



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DE LA CUENCA CHIHUIX

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A :

MARCO ANTONIO ORDUÑA REYES

ASESOR DE TESIS:
M. en C. Jorge Nieto Obregon



México, D.F.

Junio 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A Dios:

Por haberme dado la fortaleza y el coraje para alcanzar mis metas y en especial ésta, porque nunca me ha abandonado cuando he estado a punto de desfallecer y que pudiendo yo estar en medio de una tormenta, tengo la confianza que él aún sigue en mi barca.

A mis padres:

Manuelita y Jacinto, porque además de haberme regalado la existencia, son ellos quienes me han dado todo su amor, atención y cuidados durante mi vida y que gracias a su esfuerzo diario he llegado a ser lo que soy.

A mis hermanos:

De antemano les agradezco todo su cariño y amor hacia mí

Anita, porque me das siempre consejos acertados para tomar las decisiones correctas en mi vida.

Tere, por tu ejemplo de dedicación, tenacidad y empeño por ser cada día una mejor persona.

Alfredo, por tu gran bondad y por la confianza que siempre has depositado en mí, sé que tus buenos detalles conmigo son invaluable.

Neto, porque tu integridad como persona siempre me ha servido de gran ejemplo para mi desarrollo personal desde que era niño, por ser una persona honesta y luchadora..

Adriana, por apoyarme en todo, por ser además una gran amiga y por toda tu confianza y empeño conmigo.

Edgar, por tus buenos consejos y por el tiempo que me has dedicado para hacerme reflexionar que debo mejorar día con día, al final ese tiempo sí ha rendido sus frutos y ejemplo de ello es esta tesis.

Miky, por darme siempre ánimos para que yo le echara muchas ganas y nunca me desanimara en mi lucha por terminar mis proyectos.

Rufino, por brindarme siempre tu apoyo y por estar siempre con nosotros.

A mis sobrinitos:

Chatito, Dianita, Tani, Alfre, Manu, Marisol, Adayrita, Tamarita y la más pequeña Melisa, por darme todo su cariño que para mí es un gran tesoro.

A mis cuñadas y cuñados:

Magaly, Marcela, Mary, Gerardo y Braulio, porque sé que junto con mis hermanos y hermanas siempre me han brindado todo su apoyo.

A ma petite:

Paulina, por todos estos bellos momentos que he pasado a tu lado y que en mucho contribuyeron para motivarme a terminar esta tesis.

A mis amigos:

Juan Carlos, porque eres una persona muy valiosa y me siento feliz por ser uno de tus amigos.

Claudia, por ser el diamante que un día tuve en mis manos y no supe aquilatar, ahora sé que sigo teniendo tu dulce amistad.

Ishtar, por ser una persona muy bella y creo que tengo muchas cosas que agradecerte, llegaste a mi vida con tu cálido corazón en un crudo invierno europeo.

Luis, por todo tu apoyo que siempre me has brindado.

Ludovic, por ser el amigo que me tendió su mano en Europa.

A mis profesores:

El Ingeniero Jorge Nieto Obregón, por todo su tiempo, paciencia y conocimiento que siempre me ha brindado desde que yo era estudiante y porque siempre me ha apoyado y me ha dado buenos consejos para tomar buenas decisiones en mi carrera profesional.

Los Ingenieros Javier Arellano, Emiliano Campos, José Luis Arcos y Alberto Arias, por haberme regalado una parte importante de su valiosa atención y por sus consejos para mejorar esta tesis.

El Doctor Mario Aranda, que me brindó todas las facilidades para realizar este trabajo.

El Ingeniero Daniel Vélez por guiarme en la resolución de los problemas de la interpretación sísmica.

A las instituciones:

La Universidad Nacional Autónoma de México que me ha dado grandes tesoros en conocimientos.

El IFP School, por todo lo que aprendí dentro de sus aulas.

Todos los integrantes del Departamento de Proyectos Marinos de PEMEX, en Poza Rica, por todos los valiosos conocimientos que compartieron conmigo y que gracias a su experiencia me fue posible realizar esta tesis.

A Francia, por haberme recibido con los brazos abiertos.

A todos las muchas personas a mí alrededor que me han apoyado y que tal vez injustamente no los menciono en este agradecimiento.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
I GENERALIDADES	7
1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA	7
1.2 OBJETIVOS	9
1.3 JUSTIFICACIÓN	9
1.4 TRABAJOS PREVIOS	10
1.5 METODOLOGÍA	11
II MARCO GEOLÓGICO	13
2.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA CUENCA TAMPICO-MISANTLA	15
2.2 BIOESTRATIGRAFÍA Y LITOESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA TAMPICO-MISANTLA	18
III GENERALIDADES SOBRE SÍSMICA DE REFLEXIÓN	20
3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN	20
3.2 ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA	21
3.3 ANÁLISIS DE LAS SECUENCIAS DE DEPÓSITO	22
3.4 ANÁLISIS DE LAS FACIES SÍSMICAS	27
3.5 LOS ATRIBUTOS SÍSMICOS DE LOS REFLECTORES	29
3.6 ATRIBUTOS SÍSMICOS EN LA CUENCA CHIHUIX	33
IV BORDES DE PLATAFORMA CLÁSTICA EN MÁRGENES PASIVOS	36
V SISTEMA FALLA DE CRECIMIENTO/ROLLOVER	41
5.1 INTRODUCCIÓN	41
5.2 FALLAS NORMALES LÍSTRICAS	42
5.3 GÉNESIS DE LOS ROLLOVERS	46
5.4 DESARROLLO PROGRESIVO DE UN SISTEMA FALLA DE CRECIMIENTO/ROLLOVER	54
VI CUENCA CHIHUIX	60
6.1 GEOMETRÍA DE LA CUENCA CHIHUIX	61
6.2 FALLA REGIONAL	62
6.3 FALLAS DE CRECIMIENTO	62
6.4 PLIEGUES	63
6.5 GRÁBENS	64
6.6 GÉNESIS DE LA CUENCA CHIHUIX	65
VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
7.1 CONCLUSIONES	67
7.2 RECOMENDACIONES	69
VIII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	
A. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA LANKAHUASA	
B. SECCIÓN SÍSMICA REGIONAL 2D	
C. DESCRIPCIÓN DE LAS INLINES	
D. DESCRIPCIÓN DE LAS CROSSLINES	
E. DESCRIPCIÓN DE LAS TIMESLICES	
F. EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX	

RESUMEN

La Cuenca Chihuix se localiza en el área marina del Golfo de México, su límite Oeste es paralelo a la costa del Estado de Veracruz en la República Mexicana y separada unos 30 km, el límite Norte está formado por la paleoplataforma de Tuxpan, el límite Sur está formado por la cuenca de Veracruz y el límite Este se haya aproximadamente sobre el borde de la plataforma continental. Las coordenadas de esta cuenca están entre los 20° 00' y 21° 30' de latitud Norte y entre los 96° 20' y 96° 35' de longitud Oeste. En planta tiene una longitud de 65 km de largo por unos 15 km de ancho (en su parte más ancha), y una orientación general NW 30° SE.

Se puede definir a la Cuenca Chihuix como una cuenca estructural que se originó en una margen pasiva durante el Plioceno Temprano, como resultado de una falla de crecimiento que cortó una secuencia clástica miocénica y generó el espacio suficiente para el depósito de otra secuencia clástica.

En el subsuelo está delimitada por dos rasgos estructurales principales: la Falla Lítrica (una falla sintética) y la Falla Antitética (una falla conjugada), siendo estos dos elementos las principales estructuras que la definen como un hundimiento estructural y que la separa de las otras estructuras principales de la región Lankahuasa.

La Falla Lítrica y la Falla Antitética tienen una orientación NW-SE, con echados en sentido opuesto: el echado de la Falla Lítrica es hacia el NE y varía de fuerte (80°) en la parte más somera hasta llegar progresivamente a ser muy pequeño (casi 0°), cuando se une con la Falla Lítrica Regional; en cambio el echado de la Falla Antitética es hacia el SW e igualmente es fuerte en la parte más somera (80°) y disminuye progresivamente (alcanzando un mínimo de 20°) cuando se une con la Falla Lítrica.

La geometría de la Falla Lítrica es similar a una superficie alabeada, y el rumbo no se mantiene constante, porque en la parte central el rumbo es NW 30° SE y un echado hacia el Este y en la parte Sur cambia el rumbo hasta llegar ser de NE 80° SW y un echado al NW. La Falla Antitética está conformada por dos Fallas en echelon, ambas tiene un rumbo (aproximadamente NW 28° SE) y ese rumbo permanece constante.

El desplazamiento de cada una de las Fallas es diferente en las partes Sur, Centro y Norte de la cuenca. En la parte Sur la Falla Lítrica tiene un desplazamiento mayor que la Falla Antitética y como resultado de ello se formó un pliegue asimétrico con el plano axial de idéntico rumbo que la Falla Lítrica y cercano a ella. En la parte Central de la cuenca, la Falla Lítrica y la Falla Antitética tienen un desplazamiento igual y resultado de ello es la formación de un pliegue simétrico con un plano axial vertical y la línea de charnela con el mismo rumbo de la Cuenca (NW 30° SE). En la parte Norte de la cuenca la Falla Antitética tiene un desplazamiento mayor que la Falla Lítrica y resultado de ello es la formación de un pliegue asimétrico con el plano axial de idéntico rumbo que la Falla Antitética y cercano a ella.

Esa diferencia de desplazamientos entre estas fallas dio origen a la formación de dos conjuntos de fallas normales en la parte media de la cuenca llamadas: Graben de la Cresta y Graben del

Flanco, que contribuyeron a acomodar el material en el espacio generado por la diferencia de movimiento de cada Falla.

En una posición diagonal dentro de la cuenca hay dos fallas normales que van desde la Falla Lítrica a la Falla Antitética, llamadas Fallas Transversales que sirvieron como un plano de simetría para acomodar a la cuenca que tenía un comportamiento distinto en la parte Norte como de la parte Sur.

I INTRODUCCIÓN

Se denomina gas natural a la porción de hidrocarburos que existe en los yacimientos en fase gaseosa, ya sea de forma separada o como solución en el aceite, pero permaneciendo como gas a condiciones del nivel del mar (Pemex, 1999). El gas natural ha adquirido con el tiempo una mayor importancia tanto económica y como ecológica en un ámbito nacional e internacional, por lo que PEMEX ha renovado sus esfuerzos para incrementar la exploración y explotación de este recurso.

La mayor parte de la exploración de gas por parte de PEMEX ha sido realizada en el Golfo de México, ya que México es el dueño de una gran porción de éste. Así que es importante hacer un breve resumen de la historia de la exploración del Golfo de México para comprender cuales han sido los factores que llevaron a la exploración del área que sirvió de base para el desarrollo de esta tesis.

La exploración geológica de la cuenca del Golfo de México comenzó a principios del siglo XIX por Alexander von Humboldt; sin embargo la primera exploración petrolera inició a mediados de 1860 (Salvador, 1991) en el Este de Texas, Estados Unidos. Los primeros proyectos de exploración y producción se realizaron en tierra firme o costa adentro (término que viene del inglés *onshore*) en los bordes del Golfo de México. El primer trabajo en el área marina o costa fuera (término que viene del inglés *offshore*) data de 1938, con la perforación de un pozo en las inmediaciones de Louisiana, Estados Unidos.

La historia de la exploración petrolera del Golfo de México en México, ha ido a la par con la historia de exploración en Estados Unidos. La historia de la industria del petróleo en México se inicia en 1900 cuando la "Mexican Petroleum of California" de Edward L. Doheny, perforó un campo petrolero llamado "El Ebano" en el municipio del mismo nombre en San Luis Potosí y descubrió petróleo (1901) con el pozo "Doheny I". El primer pozo significativo fue "La Pez-1" (1904) y una producción de 1,500 barriles de petróleo diario, resultado del trabajo de exploración de Ezequiel Ordóñez. Ese pozo es el primer indicio del potencial petrolero de la región (Salvador, 1991; Pemex, 1999) y marca el inicio de una serie de campañas de exploración y descubrimientos en la parte terrestre.

La segunda década del siglo fue una época de febril actividad petrolera, que tuvo una trayectoria ascendente hasta llegar en 1921, a una producción de crudo de poco más de 193 millones de barriles, que colocaba a México como segundo productor mundial, gracias al descubrimiento de yacimientos terrestres de lo que se llamó la "Faja de Oro", al Norte del Estado de Veracruz, que se extendían hacia el Estado de Tamaulipas.

Uno de los pozos más espectaculares en los anales de la historia petrolera del mundo fue el "Cerro Azul No. 4", localizado en terrenos de las haciendas de "Toteco" y "Cerro Azul", propiedad de la "Huasteca Petroleum Company", que ha sido uno de los campos petroleros más productivos a nivel mundial, al obtener una producción -al 31 de diciembre de 1921- de poco más de 57 millones de barriles.

En los años setenta, Petróleos Mexicanos (PEMEX) descubrió en el área marina del Golfo los campos de aceite del Esturión, Tiburón, Atún, Bagre, Arenque, Tintorera, Morsa y Escualo, y de 1980 a la actualidad, yacimientos de gas en el área de Burgos y en la Plataforma Continental del Golfo de México.

Otro de los rasgos que es importante conocer con relación a la exploración petrolera del Golfo de México, en México, es hablar un poco de la estructura organizativa de la única empresa que lleva a cabo esta exploración: Petróleos Mexicanos, por lo que mencionaré brevemente su forma de operación y como esta explica la forma en como se delimitó el área de estudio.

A partir de la expropiación petrolera del 18 de marzo, se crea la empresa estatal Petróleos Mexicanos el 7 de junio de 1938, siendo la única empresa autorizada para realizar todos los trabajos de exploración petrolera en México. No fue sino hasta julio de 1992, que el Congreso de la Unión aprobó la Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios, mediante la cual se emprendió una reestructuración administrativa y organizativa bajo el concepto de líneas integradas de negocios que incorpora criterios de productividad, responsabilidad, autonomía de gestión, definiendo bajo un mando único actividades operativas y de apoyo. Por tanto, PEMEX descentralizó y desconcentró funciones y recursos para cumplir todas las actividades implícitas de la industria petrolera y sus áreas estratégicas.

