | 0.04469 | 0.076 | 0.01509 | 0.086 | 0.28 | 282 | 5 | 313 | 16 | 576 | 128 | 303 | 17 | 282 | 5.0 |
| 87 | 340 | 0.35 | 0.07367 | 0.231 | 1.6962 | 5.825 | 0.16706 | 0.232 | 0.04987 | 0.254 | 0.41 | 996 | 13 | 1007 | 22 | 1032 | 63 | 984 | 49 | 1032 | 63.0 |
| 88 | 494 | 0.22 | 0.07692 | 0.237 | 1.8923 | 6.526 | 0.1786 | 0.276 | 0.05339 | 0.274 | 0.45 | 1059 | 15 | 1078 | 23 | 1119 | 61 | 1051 | 53 | 1119 | 61.0 |
| 89 | 125 | 0.16 | 0.07126 | 0.262 | 1.6869 | 6.675 | 0.17218 | 0.25 | 0.05008 | 0.275 | 0.37 | 1024 | 14 | 1004 | 25 | 965 | 75 | 988 | 53 | 1024 | 14.0 |
| 90 | 191 | 0.70 | 0.05471 | 0.21 | 0.58702 | 2.425 | 0.07777 | 0.12 | 0.02337 | 0.121 | 0.37 | 483 | 7 | 469 | 16 | 400 | 85 | 467 | 24 | 483 | 7.0 |
| 91 | 441 | 0.51 | 0.07083 | 0.231 | 0.83301 | 3.645 | 0.08626 | 0.251 | 0.0141 | 0.081 | 0.67 | 533 | 15 | 615 | 20 | 953 | 65 | 283 | 16 | 533 | 15.0 |
| 92 | 427 | 0.32 | 0.07401 | 0.224 | 1.8017 | 5.973 | 0.17655 | 0.24 | 0.05266 | 0.268 | 0.41 | 1048 | 13 | 1046 | 22 | 1042 | 60 | 1037 | 51 | 1042 | 60.0 |
| 93 | 323 | 0.16 | 0.07289 | 0.229 | 1.6231 | 5.574 | 0.16153 | 0.224 | 0.05166 | 0.268 | 0.4 | 965 | 12 | 979 | 22 | 1011 | 62 | 1018 | 52 | 965 | 12.0 |
| 94 | 151 | 0.32 | 0.05404 | 0.232 | 0.33522 | 1.541 | 0.04519 | 0.073 | 0.01347 | 0.076 | 0.36 | 285 | 5 | 294 | 12 | 373 | 95 | 270 | 15 | 285 | 5.0 |
| 95 | 189 | 0.22 | 0.05054 | 0.238 | 0.29496 | 1.458 | 0.04253 | 0.063 | 0.01284 | 0.073 | 0.3 | 268 | 4 | 262 | 11 | 220 | 105 | 258 | 15 | 268 | 4.0 |
| 96 | 458 | 0.24 | 0.07757 | 0.239 | 1.9989 | 6.751 | 0.18697 | 0.258 | 0.05408 | 0.275 | 0.41 | 1105 | 14 | 1115 | 23 | 1136 | 60 | 1065 | 53 | 1136 | 60.0 |
| 97 | 93 | 0.14 | 0.07103 | 0.272 | 1.5592 | 6.401 | 0.15951 | 0.236 | 0.04955 | 0.3 | 0.36 | 954 | 13 | 954 | 25 | 958 | 77 | 977 | 58 | 954 | 13.0 |
| 98 | 135 | 0.59 | 0.05689 | 0.283 | 0.34412 | 1.8 | 0.04379 | 0.071 | 0.01328 | 0.072 | 0.31 | 276 | 4 | 300 | 14 | 487 | 108 | 267 | 14 | 276 | 4.0 |
| 99 | 177 | 0.47 | 0.05193 | 0.236 | 0.30921 | 1.493 | 0.0432 | 0.07 | 0.01329 | 0.072 | 0.34 | 273 | 4 | 274 | 12 | 282 | 102 | 267 | 14 | 273 | 4.0 |
| 100 | 223 | 0.20 | 0.07762 | 0.239 | 2.1501 | 7.35 | 0.20111 | 0.297 | 0.05992 | 0.31 | 0.43 | 1181 | 16 | 1165 | 24 | 1137 | 60 | 1176 | 59 | 1137 | 60.0 |

Tabla AII.II. Resultados de análisis geocronológico U-Pb de circones detríticos de la formación Tianguistengo. Muestra P.53 colectada en el lecho del río Magdalena en la cercanías del poblado de Santo Domingo Tianguistengo. Coordenadas UTM: 14Q0626542 m E, 2021770 m N.

| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | Mejor edad | | | |
|----------|---------|-----------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------|------|
| | | $\frac{T_2}{U}$ | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | \pm | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | \pm | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | \pm | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | \pm | Error | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | \pm | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | \pm | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | \pm | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | \pm | (Ma) | (Ma) |
| 1 | 104 | 0.48 | 0.05457 | 0.282 | 0.33393 | 1.851 | 0.04486 | 0.089 | 0.01376 | 0.065 | 0.36 | 283 | 5 | 293 | 14 | 395 | 114 | 276 | 13 | 283 | 5.0 |
| 2 | 143 | 0.30 | 0.06025 | 0.238 | 0.70006 | 2.981 | 0.08426 | 0.136 | 0.02588 | 0.114 | 0.37 | 522 | 8 | 539 | 18 | 613 | 84 | 516 | 22 | 522 | 8.0 |
| 3 | 117 | 0.48 | 0.07262 | 0.229 | 1.5933 | 5.65 | 0.15877 | 0.258 | 0.04642 | 0.208 | 0.46 | 950 | 14 | 968 | 22 | 1003 | 63 | 917 | 40 | 950 | 14.0 |
| 4 | 57 | 0.68 | 0.05802 | 0.419 | 0.36099 | 2.7 | 0.04552 | 0.087 | 0.01378 | 0.065 | 0.26 | 287 | 5 | 313 | 20 | 531 | 156 | 277 | 13 | 287 | 5.0 |
| 5 | 70 | 0.72 | 0.05486 | 0.36 | 0.34969 | 2.392 | 0.0463 | 0.089 | 0.01344 | 0.066 | 0.28 | 292 | 5 | 304 | 18 | 407 | 145 | 270 | 13 | 292 | 5.0 |
| 6 | 150 | 0.68 | 0.05441 | 0.247 | 0.34745 | 1.688 | 0.04653 | 0.08 | 0.01426 | 0.063 | 0.36 | 293 | 5 | 303 | 13 | 388 | 100 | 286 | 13 | 293 | 5.0 |
| 7 | 268 | 0.43 | 0.07237 | 0.208 | 1.7179 | 5.606 | 0.17178 | 0.265 | 0.05045 | 0.216 | 0.47 | 1022 | 15 | 1015 | 21 | 996 | 57 | 995 | 42 | 996 | 57.0 |
| 8 | 387 | 0.29 | 0.05518 | 0.222 | 0.33319 | 1.45 | 0.04373 | 0.072 | 0.01429 | 0.069 | 0.38 | 276 | 4 | 292 | 11 | 420 | 88 | 287 | 14 | 276 | 4.0 |
| 9 | 80 | 0.32 | 0.05271 | 0.366 | 0.37013 | 2.66 | 0.0506 | 0.094 | 0.01545 | 0.082 | 0.26 | 318 | 6 | 320 | 20 | 316 | 154 | 310 | 16 | 318 | 6.0 |
| 10 | 202 | 0.35 | 0.0547 | 0.23 | 0.32937 | 1.493 | 0.04353 | 0.075 | 0.01389 | 0.066 | 0.37 | 275 | 5 | 289 | 11 | 400 | 93 | 279 | 13 | 275 | 5.0 |
| 11 | 66 | 0.35 | 0.05475 | 0.313 | 0.3519 | 2.102 | 0.04676 | 0.08 | 0.0148 | 0.079 | 0.29 | 295 | 5 | 306 | 16 | 402 | 126 | 297 | 16 | 295 | 5.0 |
| 12 | 62 | 0.57 | 0.06016 | 0.295 | 0.36168 | 1.914 | 0.04348 | 0.087 | 0.01281 | 0.08 | 0.38 | 274 | 5 | 313 | 14 | 609 | 104 | 257 | 16 | 274 | 5.0 |
| 13 | 370 | 0.92 | 0.05259 | 0.203 | 0.27098 | 1.133 | 0.03738 | 0.06 | 0.01125 | 0.048 | 0.38 | 237 | 4 | 243 | 9 | 311 | 85 | 226 | 10 | 237 | 4.0 |