Esta ley establece la creación de los siguientes organismos descentralizados subsidiarios de carácter técnico, industrial y comercial; cada uno de ellos con personalidad jurídica y patrimonio propios: PEMEX Exploración y Producción, PEMEX Refinación, PEMEX Gas y Petroquímica Básica y PEMEX Petroquímica, bajo la conducción central del Corporativo Petróleos Mexicanos.

Petróleos Mexicanos es el responsable de la conducción central y de la dirección estratégica de la industria petrolera estatal, y de asegurar su integridad y unidad de acción.

PEMEX Exploración y Producción tiene a su cargo la exploración y explotación del petróleo y el gas natural.

PEMEX Refinación produce, distribuye y comercializa combustibles y demás productos petrolíferos.

PEMEX Gas y Petroquímica Básica procesa el gas natural y los líquidos del gas natural; distribuye y comercializa gas natural y gas LP; y produce y comercializa productos petroquímicos básicos.

PEMEX Petroquímica a través de sus siete empresas filiales (Petroquímica Camargo, Petroquímica Cangrejera, Petroquímica Cosoleacaque, Petroquímica Escolín, Petroquímica Morelos, Petroquímica Pajaritos y Petroquímica Tula), elabora, distribuye y comercializa una amplia gama de productos petroquímicos secundarios.

Pemex Comercio Internacional realiza las actividades de comercio exterior de Petróleos Mexicanos.

La misión de Pemex Exploración y Producción (PEP, estructura creada en 1992), es maximizar el valor económico a largo plazo de las reservas de crudo y gas natural del país, garantizando la seguridad de sus instalaciones y su personal, en armonía con la comunidad y el medio ambiente. Sus actividades principales son la exploración y explotación del petróleo y el gas natural; su transporte, almacenamiento en terminales y su comercialización de primera mano; éstas se realizan cotidianamente en cuatro regiones geográficas que abarcan la totalidad del territorio mexicano: Norte, Sur, Marina Noreste y Marina Suroeste (Pemex, 1999). Todas estas regiones incluyen una porción de la cuenca Golfo de México, pero solamente la Región Norte, la Región Marina Noreste y la Región Marina Suroeste incluyen a la porción marina del Golfo de México.

La Región Norte tiene un área de 2 millones de km² y está dividida en activos de producción y de exploración; los activos de exploración son: Reynosa (551,484 km²), Tampico (150,302 km²), Misantla-Golfo de México (261,186 km²) y Papaloapan (30,989 km²). El activo Misantla-Golfo de México está compuesta por dos cuencas: la Cuenca Misantla y la cuenca Golfo de México. Nuestra área de estudio se encuentra en el área marina de la cuenca Tampico-Misantla.

1.1 PROYECTO DE EXPLORACIÓN LANKAHUASA

El área Lankahuasa se localiza a lo largo de la litoral Este de México, entre Cabo Rojo y Punta Zempoala, hasta una profundidad de 200 m; geológicamente se encuentra en la cuenca Tampico-Misantla, aunque esta área abarca una porción de la cuenca de Veracruz (Vélez, 2000).

La historia de exploración del área Lankahuasa es muy breve, en el momento que se hizo este trabajo consistía básicamente de un pozo exploratorio (Pozo A, Anexo A1) y de tres campañas sísmicas que en su totalidad cubrieron una distancia de 10,070 km. Los resultados de las primeras dos campañas sísmicas fueron perfiles sísmicos regionales que tenían como objetivo delimitar las unidades cretácicas.

El pozo exploratorio A data de 1975 y tenía objetivos cretácicos, por lo que hay que resaltar que como su objetivo no era la secuencia clástica del terciario, las muestras recolectadas durante la perforación de esta secuencia son de dudosa calidad.

La primera campaña sísmica 2D fue realizada por Digicon en 1989, haciendo líneas con una orientación Este-Oeste y una separación entre ellas de 3 km. Gecko-Prakla-LCT realizó la segunda campaña sísmica 2D en 1994, con una orientación Este-Oeste y una separación entre ellas de 5 km (Anexo B3-B5).

La última campaña sísmica, que es la base de este trabajo, la llevó a cabo Western-LCT en 1999 a unos 30 km de la línea de costa y en la parte central del área Lankahuasa, siendo líneas sísmicas con una orientación Este-Oeste y una separación entre ellas de 5 km. Los datos sísmicos obtenidos fueron procesados de enero a febrero del 2000 por la misma compañía y reprocesados el mismo año para obtener los datos sísmicos en 3D (cubo sísmico) llamados cubo Lankahuasa.

Para la determinación del área a cubrir por esta última campaña, los geólogos se ayudaron de las secciones sísmicas 2D de las campañas previas (Anexo B3-B5) para determinar así que objetivos

querían prospectar. Una de las zonas que sobresalían de las campañas sísmicas 2D era una zona –que posteriormente fue llamada Cuenca Chihuix- que mostraba anomalías sísmicas bien definidas y gran cantidad de estructuras que podrían servir de trampas estructurales y estratigráficas. La estructura más sobresaliente en el área de la Cuenca Chihuix es un graben relativamente simétrico que está asociado con un *rollover* (formado por la Falla Lítrica y la Falla Antitética), cortando la secuencia terciaria abruptamente y marcadamente aumentando la cantidad de reflectores que se encuentran dentro de este graben, asociados a un mayor cantidad de estratos y con un mayor espesor de ellos en comparación con aquellos en la parte externa.

Al principio, la génesis y evolución de la Cuenca Chihuix no fue bien comprendida, ya que existen en la literatura pocos ejemplos de estructuras con estas características, por lo que no existen modelos estructurales ni estratigráficos en México, que se conjuguen para explicar las causas y los procesos que interactuaron para darnos la configuración actual.

1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA

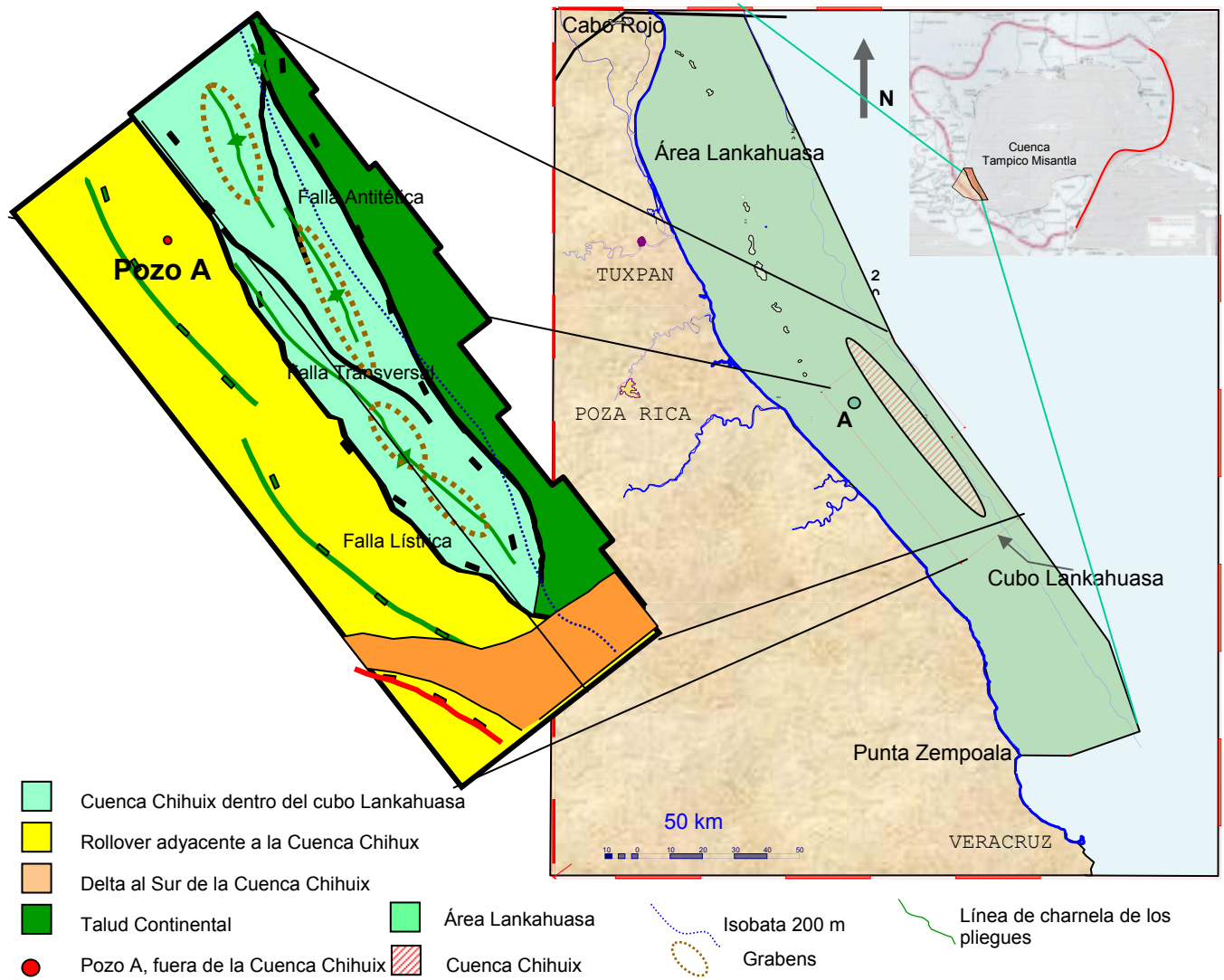


Figura 1. Ubicación del área Lankahuasa (en verde fuerte) que va desde Punta Zempoala en el Sur hasta Cabo Rojo en el Norte, dentro de la Cuenca Tampico-Misantla (en rojo) en el Golfo de México. Dentro del área Lankahuasa se encuentra la Cuenca Chihuix (en rallado rojo). PEMEX realizó una campaña sísmica 3D y una buena parte de esta abarcaba a la Cuenca Chihuix y resultado de esta se generó el cubo Lankahuasa. Dentro del área Lankahuasa se halla el Pozo A que sirvió para encontrar los niveles estratigráficos de interés para PEMEX y de esta forma ubicar los marcadores que servirían de base para hacer una correlación dentro del área Lankahuasa y en especial dentro de la Cuenca Chihuix. La Cuenca Chihuix (en verde claro) está delimitada por dos fallas normales (falla lística y antitética); afuera de la Cuenca Chihuix, rumbo a la costa, se halla un rollover (en amarillo) y se ha interpretado que es previo a la formación de la Cuenca Chihuix y hacia el Este está el talud continental (verde oscuro), al Sur se halla un delta (en amarillo fuerte) (figura compuesta de Aranda 2000 y Vélez 2000).

La Cuenca Chihuix se localiza completamente en el área marina del Golfo de México, dentro de lo que se ha dado en llamar área Lankahuasa (Figura 1). En la superficie, el borde Oeste de la Cuenca Chihuix se localiza a una distancia aproximada de 30 km de la costa del Estado de

Veracruz, el borde Norte está delimitado por la paleoplateforma de Tuxpan, el borde Sur está delimitado por la cuenca de Veracruz y el borde Este se haya sobre el borde de la Plataforma Continental. Las coordenadas de esta cuenca están entre: 20° 00' y 21° 30' de latitud Norte y entre 96° 20' y 96° 35' de longitud Oeste.

El área Lankahuasa (Figura 1) se localiza a lo largo de la litoral Este de México, entre Cabo Rojo y Punta Zempoala, hasta una profundidad de 200 m; geológicamente se encuentra en la Cuenca Tampico-Misantla, aunque Lankahuasa abarca una porción de la cuenca de Veracruz (Vélez, 2000) (Figura 2).

La Cuenca Tampico-Misantla (Figura 2, Figura 3) queda comprendida dentro de la planicie costera del Golfo de México entre el Frente Tectónico de la Sierra Madre Oriental al Oeste, la isobata 200 metros del Golfo de México al Este y entre los elementos paleogeográficos de la isla de Tantimas al Norte y la de Santa Ana al Sur (Salvador, 1991). El Departamento de Proyectos Marinos del activo de exploración Misantla-Golfo de México ha dividido la parte marina de la Cuenca Misantla (Figura 2) en tres partes: el área Tuxpan, el área Lankahuasa y el área Cañonero. La Cuenca Misantla se ubica dentro de la provincia fisiográfica marina llamada Plataforma del Este de México (Figuras 2).