| 14 | 783 | 0.70 | 0.05498 | 0.162 | 0.37063 | 1.224 | 0.04877 | 0.073 | 0.01518 | 0.064 | 0.45 | 307 | 4 | 320 | 9 | 411 | 64 | 305 | 13 | 307 | 4.0 |
| 15 | 232 | 0.34 | 0.08523 | 0.263 | 2.4557 | 8.452 | 0.20855 | 0.32 | 0.06066 | 0.257 | 0.44 | 1221 | 17 | 1259 | 25 | 1321 | 58 | 1190 | 49 | 1321 | 58.0 |
| 16 | 171 | 0.24 | 0.05461 | 0.22 | 0.34047 | 1.49 | 0.04534 | 0.078 | 0.01375 | 0.066 | 0.39 | 286 | 5 | 298 | 11 | 396 | 88 | 276 | 13 | 286 | 5.0 |
| 17 | 378 | 0.29 | 0.07645 | 0.21 | 1.8745 | 5.892 | 0.17755 | 0.272 | 0.05283 | 0.227 | 0.49 | 1054 | 15 | 1072 | 21 | 1107 | 53 | 1041 | 44 | 1107 | 53.0 |
| 18 | 199 | 0.06 | 0.07502 | 0.226 | 1.816 | 6.176 | 0.1752 | 0.277 | 0.05636 | 0.323 | 0.46 | 1041 | 15 | 1051 | 22 | 1069 | 59 | 1108 | 62 | 1069 | 59.0 |
| 19 | 73 | 0.41 | 0.06029 | 0.339 | 0.38379 | 2.292 | 0.04615 | 0.092 | 0.01331 | 0.068 | 0.34 | 291 | 6 | 330 | 17 | 614 | 119 | 267 | 14 | 291 | 6.0 |
| 20 | 283 | 0.45 | 0.05505 | 0.195 | 0.3798 | 1.479 | 0.05019 | 0.082 | 0.01738 | 0.08 | 0.42 | 316 | 5 | 327 | 11 | 414 | 77 | 348 | 16 | 316 | 5.0 |
| 21 | 156 | 0.53 | 0.05966 | 0.574 | 0.40178 | 4.259 | 0.04884 | 0.098 | 0.01509 | 0.029 | 0.34 | 307 | 6 | 343 | 31 | 591 | 208 | 303 | 6 | 307 | 6.0 |
| 22 | 96 | 0.90 | 0.05062 | 0.347 | 0.31068 | 2.21 | 0.04478 | 0.086 | 0.01426 | 0.066 | 0.27 | 282 | 5 | 275 | 17 | 224 | 151 | 286 | 13 | 282 | 5.0 |
| 23 | 101 | 0.24 | 0.05399 | 0.269 | 0.35724 | 1.901 | 0.04819 | 0.089 | 0.0159 | 0.089 | 0.35 | 303 | 5 | 310 | 14 | 371 | 110 | 319 | 18 | 303 | 5.0 |
| 24 | 207 | 0.55 | 0.05623 | 0.203 | 0.36355 | 1.445 | 0.04692 | 0.078 | 0.01401 | 0.064 | 0.42 | 296 | 5 | 315 | 11 | 461 | 78 | 281 | 13 | 296 | 5.0 |
| 25 | 179 | 0.48 | 0.05877 | 0.237 | 0.39903 | 1.733 | 0.04927 | 0.08 | 0.01644 | 0.077 | 0.37 | 310 | 5 | 341 | 13 | 559 | 86 | 330 | 15 | 310 | 5.0 |
| 26 | 67 | 0.78 | 0.0559 | 0.33 | 0.36712 | 2.281 | 0.04786 | 0.092 | 0.01413 | 0.064 | 0.31 | 301 | 6 | 318 | 17 | 448 | 129 | 284 | 13 | 301 | 6.0 |
| 27 | 147 | 0.96 | 0.0554 | 0.223 | 0.34444 | 1.507 | 0.04509 | 0.077 | 0.01403 | 0.062 | 0.39 | 284 | 5 | 301 | 11 | 428 | 87 | 282 | 12 | 284 | 5.0 |
| 28 | 62 | 0.51 | 0.05744 | 0.366 | 0.35863 | 2.374 | 0.04546 | 0.081 | 0.01397 | 0.072 | 0.27 | 287 | 5 | 311 | 18 | 509 | 138 | 280 | 14 | 287 | 5.0 |
| 29 | 139 | 0.47 | 0.0519 | 0.236 | 0.32177 | 1.552 | 0.04507 | 0.073 | 0.01352 | 0.068 | 0.33 | 284 | 5 | 283 | 12 | 281 | 104 | 271 | 14 | 284 | 5.0 |
| 30 | 97 | 0.39 | 0.05219 | 0.27 | 0.34238 | 1.889 | 0.04782 | 0.092 | 0.0146 | 0.077 | 0.35 | 301 | 6 | 299 | 14 | 294 | 118 | 293 | 15 | 301 | 6.0 |

| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | Mejor edad (Ma) | ± (Ma) | | | | |
|----------|---------|-----------------------|-----------------------------|-------|-----------------------------|--------|----------------------------|-------|----------------------------|-----------------------|-------|----------------------------|----|----------------------------|----|-----------------|--------|-----------------------------|------------|-------------|------|
| | | $\frac{Tl}{U}$ | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | ± (%) | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | ± (%) | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± (%) | $\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ | ± (%) | Error | $\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ | ± | $\frac{^{207}Pb}{^{238}U}$ | ± | | | $\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ | ± | | |
| 31 | 150 | 0.53 | 0.05351 | 0.225 | 0.33733 | 1.515 | 0.04564 | 0.073 | 0.01426 | 0.063 | 0.35 | 288 | 5 | 295 | 12 | 350 | 286 | 13 | 288 | 5.0 | |
| 32 | 181 | 0.73 | 0.05472 | 0.288 | 0.34135 | 1.889 | 0.04516 | 0.077 | 0.01429 | 0.065 | 0.31 | 285 | 5 | 298 | 14 | 401 | 119 | 287 | 13 | 285 | 5.0 |
| 33 | 165 | 0.29 | 0.05174 | 0.222 | 0.3571 | 1.639 | 0.0499 | 0.082 | 0.01483 | 0.072 | 0.36 | 314 | 5 | 310 | 12 | 274 | 298 | 14 | 314 | 5.0 | |
| 34 | 148 | 0.30 | 0.05481 | 0.225 | 0.32498 | 1.456 | 0.04303 | 0.077 | 0.01352 | 0.065 | 0.4 | 272 | 5 | 286 | 11 | 404 | 92 | 271 | 13 | 272 | 5.0 |
| 35 | 287 | 0.60 | 0.05827 | 0.192 | 0.63137 | 2.575 | 0.07764 | 0.186 | 0.02499 | 0.126 | 0.59 | 482 | 11 | 497 | 16 | 540 | 72 | 499 | 25 | 482 | 11.0 |
| 36 | 417 | 0.42 | 0.05687 | 0.171 | 0.50856 | 1.713 | 0.06426 | 0.097 | 0.01727 | 0.078 | 0.45 | 401 | 6 | 417 | 12 | 487 | 66 | 346 | 15 | 401 | 6.0 |
| 37 | 118 | 0.41 | 0.05456 | 0.272 | 0.33913 | 1.797 | 0.04505 | 0.08 | 0.01413 | 0.066 | 0.34 | 284 | 5 | 297 | 14 | 394 | 112 | 284 | 13 | 284 | 5.0 |
| 38 | 147 | 0.76 | 0.05513 | 0.265 | 0.34527 | 1.75 | 0.04526 | 0.072 | 0.01361 | 0.062 | 0.32 | 285 | 4 | 301 | 13 | 417 | 108 | 273 | 12 | 285 | 4.0 |
| 39 | 114 | 0.77 | 0.0485 | 0.251 | 0.30248 | 1.654 | 0.04527 | 0.081 | 0.01317 | 0.059 | 0.32 | 285 | 5 | 268 | 13 | 124 | 115 | 264 | 12 | 285 | 5.0 |
| 40 | 234 | 0.93 | 0.05627 | 0.564 | 0.36114 | 4.08 | 0.04655 | 0.086 | 0.01448 | 0.023 | 0.38 | 293 | 5 | 313 | 30 | 463 | 226 | 291 | 4 | 293 | 5.0 |
| 41 | 144 | 0.90 | 0.05553 | 0.224 | 0.367 | 1.606 | 0.04814 | 0.083 | 0.0148 | 0.066 | 0.39 | 303 | 5 | 317 | 12 | 434 | 90 | 297 | 13 | 303 | 5.0 |
| 42 | 154 | 1.05 | 0.05905 | 0.218 | 0.36707 | 1.495 | 0.04536 | 0.078 | 0.01063 | 0.05 | 0.42 | 286 | 5 | 317 | 11 | 569 | 81 | 214 | 10 | 286 | 5.0 |
| 43 | 87 | 0.70 | 0.05213 | 0.289 | 0.31152 | 1.826 | 0.04373 | 0.084 | 0.01365 | 0.062 | 0.32 | 276 | 5 | 275 | 14 | 291 | 127 | 274 | 12 | 276 | 5.0 |