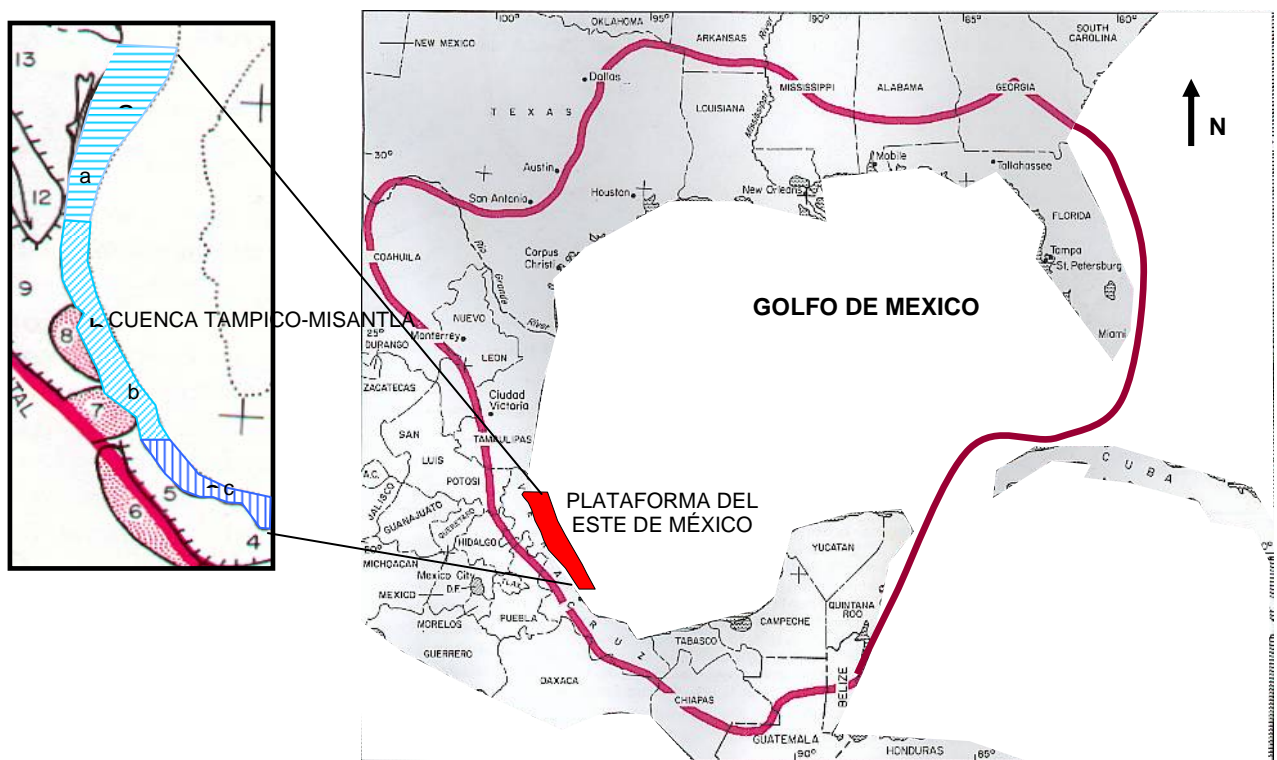


Figura 2. Elementos geológicos de la Plataforma del Este de México en el Golfo de México. (a) La plataforma perteneciente a la Bahía del Río Bravo (la Cuenca Burgos). (b) Cuenca estructural Tampico-Misantla. (c) Cuencas estructurales de Veracruz y el Istmo (Salvador, 1991).

La Plataforma del Este de México (Figura 2) se localiza en la parte Oeste de la cuenca del Golfo de México, constituye la plataforma Este de la República Mexicana y es la plataforma más

estrecha del Golfo de México. La Plataforma del Este de México está compuesta por tres elementos geológicos: 1) al Norte de la latitud 22°45' N, la plataforma pertenece a la Bahía del Río Bravo (la Cuenca Burgos) (Figura 2a); 2) entre las latitudes 22°45'N a 20°N pertenece a la Cuenca estructural Tampico-Misantla (Figura 2b); 3) al Sur de la latitud 20°N, esta área está dentro de las cuencas estructurales de Veracruz y del Istmo (Figura 2c) (Salvador, 1991).

1.3 OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es comprender el origen y evolución estructural tanto en el espacio como en el tiempo de la Cuenca Chihuix. La Cuenca Chihuix es una cuenca formada por un sistema de falla de crecimiento/rollover que es característico del Golfo de México. La Cuenca Chihuix es un ejemplo de cómo un sistema estructuralmente activo durante un periodo corto de tiempo crea el espacio necesario para una gran acumulación de sedimentos y estos al mismo tiempo generan la carga suficiente para mantener activo a ese sistema.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Ya que PEMEX posee el monopolio de la exploración, el grado de avance de sus proyectos están en relación directa con el grado de avance de la exploración en México, por lo que en ella recae la obligación de desarrollar todo el potencial petrolero del país; así este trabajo de exploración se justifica por varias razones: de tipo económicas, científicas y sociales.

1.4.1 RAZONES ECONÓMICAS

Se consideraron tres razones económicas principales, estas son:

La primera razón, se debe a los diferentes tipos de indicios geológicos y petrolíferos existentes en las zonas aledañas al área de este estudio; los geólogos de PEMEX analizaron y comprendieron que existe un gran potencial para grandes yacimientos de hidrocarburos en las formaciones terciarias. Estos indicios son suficientemente buenos para llevar a cabo una exploración a detalle, usando las técnicas exploratorias más avanzadas que nos ayuden a estimar todos los posibles reservorios que se han formado en la secuencia terciaria.

La segunda razón, es que este país requiere cada año una mayor cantidad de energía y entre las fuentes de esta energía se encuentra el gas natural y el petróleo. Dado que los niveles de producción actuales son insuficientes para cubrir la demanda interna de gas, ya sea por la falta de un aumento en las reservas probadas de estos energéticos; el poco desarrollo de sus campos petroleros, el no poseer la tecnología suficiente para su extracción o porque no se tienen los suficientes recursos económicos para su inversión, México se ha vuelto un país deficitario de gas natural, teniendo que importar un 30 por ciento del gas para su consumo interno, siendo Estados Unidos nuestro principal abastecedor y dentro de éste sobresale el mercado tejano, ya que es el que más aporta de energéticos para cubrir nuestras necesidades. Dado que el mercado tejano es el mercado que posee los precios más altos por BTU (unidad térmica británica), estos precios más elevados hacen que el precio del gas natural en México sea de los más altos del mundo, pudiendo producirse en los yacimientos mexicanos a un precio mucho menor.

La tercera razón, es la ubicación de México, ya que al estar junto al mercado consumidor de gas natural más grande del mundo y ofrecer por éste los precios más altos, sería un enorme atractivo económico poder venderles todos los excedentes de gas natural, pasando de ser un importador de gas natural a un exportador.

1.4.2 RAZONES CIENTÍFICAS

De las razones científicas podemos hablar de la necesidad de exploración en nuestra zona económica exclusiva, ya que ha sido poco explorada, y al ser parte de nuestro territorio se vuelve estratégico aumentar su conocimiento. La siguiente razón es la explicación de la génesis y evolución de este borde de plataforma continental, ya que su historia a sido poco explicada y solamente se han recopilado datos regionales que podrían suponer un modelo general para la cuenca del Golfo de México, pero los datos más locales sobre las subcuencas de ésta son poco conocidos.

1.4.3 RAZONES SOCIALES

Otra ventaja es la situación geográfica de la región, ya que por sus condiciones climáticas, topográficas y sociales, se combinan para permitir un bajo costo de extracción y transporte de los hidrocarburos. Otra de las ventajas es la infraestructura ya presente cerca de esta zona, como el gasoducto Cactus-Reynosa, el cual está situado cerca del yacimiento, por lo que el nivel de inversión para complementarla sería muy bajo; además los centros de consumo de gas dentro del país no se encuentran muy lejanos (ejemplo la ciudad de México, Monterrey, Tampico) y en un futuro esta misma infraestructura podría servir para la exportación, ya que la frontera con Estados Unidos tampoco está muy lejana y ya existe una conexión entre sus gasoductos y los nuestros.

1.4.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

Una de las razones principales por las que se realizó este trabajo, fue el comprender cuales fueron las causas que originaron a la Cuenca Chihuix; así como su evolución estructural en el tiempo y todos los posibles procesos tectónicos que dieron origen a la formación de esta estructura. Hay que mencionar sin embargo, que se tienen muy pocos datos de pozos para corroborar todas las posibles hipótesis que plantea esta tesis, la sísmica que se posee de la región no es a detalle, y la poca que se tiene a detalle está muy localizada; así que todos los resultados obtenidos provienen de dos campañas sísmica regionales 2D que tenía objetivos cretácicos y de una sísmica 3D que sí tenía objetivos terciarios, pero que no podía abarcar toda la estructura.

1.5 TRABAJOS PREVIOS

Los trabajos específicos del área fueron realizados por PEMEX Exploración Producción (PEP), por lo que son reportes internos que a continuación se describen:

“Estudio bioestratigráfico de los foraminíferos del pozo A” por Margarita Riojas en 1999. Es un estudio paleontológico inédito de PEMEX que sirvió para fechar las secuencias sedimentarias de la columna terciaria de las muestras de canal del Pozo A (1975).

“Reporte petrológico del pozo A” por Pedro Vázquez en 2000. Es un estudio petrográfico inédito de PEMEX de las muestras de canal del Pozo A. Este estudio nos ha dado información de las características de composición, texturales y de porosidad de los líticos del área; así como la evolución textural en la columna estratigráfica terciaria.

“Estudio bioestratigráfico y paleoecológico en detalle del nanoplancton del pozo A” por Joel Rodríguez en 2000. Es un estudio paleontológico inédito de PEMEX de las muestras de canal del Pozo A, en el cual se estudia la bioestratigrafía y la paleoecología del área, usando nanofósiles calcáreos.

“Importancia de los sistemas progradantes en la exploración del proyecto Lankahuasa activo Misantla-Golfo de México” por Román Sánchez en 2000. Es un estudio estratigráfico inédito de PEMEX de las plataformas progradantes en la parte Oeste del Golfo de México.

“Potencial gasífero de los *plays* terciarios de la plataforma continental del activo Misantla-Golfo de México” por Daniel Vélez en 2000. Es un estudio inédito del sistema petrolero de PEMEX en el área Lankahuasa.

“Geología Estructural y potencial gasífero en el cubo Lankahuasa” por Mario Aranda en 2000. Es un estudio inédito de la geología estructural regional y de la ubicación de las áreas de prospección de gas en el cubo Lankahuasa.

1.6 METODOLOGÍA

Para este trabajo se decidió estudiar solamente la parte estructural de la Cuenca Chihuix. La manera en que este trabajo se desarrolló fue la siguiente:

-Recopilación y análisis de la información.- se recopiló y analizó información bibliográfica existente sobre la geología del área de estudio, desde perfiles sísmicos 2D así como de pozos aledaños al área de estudio. La Cuenca Chihuix puede ser considerada un área completamente nueva en la exploración, ya que estos son los primeros estudios que se llevan a cabo en esta cuenca; sin embargo, el área Lankahuasa ha sido estudiada en los últimos años con datos sísmicos 2D y en el momento en que se escribió esta tesis, la única información de un pozo era la del Pozo A (Figura 1, Anexo A1). Existen también algunos estudios regionales que se utilizaron como base para la comprensión de esta cuenca.

El proceso de recopilación permitió tener una visión general sobre el área de trabajo, haciendo una breve revisión de las bases estratigráficas y paleontológicas que han servido de marco para comprender la evolución estructural de esta cuenca. El proceso de análisis permitió tener conocimiento, sobre todo, de los fundamentos y metodologías a utilizar en el desarrollo del objetivo principal de este trabajo. El proceso anterior tuvo lugar conforme al avance mismo del trabajo.

-Trabajo sobre papel.- el primer paso antes de comenzar la interpretación de la sísmica 3D, es hacer una interpretación de la sísmica 2D; así que se interpretaron dos perfiles regionales que atraviesan la Cuenca Chihuix en la parte Central y Norte (Anexo B4, B5); así como un perfil que

se encontraba al Sur, fuera de la cuenca (Anexo B3). Para ello se contó con el apoyo del jefe de Proyectos Marinos, el Dr. Mario Aranda, del Ing. Vélez y del Ing. Román Sánchez quienes hicieron una breve explicación de los rasgos geológicos que ellos ya habían interpretado de la región Lankahuasa y teniendo como marco general esas interpretaciones; el trabajo consistió en hacer una interpretación lo más detallada posible de la estructura llamada Cuenca Chihuix.

El trabajo de interpretación consistió en tratar de seguir ciertos reflectores que representan una edad determinada (en el caso de la Cuenca Chihuix del Plioceno Inferior y del Plioceno Superior) y correlacionarlos dentro de la cuenca, teniendo en cuenta especial cuidado en las discontinuidades causadas por las zonas de fallas.

-Trabajo sobre la computadora.- El cubo Lankahuasa tiene un área en planta de 1760 km². Las *inlines* (líneas en el sentido de la adquisición) están separadas cada 50 m y las *crosslines* (líneas perpendiculares a las *inlines*) tienen una separación de 25 m. Durante el procesado de la información se hizo una interpolación de las *inlines* así como de las *crosslines* y se redujo el espaciamiento a solo la mitad, por lo que la distancia en la base de datos entre *inlines* es de 25 m y entre *crosslines* es de 12.5 m; así como las *timeslices* (secciones en tiempo) fueron cada 20 milisegundos.

Para realizar la interpretación de estos datos se utilizó un programa del módulo de GeoQuest-Schlumberger, llamado Charisma (versión 3.08), el cual permite visualizar los datos 3D en secciones generadas por el mismo paquete: *crosslines*, *inlines*, *timeslices*; que además tiene la versatilidad de mostrar secciones diseñadas por el intérprete (*randomlines*).

Otro paso importante es ver como fue hecha toda la adquisición y el procesado de los datos sísmicos, para saber que criterios fueron los que usó el geofísico que maneja la información presentada en forma de perfiles sísmicos.

Debido a la gran densidad de información sísmica 3D y a la complejidad estructural y estratigráfica del área Lankahuasa, se decidió hacer los análisis de las secuencias sísmicas y estructurales por cada 10 *inlines* (250 m), cada 10 *crosslines* (125 m), y cada 5 *timeslices* (100 milisegundos). Dado que la Cuenca Chihuix cubre alrededor de 2600 *inlines* (65,000 m) con dirección E-W y 1100 *crosslines* (13750 m) con dirección N-S, se interpretaron solamente 260 *inlines* y 110 *crosslines*; además de otras secciones con direcciones aleatorias para cerrar la interpretación del volumen dentro del cubo. En este trabajo se presenta la información más sobresaliente en cada uno de los sentidos, ya sea cada 100 *inlines* (2500 m) o cada 100 *crosslines* (1250 m) y cada 50 *timeslices* (500 milisegundos) (Anexos C10-C21, D6-D12, E3-E6).

Aunque los datos sísmicos muestran que el aspecto estructural es bastante complejo, se logró bosquejar el patrón estructural principal que formó la cuenca y se describe un origen para cada uno de los elementos estructurales en un marco evolutivo coherente.

II MARCO GEOLÓGICO

La cuenca del Golfo de México (1,500,000 km²) es una cuenca aproximadamente circular de 1,500 km de diámetro, rellena en su parte más profunda con rocas sedimentarias de 10 a 15 km de espesor y que tienen edades que van desde el Triásico Tardío hasta el Holoceno, está ocupada en su parte central por el Golfo de México (Figura 3). Los límites de esta cuenca son principalmente estructurales, al Este limita con la Plataforma carbonatada de Florida y el océano Atlántico, al Sur limita con la Plataforma carbonatada de Yucatán, al Oeste limita con el Macizo de Chiapas, la Sierra Madre Oriental y el borde oriental de la Plataforma de Coahuila, al Norte limita con el levantamiento Marathon, el cinturón orogénico Ouachita, las montañas Ouachita, el cinturón deformado del Mississippi Central y los montes Apalaches (Salvador, 1991).

El conocimiento de la geología histórica de la cuenca del Golfo de México es bueno a partir del Triásico Tardío, ya que la información recabada anterior a ese tiempo es muy poca y está muy dispersa, por lo que es difícil hacer una correlación tanto en el tiempo como en el espacio. Su historia geológica comienza en el Triásico Tardío, con una etapa de rift dentro de la placa Norteamericana en dirección Este-Oeste y al mismo tiempo el rompimiento y separación de la placa Africana y Sudamericana. Este proceso de rift continúa en el Jurásico Temprano y Medio, con el correspondiente estrechamiento de la corteza continental y la entrada al Oeste del mar (Jurásico Medio) y la formación de depósitos de sal. Posteriormente el principal episodio de deriva ocurrió en el Jurásico Tardío con la separación de la placa Norteamericana y el movimiento de la península de Yucatán hacia el Sur y creación de corteza oceánica en el centro de la cuenca (Salvador, 1991).

A partir del Jurásico Tardío la cuenca ha sido una provincia geológica estable, caracterizada por la continua subsidencia en su parte central, probablemente debido al enfriamiento y a la posterior carga sedimentaria por el relleno de gruesas cuñas progradantes clásticas a lo largo de sus márgenes Noroeste y Norte. Al Este, la estable Plataforma de Florida no fue cubierta por el mar hasta finales del Jurásico o comienzos del Cretácico. La Plataforma de Yucatán permaneció emergida hasta mediados del Cretácico; posteriormente ambas plataformas fueron sumergidas y hubo formación de carbonatos y evaporitas (Salvador, 1991).

La mayor parte de la cuenca durante el Cretácico Temprano estuvo circundada por plataformas carbonatadas. El flanco occidental durante finales del Cretácico y principio del Terciario estuvo envuelto en un episodio de deformación compresiva (Orogenia Laramídica), el cual creó la Sierra Madre Oriental al Este de México (Salvador, 1991).

Durante el Terciario, como resultado de la deformación laramídica hubo una gran aportación de materiales que fueron rellenando esta cuenca, en su mayor parte formaron cuñas clásticas progradantes aunque todavía muchas de estas cuñas fueron impactadas por las últimas etapas de la deformación laramídica. También continúan la formación de secuencias carbonatadas en los bordes de la cuenca del Golfo de México.

A partir del Mioceno hasta el Holoceno la cuenca del Golfo de México continuó con una constante acumulación de sedimentos dentro de sus márgenes, llegando alcanzar las columnas sedimentarias un espesor de 5,000 m, por lo nos habla de una fuerte y rápida subsidencia dentro

de la cuenca, asociado a una rápida extensión cortical originada posiblemente afectada por la expansión del Atlántico.

A continuación mencionaré cuales son los principales elementos fisiográficos en los que pueden identificarse en la cuenca del Golfo de México.

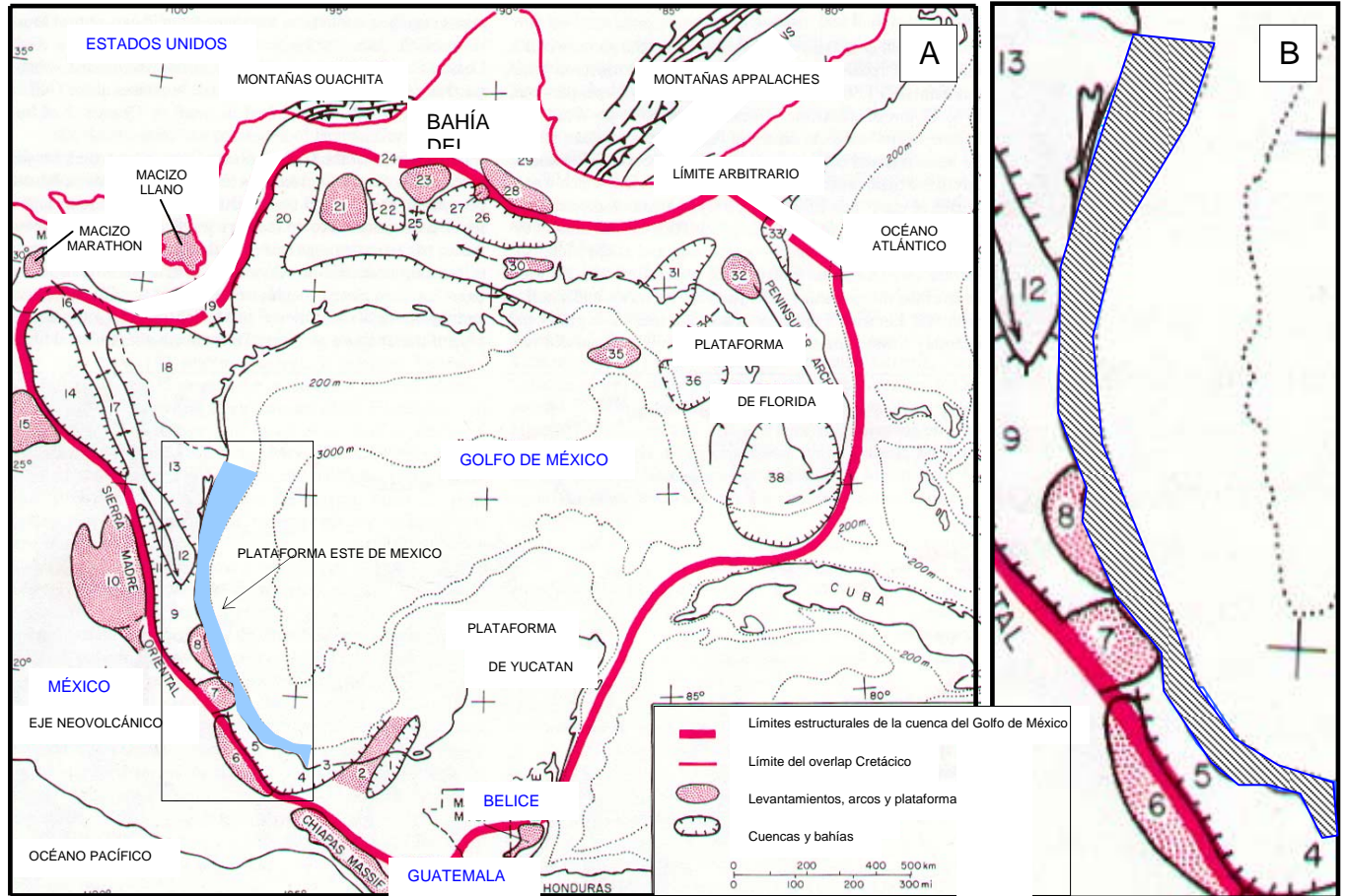


Figura 3. (A) Extensión de la cuenca del Golfo de México (círculo rojo) que comprende al Golfo de México, la parte sudeste los Estados Unidos, la parte Norte, Este y Sur de México, parte de Guatemala y de Belice. Las estructuras de segundo orden limítrofes o dentro de la cuenca son: 1, Cuenca Macuspana; 2, Levantamiento de Villahermosa; 3, Cuenca Comalcalco; 4, Cuenca Istmo Salina; 5, Cuenca Veracruz; 6, Plataforma de Córdoba; 7, Macizo de Santa Ana; 8, Plataforma de Tuxpan; 9, Cuenca Tampico-Misantla; 10, Plataforma Valles-San Luis Potosí; 11, Cuenca Magiscatzin; 12, Arco de Tamaulipas; 13, Cuenca Burgos; 14, Cuenca Sabinas; 15, Plataforma de Coahuila; 16, Levantamiento El Burro; 17, Arcos Peyotes-Picachos; 18, Bahía del Río Bravo; 19, Arco de San Marcos; 20, Cuenca Este de Texas; 21, Levantamiento Salinas; 22, Cuenca Salada Norte de Louisiana; 23, Levantamiento Monroe; 24, Cuenca Desha; 25, Arco La Salle; 26, Cuenca Salada Mississippi; 27, Domo Jackson; 28, Cinturón Deformado del Mississippi Central; 29, Cuenca Black Warrior; 30, Levantamiento Wiggins; 31, Bahía de Apalachicola; 32, Levantamiento Ocala; 33, Bahía del Sudeste De Georgia; 34, Arco Middle Ground; 35, Plataforma del Sudeste; 36, Bahía De Tampa; 37, Arco Sarasota; 38, Cuenca Sur de Florida. (B). Plataforma del Este de México, como podemos observar la proporción de su longitud entre su anchura es grande y abarca varios de los rasgos fisiográficos antes mencionados (Salvador, 1991).

La cuenca del Golfo de México esta dividida en provincias fisiográficas terrestres y marinas (Salvador, 1991). La provincia marina de la Plataforma del Este de México (Figura 2, Figura 3B) corre de Norte a Sur, desde los 20°N hasta los 22°45'N, es una franja estrecha que posee unos cuantos kilómetros de ancho y uno de los rasgos fisiográficos que contiene es la Cuenca Tampico-Misantla (Figura 3A) (en una área de esta cuenca se está realizando un trabajo intenso de exploración); además hay que mencionar los otros rasgos principales de la cuenca del Golfo de México: cuenca Macuspana, Levantamiento de Villahermosa, Cuenca Comalcalco, Cuenca Istmo Salina, Cuenca Veracruz, Plataforma de Córdoba, Macizo de Santa Ana, Plataforma de Tuxpan, Plataforma Valles-San Luis Potosí, Cuenca Magiscatzin, Arco de Tamaulipas, Cuenca Burgos, Cuenca Sabinas, Plataforma de Coahuila, Levantamiento El Burro, Arcos Peyotes-Picachos, Bahía del Río Bravo, Arco de San Marcos, Cuenca Este de Texas, Levantamiento Salinas, Cuenca Salada Norte de Louisiana, Levantamiento Monroe, Cuenca Desha, Arco La Salle, Cuenca Salada Mississippi, Domo Jackson, Cinturón Deformado del Mississippi Central, Cuenca Black Warrior, Levantamiento Wiggins, Bahía de Apalachicola, Levantamiento Ocala, Bahía del Sudeste de Georgia, Arco Middle Ground, Plataforma del Sudeste, Bahía de Tampa, Arco Sarasota, Cuenca Sur de Florida (Salvador, 1991) (Figura 3A)

2.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA CUENCA TAMPICO-MISANTLA

La Cuenca Tampico-Misantla (Figura 4 y Figura 5) se extiende desde el Macizo de Santa Ana hasta el Arco de Tamaulipas y el homoclinal de San José de las Ruisas al Norte de Tampico. La cuenca está limitada al Oeste por la Sierra Madre Oriental y al Este en la Plataforma Continental hasta una profundidad de 200.

La evolución tectónica de la Cuenca Tampico-Misantla (Salvador, 1991) (Figura 4) comienza a inicios del Cretácico Tardío, donde un amplio mar se extendía desde el océano Pacífico hasta la región del Golfo de México la cual comenzó a ser restringida por el levantamiento de bloques a lo largo de la margen del Pacífico. Este levantamiento tuvo una evolución hacia el Este y terminó durante el Plioceno y Eoceno Temprano, con la formación de la Sierra Madre Oriental al Este de México. Esta orogenia (Laramide) plegó, falló, y levantó la sección carbonatada Mesozoica (Cinturón Plegado Cordillerano) y creó el complejo de fallas y pliegues de la Sierra Madre Oriental; cerrando la comunicación entre el océano Pacífico y el Golfo de México y creando la Cuenca Tampico-Misantla. Además existían bloques de basamento al Este, los cuales se extendían desde el Arco de Tamaulipas hasta la Plataforma de Tuxpan.

La evolución sedimentaria está gobernada por un levantamiento intermitente al Oeste, y una progresiva subsidencia e inclinación en el Este. La relación entre el mar y la tierra es inestable, y está determinada por la alternancia de ciclos transgresivos y regresivos. La columna estratigráfica está compuesta por areniscas, lutitas, conglomerados y raramente por calizas arrecifales. En el Terciario Tardío hay intrusiones de rocas ígneas. La columna estratigráfica Cenozoica fue depositada en medios que varían de nerítico a batial y el espesor de la columna estratigráfica está en el rango de los 6000 m.

El levantamiento de la Sierra Madre Oriental al final de Cretácico creó un sistema de drenaje fluvial que transportó grandes volúmenes de sedimentos de grano fino (Formación Velasco Basal,

Paleoceno Temprano) y se depositaron en aguas profundas en la parte Sur de la cuenca (Cuenca Chicontepec).