| 44 | 221 | 0.93 | 0.05343 | 0.189 | 0.34494 | 1.346 | 0.04688 | 0.077 | 0.01406 | 0.063 | 0.42 | 295 | 5 | 301 | 10 | 347 | 80 | 282 | 13 | 295 | 5.0 |
| 45 | 295 | 0.63 | 0.05652 | 0.213 | 0.35825 | 1.472 | 0.04606 | 0.074 | 0.01489 | 0.068 | 0.4 | 290 | 5 | 311 | 11 | 473 | 84 | 299 | 14 | 290 | 5.0 |
| 46 | 151 | 0.23 | 0.05538 | 0.397 | 0.33325 | 2.622 | 0.04364 | 0.072 | 0.01361 | 0.029 | 0.42 | 275 | 4 | 292 | 20 | 428 | 150 | 273 | 6 | 275 | 4.0 |
| 47 | 126 | 0.50 | 0.05462 | 0.432 | 0.35688 | 3.145 | 0.04739 | 0.085 | 0.0148 | 0.027 | 0.39 | 298 | 5 | 310 | 24 | 397 | 166 | 297 | 5 | 298 | 5.0 |
| 48 | 160 | 0.48 | 0.07375 | 0.217 | 1.7863 | 5.918 | 0.17543 | 0.267 | 0.05202 | 0.22 | 0.46 | 1042 | 15 | 1040 | 22 | 1035 | 55 | 1025 | 42 | 1035 | 55.0 |
| 49 | 654 | 0.09 | 0.07298 | 0.196 | 1.764 | 5.447 | 0.17477 | 0.266 | 0.05306 | 0.228 | 0.49 | 1038 | 15 | 1032 | 20 | 1013 | 51 | 1045 | 44 | 1013 | 51.0 |
| 50 | 122 | 0.38 | 0.08176 | 0.24 | 2.3126 | 7.701 | 0.20483 | 0.32 | 0.05942 | 0.255 | 0.47 | 1201 | 17 | 1216 | 24 | 1240 | 53 | 1167 | 49 | 1240 | 53.0 |
| 51 | 27 | 0.09 | 0.07418 | 0.331 | 1.6135 | 7.743 | 0.15832 | 0.282 | 0.0407 | 0.399 | 0.37 | 947 | 16 | 975 | 30 | 1046 | 84 | 806 | 77 | 947 | 16.0 |
| 52 | 813 | 0.33 | 0.08578 | 0.225 | 2.3375 | 7.333 | 0.19711 | 0.338 | 0.04559 | 0.198 | 0.55 | 1160 | 18 | 1224 | 22 | 1333 | 47 | 901 | 38 | 1333 | 47.0 |
| 53 | 250 | 0.48 | 0.05787 | 0.219 | 0.38186 | 1.564 | 0.04787 | 0.076 | 0.01629 | 0.073 | 0.38 | 301 | 5 | 328 | 11 | 525 | 77 | 327 | 15 | 301 | 5.0 |
| 54 | 234 | 0.35 | 0.08127 | 0.218 | 2.289 | 7.217 | 0.20313 | 0.336 | 0.05954 | 0.255 | 0.53 | 1192 | 18 | 1209 | 22 | 1228 | 49 | 1169 | 49 | 1228 | 49.0 |
| 55 | 124 | 0.69 | 0.05588 | 0.274 | 0.343 | 1.781 | 0.04462 | 0.077 | 0.01437 | 0.066 | 0.33 | 281 | 5 | 299 | 13 | 448 | 102 | 288 | 13 | 281 | 5.0 |
| 56 | 401 | 0.26 | 0.09179 | 0.246 | 3.2861 | 10.139 | 0.25882 | 0.393 | 0.07751 | 0.332 | 0.5 | 1484 | 20 | 1478 | 24 | 1463 | 47 | 1509 | 62 | 1463 | 47.0 |
| 57 | 198 | 0.63 | 0.05744 | 0.226 | 0.37329 | 1.615 | 0.0473 | 0.084 | 0.01522 | 0.069 | 0.42 | 298 | 5 | 322 | 12 | 509 | 81 | 305 | 14 | 298 | 5.0 |
| 58 | 205 | 0.23 | 0.07831 | 0.22 | 2.119 | 6.748 | 0.19568 | 0.293 | 0.0574 | 0.246 | 0.47 | 1152 | 16 | 1155 | 22 | 1155 | 52 | 1128 | 47 | 1155 | 52.0 |
| 59 | 196 | 1.17 | 0.07484 | 0.22 | 1.8307 | 6.176 | 0.17714 | 0.293 | 0.05095 | 0.219 | 0.49 | 1051 | 16 | 1057 | 22 | 1064 | 55 | 1004 | 42 | 1064 | 55.0 |
| 60 | 299 | 0.09 | 0.0811 | 0.204 | 2.08033 | 6.232 | 0.18604 | 0.277 | 0.05555 | 0.083 | 0.49 | 1100 | 15 | 1142 | 21 | 1224 | 46 | 1093 | 16 | 1224 | 46.0 |