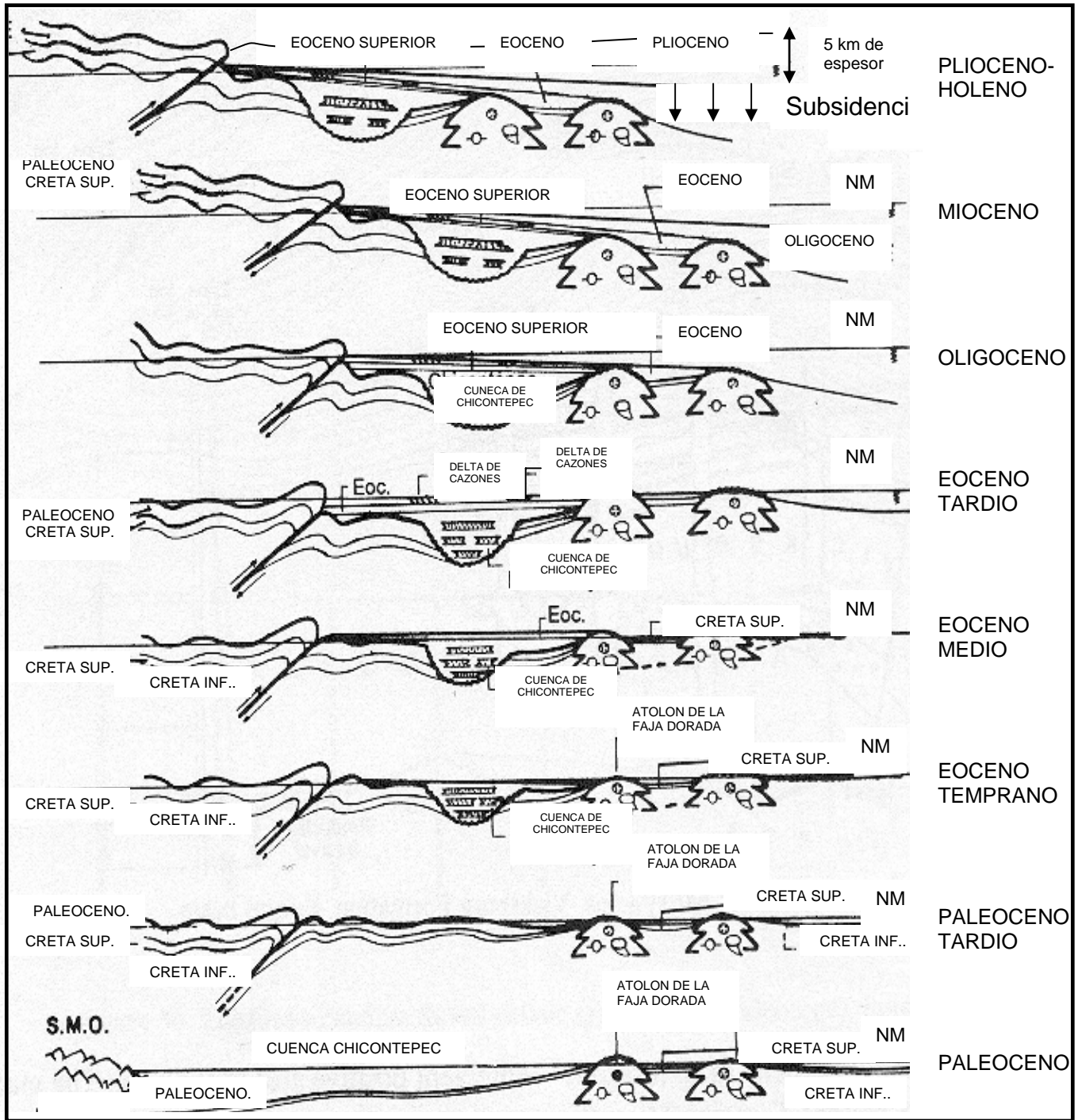


Figura 4. Evolución tectónica de la Cuenca Tampico-Misantla (Salvador, 1991).

En el resto del Paleoceno hubo dos tipos de sedimentación: el primero al Sur y al Este con sedimentos arcillosos con fauna de aguas profundas (Formación Velasco) y el segundo al Norte y Oeste con una alternancia de areniscas y lutitas en una secuencia turbidítica, con asociaciones faunísticas de aguas profundas y someras. Esta relación de litofacies sugiere la formación de una cuenca de antepaís (*foreland*) en el Noroeste de la cuenca.

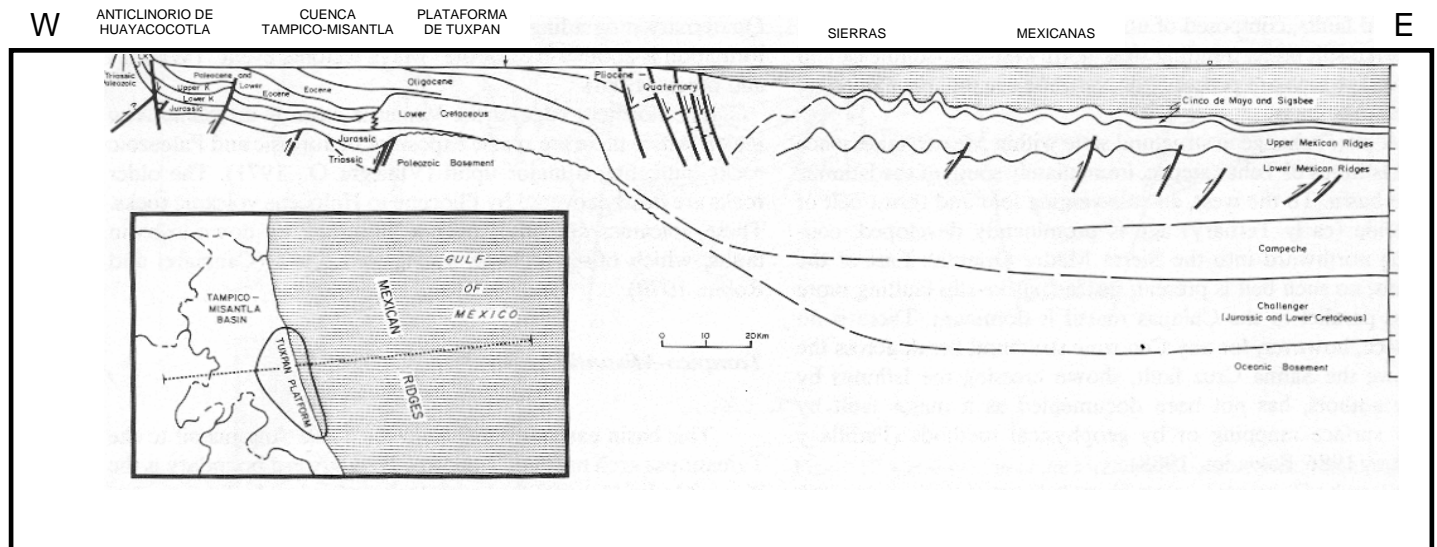


Figura 5. Sección regional WE en la Cuenca Tampico Misantla, mostrando la estructura de los elementos más importantes (Salvador, 1991).

Al fin del Paleoceno, la parte Sur fue levantada para formar el Macizo de Santa Ana (Teziutlán). Los sedimentos producto de la erosión de la columna mesozoica se depositó en canales y cañones submarinos. Se desarrolla la Cuenca Chicontepec como una cuenca sintectónica. En el Eoceno Temprano estos paleocañones fueron rellenos con sedimentos clásticos (secuencia *flysh*) traídos de las tierras altas de la Plataforma de Tuxpan al Este. Fuera de los cañones, hay depósito de lutitas de aguas profundas de las Formaciones Guayabal (Eoceno Medio) y Aragón.

Los últimos episodios de plegamiento y fallamiento de la orogenia Laramide, a mediados del Eoceno, dan la forma final a la Sierra Madre Oriental, dando como resultado una secuencia molásica de la Formación Tantoyuca, la cual incluye los complejos deltaicos de la Formación Cazones y la Formación Tecolutla. Hacia el Este la Formación Tantoyuca prograda a un paquete arcilloso de aguas profundas de la Formación Chapopote.

El levantamiento de la Sierra Madre Oriental durante el Oligoceno dio como resultado un nuevo aporte de sedimentos clásticos en la parte Oeste de la cuenca. Gruesas cuñas clásticas fueron depositadas en aguas poco profundas (Formaciones Palma Real Superior y Mesón) que cambiaban progresivamente hacia el Este a lutitas de aguas profundas (Formación Alazán).

Durante el Oligoceno Tardío hubo una transgresión y en el Mioceno Temprano ocurrió de nuevo una regresión (Formaciones Coatzintla, Escolin, Tuxpan) y posteriormente en el Mioceno Tardío hubo una transgresión (Formación Tuxpan).

Después de la transgresión del Mioceno, la cuenca fue afectada por una suave pero continua emergencia de las aguas del Golfo de México hacia el Este. El depósito durante el Plioceno y Cuaternario ha sido restringido a la actual plataforma y talud continental.

2.2 BIOESTRATIGRAFÍA Y LITOESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA TAMPICO-MISANTLA

Ya que los cuerpos de terrígenos dentro de la cuenca son discontinuos, la correlación utilizando la litología es imposible; por lo que el estudio de ésta se hace con base en una bioestratigrafía detallada, que es de mayor utilidad. Para la elaboración de la columna bioestratigráfica se utilizaron sobre todo foraminíferos planctónicos y nanofósiles. A continuación se describen las biozonas y las litofacies en cada época (Salvador, 1991).

El límite Cretácico/Paleoceno es fácilmente marcado por el cambio de Margas con globotruncánidos.

Las biozonas del Paleoceno Inferior son: *Globigerina eugubina*, *Globigerina pseudobulloides*, y *Globorotalia trinidadensis*; estas biozonas son diagnósticas de los sedimentos arcillosos, de aguas profundas de la Formación Velasco Basal. Las biozonas del Paleoceno Medio son: *Globorotalia uncinata* y *Globorotalia pusilla pusilla*; teniendo como litofacies: lutitas de aguas profundas (Formación Velasco) con abundantes foraminíferos planctónicos y la secuencia turbidítica con intercalaciones de lutitas, areniscas y conglomerados (Formación Chicontepec). Los fósiles del Paleoceno Tardío son: *Globorotalia pseudomenardii* y *Globorotalia velascoensis* y presentes en las Formaciones Velasco Medio y Chicontepec Medio.

Las fósiles del Eoceno Inferior son: *Globorotalia rex*, *Globorotalia formosa formosa* y *Globorotalia palmerae*; teniendo como litofacies: lutitas de aguas profundas (Formación Velasco Superior) y la secuencias de lutitas-areniscas-conglomerados en medios turbidíticos (Formación Chicontepec Superior). En la parte tardía del Eoceno Inferior tenemos los fósiles: *Globorotalia aragonensis* y *Hantkenina aragonensis* asociada con *Globorotalia collatea* y *Globigerina soldadoensis* y se encuentran en litofacies de lutitas de aguas profundas. Las cuatro biozonas del Eoceno Medio son: *Globigerinatheka subconglobata* hasta la *Truncorotaloides rohri*; teniendo como litofacies: lutitas arenosas de un medio tranquilo y profundo (Formación Guayabal). Las biozonas del Eoceno Tardío son: *Globorotalia cerroazulensis* (Formación Chapopote), y los fósiles son: *Hantkenina alabamensis*, *Globorotalia centralis*, *Globigerapsis semiinvolute*; *Operculina sp.* y *Lepidocyclina sp.* bentónicos (Formación Tantoyuca); teniendo como litofacies: lutitas conteniendo abundante microfauna de aguas profundas (Formación Chapopote) y una alternancia de conglomerados, areniscas y lutitas con grandes foraminíferos y de aguas someras.

La extinción de la *Globorotalia cerroazulensis* y de la *Hantkenina alabamensis* marca la base del Oligoceno. Los fósiles del Oligoceno temprano son: *Rotalialina mexicana* (Formación Horcones), *Globigerina parva*, *Cassigerinella chipolensis* y *Pseudohastigerina micra*, todos diagnósticos de la biozona *Globigerina ampliapertura*; teniendo como litofacies lutitas de aguas profundas, caparazones de globigerínidos y areniscas (Formaciones Palma Real Inferior y Horcones). Las biozonas del Oligoceno Tardío son: *Globorotalia opima opima* y *Globigerina ciperoensis*; teniendo tres litofacies: areniscas en estratificación gruesa (Formación Mesón) ricas en *Lepidocyclina sp.*,

colenterados, equinodermos, y moluscos depositados en un ambiente de aguas someras; lutitas arenosas, areniscas y ocasionalmente calizas arrecifales (Palma Real Superior) depositadas en aguas algo profundas y detrás de la Formación Mesón en dirección de la cuenca; lutitas de aguas profundas (Formación Alazán).

Los fósiles del Mioceno Temprano son: *Catapsydrax sp.*, *Globigerina rohri*, *Globigerinoides triloba altiapertura*, *Globigerina ciperoensis angustiumbilitata* y abundantes especímenes de *Siphogenerina sp.* y *Uvigerina sp.*; teniendo como litofacies: secuencia de areniscas y lutitas (Formaciones Tuxpan y Coatzintla). Las biozonas del Mioceno Medio y Tardío son: *Globorotalia foshi*, *Globorotalia mayeri*, *Globorotalia menardii* y *Globorotalia acostaensis*; teniendo como litofacies: intercalaciones de lutitas y areniscas (Formación Tuxpan Medio y Superior), y areniscas con lutitas arenáceas con ocasionales intercalaciones de conglomerados (Formación Escolín).

III GENERALIDADES SOBRE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN

La sísmica de reflexión es un método de exploración que consiste en generar una perturbación sísmica en la superficie y de registrar tiempo después las ondas reflejadas de las interfaces geológicas que responden a esta perturbación. Esto con el fin de trazar las estructuras que se encuentran en el subsuelo (Lavergne, 1989).

Para llevar a cabo la sísmica de reflexión, es necesario que el sistema comprenda de un dispositivo de emisión, un dispositivo de adquisición y un sistema de registro numérico. Estos dispositivos son diferentes en la adquisición marina y terrestre (Lavergne, 1989). La sísmica de reflexión marina (propia de este trabajo) se realiza por medio de un barco que arrastra a una velocidad constante de 4 nudos o 2 m/s el dispositivo de emisión y a una cierta distancia el dispositivo de adquisición (Lavergne, 1989).

El dispositivo de adquisición marina consiste de un tubo flexible (*streamer*) de 2400 metros de largo donde se colocan hidrófonos ordenados en grupos de diez o más (para aminorar el ruido) a lo largo de éste y están conectados a un canal sísmico, donde el centro de cada grupo es llamado traza y cada traza tiene una separación de 25 metros; así que en 2400 m el número trazas es 96 (Lavergne, 1989).

El dispositivo de emisión genera una onda sísmica cada 12.5 segundos. Los tipos de dispositivos de emisión marinos son explosivos (ya no utilizados), cañón de aire (que genera una burbuja de aire que implosiona en el agua), cañones de vapor, cañones de agua (sin efecto burbuja como en el cañón de aire) y los *sparkers* (chisperos) generan una descarga eléctrica (Lavergne, 1989).

El sistema de registro numérico consiste principalmente de preamplificadores y filtros analógicos, un multiplexor, un amplificador de control de ganancias, un convertidor analógico a digital, un formateador, una unidad de grabación y un sistema de respaldo (Lavergne, 1989).

3.1.1 SÍSMICA 3D

Aunque las estructuras del subsuelo son generalmente en tres dimensiones, las secciones en dos dimensiones son consideradas satisfactorias por razones económicas, con perfiles perpendiculares a los planos verticales de simetría de las estructuras. Sin embargo, la geometría del subsuelo es tal que la traza de los rayos sísmicos se aparta del plano vertical del perfil sísmico y las secciones obtenidas en 2D pueden ser erróneas. Otro problema es que las estructuras no poseen un plano vertical de simetría. Entonces es cuando es necesario proceder con la sísmica 3D (Lavergne, 1989).

El método más utilizado consiste en registrar una serie de perfiles paralelos a intervalos de 100 a 200 m desde un mismo barco. En la práctica las corrientes marinas generan una deriva al final de cada uno de los *streamer* de más de 100 metros, por lo que cada *streamer* debe tener una brújula para medir la deriva; así una computadora a bordo calcula la posición de cada uno de los hidrófonos en cualquier momento.

3.2 ESTRATIGRAFÍA SÍSMICA

La Estratigrafía Sísmica es una técnica para interpretar la información estratigráfica de los datos sísmicos. Un principio fundamental de la Estratigrafía Sísmica es:

“Dentro de la resolución del método sísmico, las reflexiones sísmicas siguen las capas sedimentarias gruesas y éstas se aproximan a las líneas de tiempo” (Bertram, 2000).

El axioma establece que las reflexiones pueden ser concebidas como líneas de tiempo las cuales representan superficies en 3D, separando las rocas más viejas de las jóvenes; sin embargo existen algunas excepciones que vale la pena aclarar (Bertram, 2000):

- Refracciones múltiples o reflejadas son subproductos de la física del método y necesitan ser reconocidas como interferencias en el sentido geológico.
- El contacto entre fluidos o cambios diagenéticos (ej. Los reflectores de simulación de fondo generados del cambio de ópalo “A” a ópalo “B”) son reales y representan genuinas superficies de corte (*cross-cutting*) en el sentido cronoestratigráfico.
- Las reflexiones que son características por su baja resolución sísmica con respecto al espesor de las capas muchas ocasiones van a provocar que no sea fácilmente correlacionar el reflector asociado a esa capa dentro del perfil; además si una capa tiene una buena resolución y horizontalmente cambia de espesor, el reflector que generaba ésta puede confundirse o fusionarse con el reflector de otra capa aledaña.

El análisis en términos de la Estratigrafía Sísmica difiere del análisis sísmico clásico, el cual se limita principalmente al estudio estructural de los datos sísmicos y los resultados que nos da están en forma de mapas estructurales y mapas de isopacas; en cambio la Estratigrafía Sísmica no es sólo una técnica descriptiva, sino una técnica que permite la construcción de modelos predictivos los cuales pueden ser comprobados con datos conocidos o con nuevos datos (Bove 2000; Bertram, 2000).

La Estratigrafía Sísmica obtiene de un perfil sísmico los siguientes parámetros o estudios:

- Estudios de discordancias geológicas
- Identificación de diferentes grupos de reflexiones sísmicas
- Paleoambientes de estas unidades
- Energía del medio de depósito

Lo cual nos conduce a interpretaciones en términos de:

- Reconstrucción paleogeodinámica
- Estudio de las variaciones del nivel del mar (análisis estratigráfico secuencial)

Así el análisis de un perfil sísmico nos permite comprender la evolución espacio-temporal de los ambientes de depósito. La interpretación en Estratigrafía Sísmica se compone de dos etapas principales para alcanzar este objetivo:

Análisis de las secuencias sísmica de depósito
Análisis de las facies sísmicas

3.3 ANÁLISIS DE LAS SECUENCIAS SÍSMICAS DE DEPÓSITO

DEFINICIÓN Y SIGNIFICADO ESTRATIGRÁFICO

Una secuencia sísmica de un depósito es una unidad estratigráfica compuesta por un conjunto relativamente uniforme de estratos genéticamente ligados entre sí. Está limitada en su techo y en su base por discordancias o su prolongación en concordancia. Ella constituye el elemento base de estudio para la estratigrafía sísmica. La secuencia sísmica de depósito se determina en función de la forma de las terminaciones de las reflexiones que la constituyen.

Una secuencia sísmica de depósito tiene un significado cronoestratigráfico. Ya que se deposita en un intervalo de tiempo geológico limitado, dado por la edad de las superficies superior e inferior de esta secuencia. El espesor de una secuencia de depósito varía de algunas decenas de metros a varias centenas de metros.

LÍMITES Y FORMAS DE LAS SECUENCIAS DE DEPÓSITO

La definición de una secuencia de depósito está basada en la identificación de los límites que la rodean. Generalmente, estos límites son discordancias, es decir una superficie de erosión o de no-depósito.

La expresión sísmica de estos límites varía fuertemente con los contrastes de impedancia acústica de los medios presentes a ambos lados de la discordancia. El análisis de la secuencia sísmica de depósito transcurre en varias etapas.

- Reconocimiento de la secuencia sísmica de depósito a partir de las superficies de discordancia o sus prolongaciones (Figura 6).
- Correlación de los límites de secuencias hacia todas las otras líneas de la malla sísmica. Esta correlación muestra la extensión de las discordancias mayores y pone en evidencia las variaciones locales.
- Construcción del módulo tridimensional de la secuencia. Cada secuencia sísmica representa una secuencia de depósito con su distribución regional, una cierta geometría de los estratos, su espesor y su historia geodinámica.

Las reflexiones sísmicas no son continuas infinitamente, en donde se terminan de forma consistente definen una sección (y una superficie en 3D), llamada superficie sísmica. El número

de superficies varían dependiendo de su complejidad y en cualquier conjunto generalmente hay varios tipos mayores de superficies sísmicas y muchas otras menores (Bertram, 2000).

Las terminaciones pueden ser caracterizadas dentro de una sección sísmica por la relación geométrica entre la superficie sísmica y la superficie contra la cual terminan. Las terminaciones pueden ser de diferente naturaleza, pero la mayoría se basan en la geometría y algunas envuelven un grado de interpretación; así las podemos clasificar en tres categorías (Bove, 2000; Bertram, 2000):

a) Debidos a las condiciones de depósito:

Discordante en la base: *onlap*, *downlap* (Figura 6).

Discordante en el techo: *toplap*, truncamiento erosional (Figura 6).

b) Los hiatus:

Los hiatus sedimentarios, de no-depósito.

Las superficies de erosión.

c) Las concordancias por definición son terminaciones de reflexiones que no podrán ser fácilmente marcadas porque no presentan geometrías diferentes con respecto a las reflexiones de su alrededor.

A continuación se proporcionan las definiciones del tipo de terminaciones utilizados en este trabajo (Bertram, 2000).

Lapout (Figura 6a) es la terminación lateral de un reflector (generalmente una plano de estratificación) en su límite deposicional, es decir el truncamiento implica que un reflector originalmente se extendía más allá y ha sido erosionado (truncamiento erosional) o trucado por un plano de falla, superficie de *slump*, un contacto con sal o arcilla movable o una intrusión ígnea.

Baselap es la terminación de reflectores contra una superficie sísmica subyacente (la cual marca la base del paquete sísmico). Los tipos de *baselap* son: *downlap*, donde el echado de la superficie sísmica es menor que el echado de los estratos suprayacentes; *onlap*, donde el echado de la superficie sísmica es mayor.

Downlap (Figura 6b) se observa en la base de las clinofomas progradantes, y usualmente representa la progradación de un sistema de pendiente de borde de plataforma dentro de aguas profundas (sea mar o un lago). El *downlap* representa un cambio de medio de depósito de pendiente marina (o lacustre) a uno de condensación marina (o lacustre) o de no-depósito. La superficie del *downlap* representa una unidad marina condensada. Es extremadamente difícil generar *downlap* en un medio subaéreo.

Onlap (Figura 6c) es reconocido por la terminación de reflexiones de bajo ángulo contra una superficie sísmica más inclinada, y puede ser de origen marino o costero.

Onlap marino (Figura 6d) es el *onlap* de estratos marinos, representando un cambio de depósito marino a uno de no-depósito o condensación marina, como resultado del relleno parcial de espacio por los sedimentos marinos. Los patrones del *onlap* marino no pueden ser usados para determinar cambios en el nivel del mar, ya que la posición de éste no está relacionada ni con la posición ni con el cambio del nivel del mar. El *onlap* marino refleja un cambio en facies submarinas desde significativas tasas de depósito a una capa pelágica de mucha menor energía. La superficie sísmica del *onlap* marino representa un hiatus marino o un intervalo condensado.

Onlap costero (Figura 6e) es el *onlap* de estratos no marinos, parálicos, o marinos marginales, representando un cambio desde depósito a erosión en margen de cuenca (subaéreo o plataforma) y no-depósito. El *onlap* costero es generalmente inferido de los datos sísmicos a partir del sobreposicionamiento hacia la tierra de las reflexiones más someras, donde se asume o se demuestra que éstas representan los depósitos de litoral, parálicos o de no-depósito. Los depósitos someros se considera que se forman cerca del nivel del mar, y los patrones del *onlap* costero con respecto a la superficie que se sobrepone indican cambios en el nivel del mar. Una progresión hacia la tierra del *onlap* costero resulta de un incremento del nivel del mar, mientras un descenso o movimiento hacia la cuenca del *onlap* costero resulta de una caída del nivel del mar. El *onlap* costero no se presenta necesariamente en la línea de costa, y un progresivo *onlap* costero hacia la tierra puede ser resultado de regresión (ej. la línea de costa se mueve hacia la cuenca) o transgresión (ej. la línea de costa se mueve hacia la tierra) dependiendo del aporte sedimentario.

Toplap (Figura 6f) es la terminación de reflexiones inclinadas (clinoformas) contra una superficie sobre yacente de bajo ángulo, donde ésta representa el límite de depósito próximo. En estratos marinos marginales, esto representa un cambio de depósito de pendiente a uno no marino o de *bypass* (donde no hay ni erosión ni depósito) marino somero o erosión. La superficie de *toplap* es una discordancia local. Un *toplap* aparente puede ocurrir, donde las clinoformas suben y forman reflexiones someras las cuales son muy delgadas para la resolución sísmica.

Truncamiento erosional (Figura 6g) es la terminación de los estratos contra una superficie erosional sobre yacente. El *toplap* puede desarrollarse en un truncamiento erosional, pero el truncamiento es más extremo que el *toplap*, e implica o el desarrollo de un relieve erosional o el desarrollo de una discordancia angular. La superficie de erosión puede ser marina tal como la base de un cañón, canal o superficie mayor de escurrimiento, o una superficie no marina desarrollada en una discordancia aérea (límite de secuencia).

Truncamiento aparente (Figura 6h) es la terminación de reflexiones sísmicas de bajo ángulo bajo una superficie sísmica inclinada, donde la superficie representa condensación marina. Las terminaciones representan un límite de deposición distal (o adelgazamiento debajo de la resolución sísmica), generalmente dentro de los estratos someros, pero algunas veces dentro de abanicos submarinos. Muchas terminaciones de reflexiones en estratos marinos son denominadas “aparentes”, como las unidades condensadas que se extienden más allá de la resolución sísmica.

Truncamiento por falla (Figura 6i) representa la terminación de las reflexiones contra una falla sindeposicional o posdeposicional, *slump*, deslizamiento o un plano de intrusión. La terminación contra un relicto escarpe de falla es *onlap*.

Frecuentemente aparece que las reflexiones sobre yaciendo una superficie sísmica terminan contra ella, mientras aquellas debajo parecen ser concordantes (o viceversa). Esta concordancia es frecuentemente sólo aparente, y es debido al muy bajo ángulo entre la superficie y las reflexiones aparentemente concordantes. La condensación a lo largo de tal superficie frecuentemente resulta en una fuerte reflexión fácilmente reconocible y paralela a la concordancia.