| 61 | 160 | 0.19 | 0.07674 | 0.216 | 1.9026 | 6.114 | 0.17948 | 0.28 | 0.0551 | 0.24 | 0.48 | 1064 | 15 | 1082 | 21 | 1114 | 54 | 1084 | 46 | 1114 | 54.0 |
| 62 | 145 | 0.52 | 0.05195 | 0.205 | 0.33331 | 1.419 | 0.04634 | 0.075 | 0.01463 | 0.064 | 0.38 | 292 | 5 | 292 | 11 | 283 | 87 | 294 | 13 | 292 | 5.0 |
| 63 | 508 | 0.24 | 0.07106 | 0.204 | 1.4958 | 4.86 | 0.15233 | 0.231 | 0.02232 | 0.097 | 0.47 | 914 | 13 | 929 | 20 | 959 | 56 | 446 | 19 | 914 | 13.0 |
| 64 | 444 | 0.41 | 0.08122 | 0.218 | 2.3302 | 7.173 | 0.20759 | 0.312 | 0.0617 | 0.261 | 0.49 | 1216 | 17 | 1222 | 22 | 1227 | 51 | 1210 | 50 | 1227 | 51.0 |
| 65 | 544 | 0.07 | 0.07277 | 0.195 | 1.646 | 5.075 | 0.16353 | 0.248 | 0.07166 | 0.316 | 0.49 | 976 | 14 | 988 | 19 | 1008 | 52 | 1399 | 60 | 976 | 14.0 |

| Análisis | U (ppm) | Relaciones isotópicas | | | | | | | | Edades aparentes (Ma) | | | | | | Mejor edad | | | | | |
|----------|---------|-----------------------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-------|------|-------------|------|
| | | $\frac{Ta}{U}$ | $\frac{^{177}Zr}{^{138}Zr}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{176}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{204}Pb}{^{208}Tl}$ | Error | $\frac{^{176}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}U}$ | \pm | $\frac{^{177}Zr}{^{138}Zr}$ | \pm | $\frac{^{204}Pb}{^{208}Tl}$ | \pm | (Ma) | (Ma) | |
| 66 | 75 | 0.33 | 0.0756 | 0.267 | 1.8069 | 7.098 | 0.17403 | 0.298 | 0.05328 | 0.242 | 0.44 | 1034 | 16 | 1048 | 26 | 1084 | 68 | 1049 | 46 | 1084 | 68.0 |
| 67 | 162 | 0.26 | 0.07142 | 0.236 | 1.5921 | 5.853 | 0.16113 | 0.261 | 0.04851 | 0.217 | 0.44 | 963 | 14 | 967 | 23 | 969 | 65 | 957 | 42 | 963 | 14.0 |
| 68 | 199 | 0.85 | 0.05289 | 0.217 | 0.33065 | 1.465 | 0.04533 | 0.075 | 0.01409 | 0.061 | 0.38 | 286 | 5 | 290 | 11 | 324 | 90 | 283 | 12 | 286 | 5.0 |
| 69 | 438 | 0.45 | 0.05344 | 0.168 | 0.35335 | 1.255 | 0.04779 | 0.078 | 0.01481 | 0.064 | 0.47 | 301 | 5 | 307 | 9 | 348 | 68 | 297 | 13 | 301 | 5.0 |
| 70 | 170 | 0.27 | 0.07868 | 0.226 | 2.231 | 7.543 | 0.20473 | 0.365 | 0.0626 | 0.276 | 0.53 | 1201 | 20 | 1191 | 24 | 1164 | 55 | 1227 | 52 | 1164 | 55.0 |
| 71 | 109 | 1.15 | 0.07515 | 0.221 | 1.6997 | 5.664 | 0.16347 | 0.256 | 0.04937 | 0.206 | 0.47 | 976 | 14 | 1008 | 21 | 1073 | 57 | 974 | 40 | 1073 | 57.0 |
| 72 | 339 | 0.74 | 0.05097 | 0.164 | 0.29945 | 1.073 | 0.04249 | 0.066 | 0.01111 | 0.048 | 0.44 | 268 | 4 | 266 | 8 | 239 | 71 | 223 | 10 | 268 | 4.0 |
| 73 | 238 | 0.19 | 0.07655 | 0.21 | 1.9865 | 6.308 | 0.18773 | 0.299 | 0.05767 | 0.254 | 0.5 | 1109 | 16 | 1111 | 21 | 1109 | 53 | 1133 | 49 | 1109 | 53.0 |
| 74 | 285 | 0.62 | 0.0819 | 0.225 | 2.1975 | 6.984 | 0.19417 | 0.311 | 0.06037 | 0.274 | 0.5 | 1144 | 17 | 1180 | 22 | 1243 | 52 | 1185 | 52 | 1243 | 52.0 |