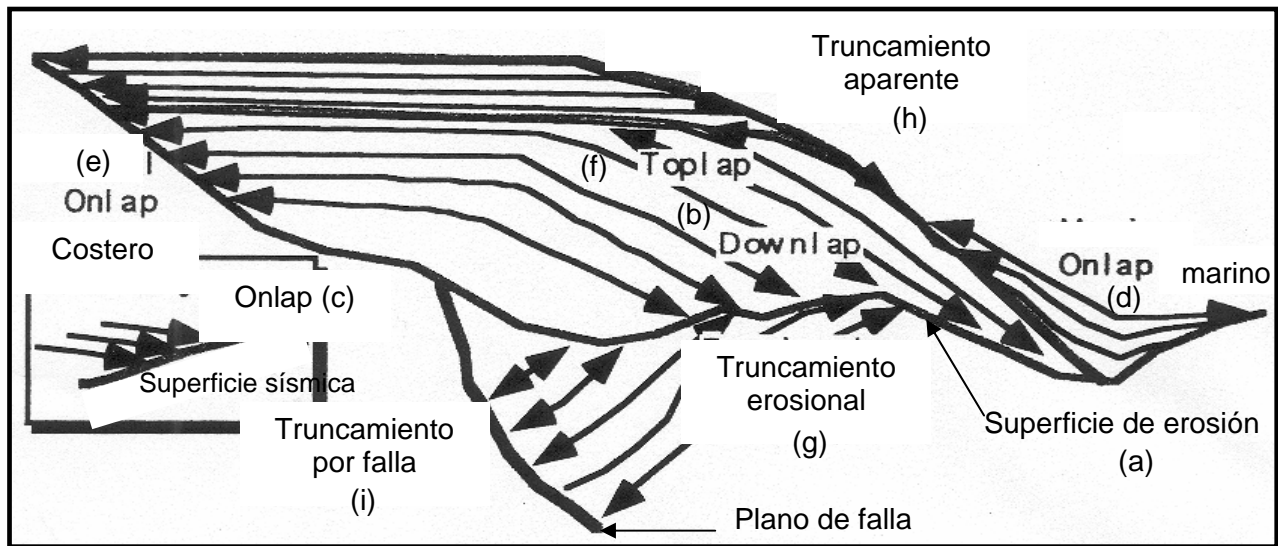


Figura 6. Patrones de terminación de estratos en un prisma sedimentario. Las puntas de flecha representan las terminaciones de los reflectores y éstos superficies de estratificación. (a) Las superficies de erosión usualmente tienen asociado un reflector característico con una buena amplitud y continuidad. (b) Los reflectores tienen un arreglo subparalelo e inclinación hacia la cuenca, van disminuyendo de pendiente hasta que se terminan en la base de la cuenca, los cuales están asociados a capas que se acuñan pendiente abajo. (c) Tenemos la terminación de los reflectores de bajo ángulo contra una superficie más inclinada. (d) Las terminaciones de los reflectores se da sobre la topografía marina de la cuenca, se dan como relleno de cavidades, además que varían su amplitud cerca de la terminación. (e) Los reflectores terminan en una superficie que representa el paso del mar hacia tierra firme. (f) Las terminaciones de los reflectores se dan bajo una superficie con una menor inclinación, también originado por el acuñamiento de las capas pendiente arriba. (g) Los reflectores muestran una secuencia inclinada y éstos terminan en una superficie de erosión. (h) Este truncamiento se origina por el no depósito, aunque la diferencia con el truncamiento erosional es interpretativo. (i) Los reflectores terminan en un plano de falla, aunque este plano casi nunca tiene un reflector asociado, se presenta como una zona de dispersión de la onda sísmica y en el perfil aparece como una zona caótica. Con las terminaciones de los reflectores y los planos de discontinuidad se puede delimitar una unidad estratigráfica (Bertram, 2000).

Después de haber marcado las terminaciones de los reflectores en el perfil sísmico, procedemos a la agrupación de estas terminaciones dentro de los planos de discontinuidad mayores, dándonos como resultado una secuencia sísmica (Bove, 2000). Las secuencias sísmicas se

apilan en todo el prisma sedimentario y tienen formas diversas, las más representativas en tercera dimensión (Figura 7) son:

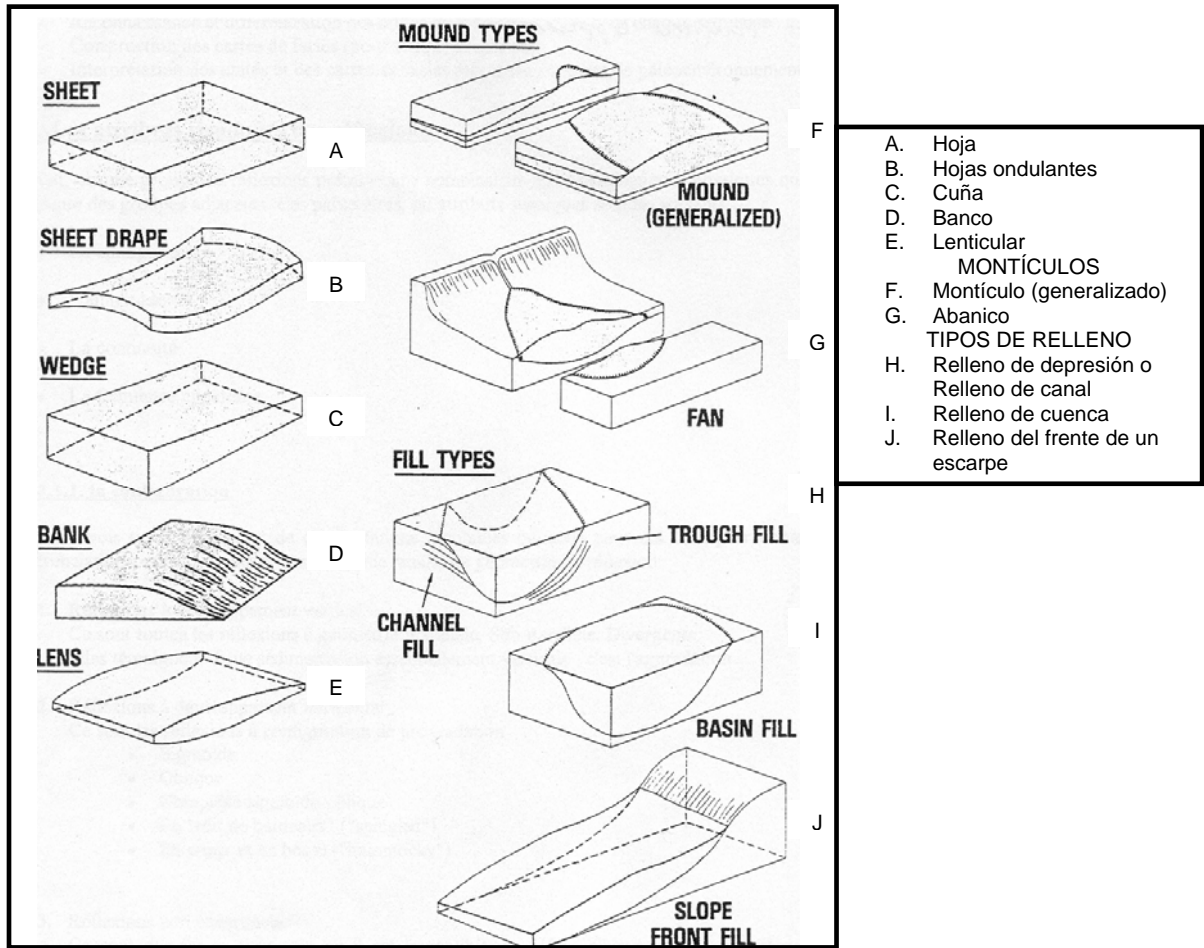


Figura 7. Algunas formas de secuencias estratigráficas las cuales se observan a diferentes escalas y en función del ambiente de depósito (Bove, 2000).

Las formas de hoja, de cuña y de banco se observan principalmente sobre la plataforma. En el caso de la forma de hoja las superficies de erosión o no depósito no son fáciles de identificar y son obtenidas de la correlación con otras unidades; en las formas de cuña se da por la disminución del espesor de los reflectores que terminan en *downlap*. Las formas de banco se presentan por el truncamiento aparente de los reflectores.

Las formas de hojas onduladas sugieren un ambiente uniforme, energía igualmente débil, encontradas frecuentemente en aguas poco profundas.

Las formas lenticulares son muy frecuentes en las diferentes facies sísmicas, constituyen frecuentemente las formas externas de las unidades de progradación.

Las formas de montículos pueden tener diversos orígenes: volcánico, clástico, construcciones arrecifales. Su extensión varía de algunas centenas de metros a algunas decenas de kilómetros.

Las formas de relleno marcan los límites de depresiones topográficas rellenas por estos depósitos.

3.4 ANÁLISIS DE LAS FACIES SÍSMICAS

Una vez que los datos han sido divididos en paquetes de depósito, la siguiente etapa del proceso consiste en el análisis de todos los parámetros sísmicos al identificar un reflector en el espacio tridimensional de la secuencia sísmica de depósito. Este análisis tiene por objeto la interpretación de estas reflexiones en términos de litología, estratificación, características del medio de depósito (Bove, 2000; Bertram, 2000); esta interpretación se compone de tres etapas:

- 1) Reconocimiento y diferenciación de las unidades de facies sísmicas en cada secuencia.
- 2) Construcción de mapas de facies (por cada secuencia)
- 3) Interpretación de las unidades y de los mapas de facies sísmicas en términos de paleoambiente.

$$\text{Código } \frac{A - B}{C}$$

Límite Superior (A)	Configuración Interna (C)	Límite Inferior (B)
Te = truncamiento erosional Tp = <i>toplap</i> C = concordante	W = ondulada DM = monticular divergente M = monticular Ob = oblicua progradacional P = paralela D = divergente C = caótica Sig = sigmoide progradacional Rf = reflexión libre Sh = tejas	On = <i>onlap</i> Dwn = <i>downlap</i> C = concordante

TABLA 1. En esta tabla se muestran los tres tipos de configuraciones usando el método de mapeo sísmico Ramasayer, cada característica tiene una abreviación para un más fácil manejo en un mapa. En la primera columna (A) están enlistadas cuales son las posibles terminaciones de los reflectores contra el límite superior, en la segunda columna (C) están enlistadas las configuraciones internas de los reflectores y la tercera columna (B) está enlistada las terminaciones de los reflectores contra el límite inferior (Ramasayer, 1979).

Es bastante útil ligar las facies sísmicas con el sistema de depósito, exceptuando las clinofomas y el sistema de pendiente. Estas relaciones solamente van a ser verificadas con la ayuda de pozos.

Ramasayer (1979) presentó una rigurosa metodología para el mapeo de facies sísmicas 2D, conocida como la “técnica A, B, C”; donde tres características de cada paquete sísmico son registradas, asignándole una letra inicial (Tabla 1) de acuerdo a la relación que tienen los reflectores respecto de los límites que los contienen y su comportamiento interno; después se trazan en un mapa (Figura 8) y con estas características se pueden correlacionar horizontalmente. Las letras que se asignan a las características de los reflectores son: (A), la naturaleza de la terminación de la reflexión contra el límite superior, (B), la naturaleza de las terminaciones de las reflexiones contra el límite inferior, y (C) la configuración interna de las reflexiones. Estas letras son escritas sobre un mapa y la distribución de las varias facies sísmicas puede ser construida usando la totalidad de la malla sísmica. Los mapas de facies sísmicas de esta manera son subjetivos pero usando datos de pozo se puede calibrar para obtener un mapa de facies geológicas (Figura 8).

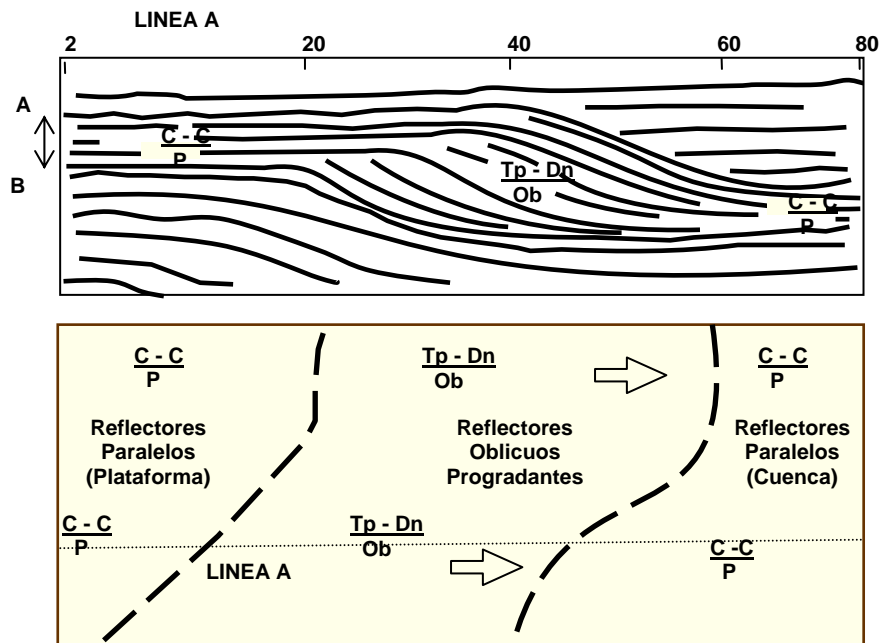


Figura 8. Ejemplo de Método de mapeo de facies sísmicas de Ramasayer, la explicación más detallada de cómo se obtienen está en el texto. En la parte superior tenemos un perfil sísmico con reflectores que tienen diferentes terminaciones con respecto a unos límites (AB) y con diferentes formas internas y en cada parte se le asigna un código diferente. En la parte inferior se muestra un mapa que ya se le vaciaron esos códigos y ahora podremos obtener un mapa de facies sísmicas (imagen modificada de Sánchez, 2000).

En la Figura 8 tenemos un ejemplo de cómo se utiliza el método Ramasayer en la práctica, primero en un perfil sísmico (Línea A) se reconocen las características de los reflectores con respecto a los límites de un paquete sísmico (AB). Empezamos con los reflectores de la parte izquierda del perfil, donde observamos que los reflectores son concordantes con el límite superior (C) e igualmente aquellos con el límite inferior (C); además que internamente son

paralelos (P), entonces la el código es (C-C/P). En la siguiente parte del paquete vemos que el los reflectores terminan con respecto al límite superior en *toplap* (Tp), la terminación de los reflectores con respecto al límite inferior es *downlap* (Dwn) y su forma interna es oblicua (Ob) por lo que el código es (Tp-Dwn/Ob). Por último a la derecha tenemos los reflectores que de nuevo son concordantes a los límites tanto superior (C) como inferior (C) y tienen una forma paralela internamente (P), de nuevo el código es (C-C/P).

Una vez hechos varios perfiles en la mayor cantidad de direcciones posibles, toda esa información de los códigos se puede pasar a un mapa y en donde existan el mismo tipo de códigos se van a poder correlacionar en ese mapa y de esta forma se va a generar un mapa de facies.

3.5 LOS ATRIBUTOS SÍSMICOS DE LAS REFLEXIONES

Cada grupo de reflexiones presenta una combinación de características físicas que les distingue de los otros grupos adyacentes. Estos parámetros o atributos sísmicos son los siguientes:

La configuración
La amplitud
La continuidad
La frecuencia aparente

3.5.1 LA CONFIGURACIÓN

Existen tres tipos principales de configuración reconocidas donde podemos distinguir ciertas diferencias, pero que permanecen dentro de la misma familia de geometría de reflexión (Bove, 2000).