| 75 | 66 | 0.74 | 0.05781 | 0.304 | 0.36533 | 2.047 | 0.04609 | 0.089 | 0.01569 | 0.076 | 0.35 | 290 | 5 | 316 | 15 | 523 | 112 | 315 | 15 | 290 | 5.0 |
| 76 | 829 | 0.22 | 0.09538 | 0.251 | 3.0901 | 9.58 | 0.23417 | 0.386 | 0.07239 | 0.31 | 0.53 | 1356 | 20 | 1430 | 24 | 1536 | 48 | 1413 | 58 | 1536 | 48.0 |
| 77 | 159 | 0.46 | 0.08132 | 0.228 | 2.4055 | 7.712 | 0.21379 | 0.33 | 0.06325 | 0.271 | 0.48 | 1249 | 18 | 1244 | 23 | 1229 | 53 | 1240 | 52 | 1229 | 53.0 |
| 78 | 60 | 0.38 | 0.06092 | 0.293 | 0.41789 | 2.134 | 0.0497 | 0.085 | 0.01612 | 0.09 | 0.34 | 313 | 5 | 355 | 15 | 636 | 106 | 323 | 18 | 313 | 5.0 |
| 79 | 147 | 0.13 | 0.07147 | 0.225 | 1.5771 | 5.556 | 0.16015 | 0.252 | 0.0497 | 0.232 | 0.45 | 958 | 14 | 961 | 22 | 971 | 66 | 980 | 45 | 958 | 14.0 |
| 80 | 45 | 0.09 | 0.07323 | 0.265 | 1.6474 | 6.538 | 0.16312 | 0.268 | 0.05589 | 0.329 | 0.41 | 974 | 15 | 989 | 25 | 1020 | 75 | 1099 | 63 | 974 | 15.0 |
| 81 | 194 | 0.54 | 0.08585 | 0.247 | 2.72 | 8.918 | 0.22907 | 0.361 | 0.06939 | 0.293 | 0.48 | 1330 | 19 | 1334 | 24 | 1335 | 57 | 1356 | 55 | 1335 | 57.0 |
| 82 | 148 | 0.32 | 0.07581 | 0.228 | 1.9242 | 7.031 | 0.18391 | 0.381 | 0.05389 | 0.245 | 0.57 | 1088 | 21 | 1090 | 24 | 1090 | 62 | 1061 | 47 | 1090 | 62.0 |
| 83 | 256 | 0.21 | 0.07661 | 0.22 | 1.9564 | 6.615 | 0.18472 | 0.329 | 0.05916 | 0.261 | 0.53 | 1093 | 18 | 1101 | 23 | 1111 | 59 | 1162 | 50 | 1111 | 59.0 |
| 84 | 185 | 0.97 | 0.07747 | 0.223 | 1.9849 | 6.453 | 0.18522 | 0.281 | 0.05562 | 0.235 | 0.46 | 1095 | 15 | 1110 | 22 | 1133 | 59 | 1094 | 45 | 1133 | 59.0 |
| 85 | 181 | 0.18 | 0.07564 | 0.208 | 1.7975 | 5.883 | 0.17207 | 0.306 | 0.05587 | 0.254 | 0.54 | 1024 | 17 | 1045 | 21 | 1086 | 57 | 1099 | 49 | 1086 | 57.0 |
| 86 | 89 | 0.22 | 0.07179 | 0.206 | 1.619 | 5.279 | 0.16287 | 0.251 | 0.04769 | 0.217 | 0.47 | 973 | 14 | 978 | 20 | 980 | 60 | 942 | 42 | 973 | 14.0 |
| 87 | 99 | 0.61 | 0.05865 | 0.267 | 0.35107 | 1.705 | 0.04359 | 0.075 | 0.01477 | 0.072 | 0.35 | 275 | 5 | 306 | 13 | 554 | 102 | 296 | 14 | 275 | 5.0 |
| 88 | 231 | 0.55 | 0.05661 | 0.209 | 0.35332 | 1.427 | 0.04531 | 0.074 | 0.01514 | 0.067 | 0.41 | 286 | 5 | 307 | 11 | 476 | 84 | 304 | 13 | 286 | 5.0 |
| 89 | 397 | 0.49 | 0.05279 | 0.163 | 0.3556 | 1.224 | 0.04876 | 0.075 | 0.01556 | 0.067 | 0.44 | 307 | 5 | 309 | 9 | 320 | 72 | 312 | 13 | 307 | 5.0 |
| 90 | 240 | 0.41 | 0.0858 | 0.241 | 2.6931 | 8.669 | 0.22713 | 0.357 | 0.06397 | 0.282 | 0.49 | 1319 | 19 | 1327 | 24 | 1334 | 56 | 1253 | 54 | 1334 | 56.0 |
| 91 | 91 | 0.53 | 0.05308 | 0.265 | 0.31771 | 1.699 | 0.04328 | 0.083 | 0.01384 | 0.071 | 0.36 | 273 | 5 | 280 | 13 | 332 | 116 | 278 | 14 | 273 | 5.0 |
| 92 | 132 | 0.33 | 0.05521 | 0.227 | 0.35992 | 1.603 | 0.04721 | 0.081 | 0.01726 | 0.086 | 0.38 | 297 | 5 | 312 | 12 | 421 | 94 | 346 | 17 | 297 | 5.0 |
| 93 | 364 | 0.81 | 0.05386 | 0.17 | 0.36526 | 1.281 | 0.04911 | 0.075 | 0.01519 | 0.064 | 0.44 | 309 | 5 | 316 | 10 | 365 | 73 | 305 | 13 | 309 | 5.0 |
| 95 | 123 | 0.35 | 0.05691 | 0.215 | 0.37741 | 1.565 | 0.04779 | 0.082 | 0.01611 | 0.078 | 0.41 | 301 | 5 | 325 | 12 | 488 | 88 | 323 | 16 | 301 | 5.0 |
| 96 | 117 | 0.21 | 0.08299 | 0.357 | 2.5325 | 11.48 | 0.22174 | 0.319 | 0.06734 | 0.39 | 0.32 | 1291 | 17 | 1281 | 33 | 1269 | 83 | 1317 | 74 | 1269 | 83.0 |
| 97 | 167 | 0.30 | 0.07294 | 0.238 | 1.8429 | 6.568 | 0.18355 | 0.262 | 0.05396 | 0.279 | 0.4 | 1086 | 14 | 1061 | 23 | 1012 | 65 | 1062 | 54 | 1012 | 65.0 |
| 98 | 213 | 0.65 | 0.06909 | 0.217 | 1.5377 | 5.317 | 0.16153 | 0.233 | 0.04673 | 0.236 | 0.42 | 965 | 13 | 946 | 21 | 901 | 64 | 923 | 46 | 965 | 13.0 |
| 99 | 151 | 0.39 | 0.07472 | 0.254 | 1.8683 | 6.89 | 0.18114 | 0.259 | 0.0568 | 0.3 | 0.39 | 1073 | 14 | 1070 | 24 | 1061 | 67 | 1117 | 57 | 1061 | 67.0 |



LEYENDA

| | | |
|-------------------|--------|--|
| CENOZOICO | Cri | Rocas ígneas indiferenciadas |
| | Qui | Depósitos recientes indiferenciados |
| | Cph | Unidad Pozo Hondo |
| MESOZOICO | Kic | Caliza Coyotepec |
| | Kim | Formación Magdalena |
| | Jm-Jso | Formación Otlaltepec |
| | Ji-Jmp | Formación Piedra Hueca |
| | Ts-Jit | Formación Tianguistengo |
| PALEOZOICO | Pa | Complejo Metamórfico Acatlán no diferenciado |
| | Pgn | Plutón Totoltepec Granitoide/ Gabrodiorita |

SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA

| | |
|--|---|
| Contacto geológico | Falla normal |
| Contacto geológico inferior | Falla normal inferida |
| Discordancia sedimentaria interna | Falla inversa |
| Rumbo y echado medidos | Falla lateral izquierda |
| Foliación | Falla lateral derecha |
| Rumbo y echado fotogeológico | Falla lateral izquierda con componente normal |
| Rumbo y echado compilado de Ortega-Guerrero (1989) | Detachment |
| Línea de sección | Piñeque de arrastre |
| Símbolo de medición de columna estratigráfica | Piñeque de arrastre cubierto |

SIMBOLOGÍA E INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

| | |
|-------------------|--|
| Poblad | ELIPSOIDE: GRS80 |
| Carretera | DATUM: ITRF92 |
| Terracer | CUADRICULA: UTM Cada 1000 m |
| Curva de nivel | INTERVALO DE CONFIGURACION: 10 m |
| Corriente perenne | FUENTE: Base Topográfica Digital INEGI |
| | Carta Escala 1:50,000 |
| | Petalongo E14 B-84 |

UNAM INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MAPA GEOLÓGICO
TECTÓNICA Y SEDIMENTACIÓN DEL JURÁSICO EN LA REGIÓN DE SANTO DOMINGO TIANGUISTENGO, OAXACA
TESIS DE MAESTRÍA
MARÍA DE LOS ANGELES VERDE RAMÍREZ
2015
UNAM POSGRADO