1. Reflexión con desarrollo vertical

Son todas las reflexiones que nos atestiguan un arreglo vertical, producto de la forma de la energía y la velocidad de deposición, los elementos previos al depósito (paleorelieve), el tipo de agente responsable del transporte, etc. Se pueden diferenciar ocho geometrías (Figura 9):

Paralela llana: los reflectores presentan una disposición claramente uniforme y coplanar (Figura 9).

Paralela ondulada: los reflectores mantienen el paralelismo, solamente que su aspecto ya no es horizontal (Figura 9).

Subparalela: los reflectores ya no son claramente coplanares, pero en términos generales mantienen la misma disposición y una geometría similar (Figura 9).

Divergente: los reflectores parten de un mismo punto y tienden a separarse conforme mayor distancia haya de ese punto (Figura 9).

Lenticular: los reflectores se abren en una forma curva pero siempre conservando un arreglo interno y sus terminaciones no son abruptas (Figura 9).

Hummocky (montículos): los reflectores tienen una forma ondulada y no es muy regular su geometría; así que se observan una serie de pliegues que se entrecortan unos a otros muchas veces (Figura 9).

Roto: los reflectores no mantienen su continuidad y quedan espacios entre ellos (Figura 9).

Torcido: los reflectores tienen el aspecto más caótico y no es muy fácil darles una continuidad (Figura 9).

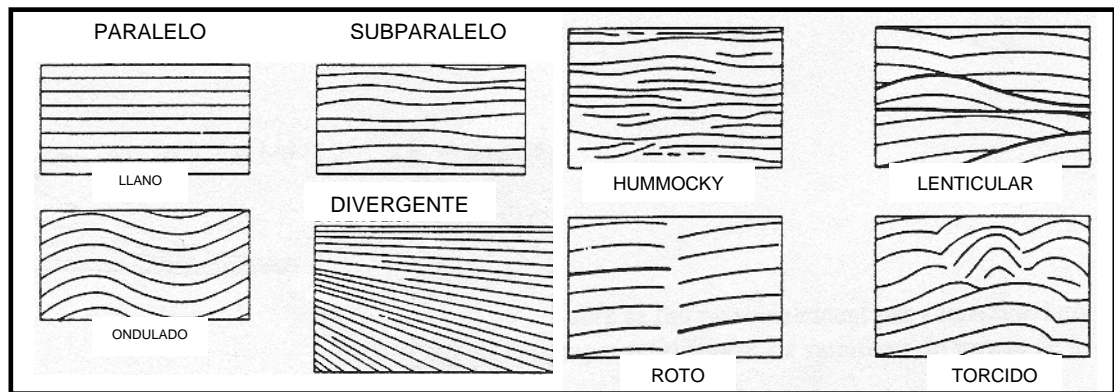


Figura 9. Reflexiones con desarrollo vertical. Los reflectores paralelos son los más fáciles de seguir a lo largo del perfil por ser totalmente uniformes. Los reflectores ondulados son uniformes pero no horizontales. Los reflectores subparalelos tienen un arreglo similar pero no son paralelos. En los reflectores divergentes se observa que parten de un solo punto. En los reflectores hummocky (montículos) son ondulados y se entrecortan muchas veces. En los lenticulares son curvos pero no tienen muchos cortes internos. En los reflectores rotos no son continuos. En los reflectores torcidos son los que no presentan un carácter en nada regular (Bove, 2000).

2. Reflexión con desarrollo horizontal

Estas son las reflexiones con una configuración de progradación y sobre todo están asociadas a la distancia de la fuente de los sedimentos y a la disminución de la energía del medio que los transporta (Figura 10):

- Sigmoide: los reflectores no son paralelos y se separan en la parte media de la pendiente y tienden a converger en la parte superior o inferior (Figura 10).
- Oblicua: los reflectores son paralelos y con una pendiente la cual puede ser constante (paralelo) o en la parte superior o inferior convergen (tangencial) (Figura 10).
- Complejo sigmoide-oblicua: los reflectores tienen el carácter sigmoide pero están entrecortados por otros reflectores ya sea en la parte superior o inferior (Figura 10).

- En tejas (*shingled*): los reflectores están contenidos en una capa y tienen un ángulo de inclinación, pero se cortan en la parte superior e inferior de la capa (Figura 10).
- En cavidades y montículos (*hummocky*): los reflectores están ondulados y tienden a entrecortarse unos a otros (Figura 10).

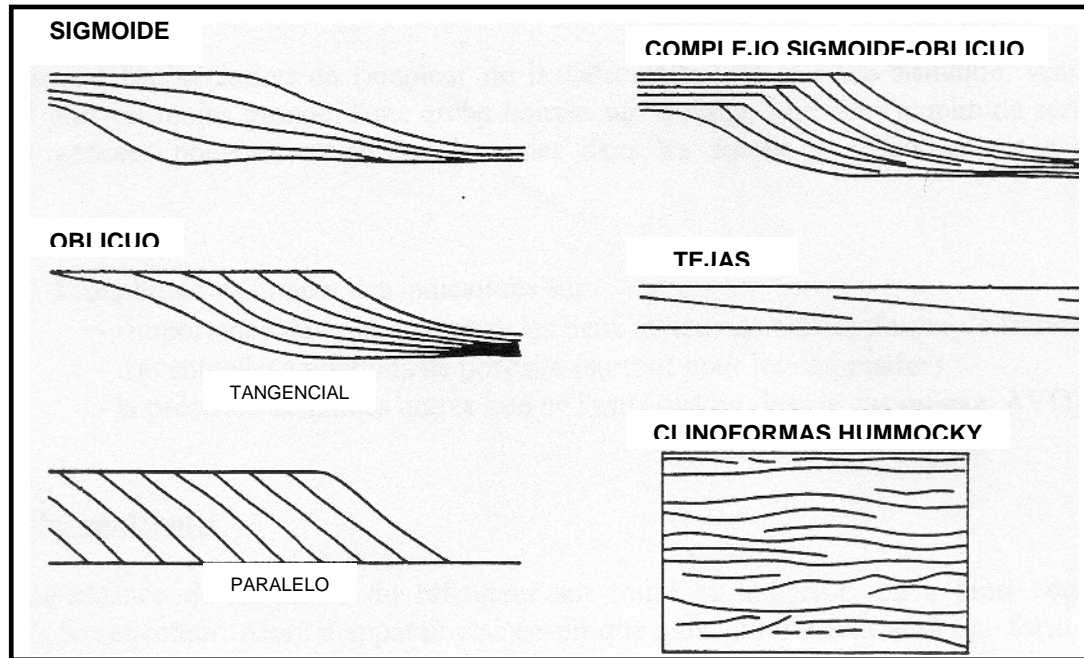


Figura 10. Reflexiones con desarrollo horizontal, en el sigmoide los reflectores con pendiente no son paralelos y convergen en los extremos, en el oblicuo los reflectores con pendiente son oblicuos, en el complejo-sigmoide-oblicuo los reflectores además de ser sigmoideas se entrecortan, en tejas los reflectores inclinados están contenidos en un paquete y en las clinoformas hummocky los reflectores se entrecortan (Bove, 2000).

3. Reflexiones no coherentes

Estas son facies sísmicas donde es imposible definir claramente una geometría de reflexiones, llamadas “caóticas”, “sin reflexión”, o aún “transparentes”.

La configuración nos va a dar las indicaciones sobre:

- La depositación de lechos sedimentarios.
- Los procesos de depósito de los sedimentos.
- La existencia o no de erosión.
- La paleotopografía de la base de la secuencia estudiada.
- De eventuales contactos de fluidos.

3.5.2 LA AMPLITUD

Amplitud se define como la magnitud que designa una desviación máxima con respecto a un valor medio. En un movimiento ondulatorio, la amplitud de una onda representa el valor máximo que alcanza la perturbación en un punto y, por tanto, sus unidades son aquellas en que se mide la perturbación. En el caso de la propagación de una onda por una cuerda, la amplitud es la distancia máxima que separa cada punto de la cuerda de su posición de equilibrio. Dado que la traza sísmica pone en posición vertical respecto a la profundidad y dado que se ilumina el área debajo de la traza en la parte positiva de ellas hasta la línea de equilibrio, observaremos que la amplitud es la apreciación de la deformación de la traza sísmica, visualizada por la existencia más o menos grande de un arco ennegrecido sobre la traza. Dado que cuando la amplitud es grande los arcos yuxtapuestos pueden ensamblarse unos con otros y acentuar este aspecto de mayor ennegrecimiento (Bove, 2000).

La amplitud nos va a dar indicios sobre:

- La importancia del contraste entre los dos medios de ambas partes de la interfase.
- De eventuales variaciones de porosidad (sobre todo para los carbonatos).
- La presencia de fluidos diferentes al agua (sobre todo en el caso de gas, AVO).

3.5.3 LA CONTINUIDAD

Es la persistencia del carácter del reflector sobre toda su longitud, por lo que la continuidad está dada en función que la onda de la traza tenga la misma orientación relativa con respecto a las ondas de las trazas adyacentes. Entonces aparece claramente que mientras un reflector tenga una amplitud grande e igualmente los reflectores contiguos tengan amplitudes grandes, la continuidad será fácilmente identificada. Sin embargo, si un reflector posee una amplitud media y los reflectores adyacentes poseen amplitudes iguales pero con orientaciones un poco distintas, la continuidad será un poco más difícil de identificarla (Figura 11).

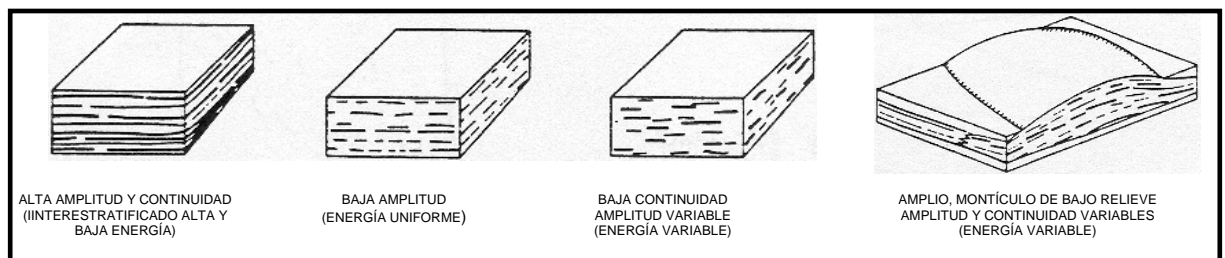


Figura 11. Diferentes tipos de continuidad en un paquete sísmico. En el extremo izquierdo los reflectores poseen una amplitud grande y buena continuidad, en la parte derecha tenemos reflectores con baja amplitud pero con buena continuidad; después tenemos reflectores con amplitud variable y baja continuidad y por último tenemos reflectores con amplitud y continuidad variable (Bove, 2000).

La continuidad nos va a dar indicios sobre:

- La constancia de las capas sedimentarias de una parte y de la otra de la interfase

- El proceso de depósito de los sedimentos

3.5.3 LA FRECUENCIA APARENTE

La frecuencia aparente es la importancia del espaciamiento entre dos reflectores superpuestos. Si los reflectores están bien espaciados, hablamos de baja frecuencia aparente, en contraste si los reflectores están bastante próximos, entonces hablamos de alta frecuencia aparente (Bove 2000).

La frecuencia aparente nos va a dar indicios sobre:

- El espesor de los bancos acústicos, es decir su homogeneidad dependiendo de la sísmica.

Unidades de facies sísmicas de ambientes diferentes pueden presentar facies idénticas. Es necesario entonces efectuar las asociaciones laterales y verticales del estudio de las facies.

3.6 ATRIBUTOS SÍSMICOS EN LA CUENCA CHIHUIX

En la subcuenca Chihuix se han identificado una serie de unidades de facies sísmicas que tienen las siguientes características:

UNIDAD 1

FACIES SÍSMICAS DE PLATAFORMA CONTINENTAL

Tienen una configuración interna paralela llana. Con una continuidad buena como resultado de una sedimentación de capas continuas que están en un ambiente muy amplio. La amplitud fuerte pero variable, es originada por una alternancia de arcillas con arenas, limos o carbonatos. La amplitud variable también está dada por las variaciones de los espesores de los estratos (Bove, 2000) (Figura 12).

FORMA EXTERNA

Las formas pueden ser en hojas o en cuña. Las terminaciones superiores de las reflexiones son concordantes mientras que aquellas de la base pueden ser concordantes o en *onlap*.

CONFIGURACIÓN DE LAS REFLEXIONES

Generalmente aparecen como paralelas, subparalelas o bien ligeramente divergentes.

MEDIO DE DEPÓSITO

La interpretación es que son sedimentos marinos de aguas poco profundas (<200 m), depositados bajo la acción de las olas, pero igualmente de origen fluvial o combinados.

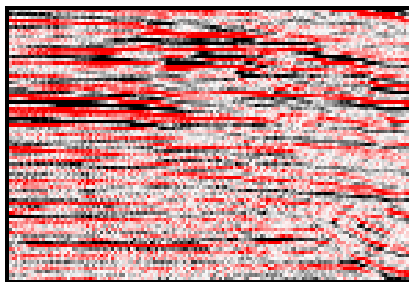


Figura 12. Algunos reflectores característicos de plataforma continental en la Cuenca Chihuix. Observamos que la continuidad y la amplitud son muy buenas en la parte izquierda de la imagen (hacia la costa) y la amplitud se va volviendo variable conforme se aleja de la costa. Tiene una configuración interna en forma llana paralela y una configuración horizontal que termina en cuñas (ver en la parte inferior derecha).

UNIDAD 2

FACIES SÍSMICAS PROGRADANTE SIGMOIDE

Tenemos una configuración interna del tipo divergente; con una amplitud y continuidad buena en la cima del sigmoide, pasando a una amplitud baja y a una continuidad mala en la base del sigmoide.

FORMA EXTERNA

Es en abanico o sigmoide.

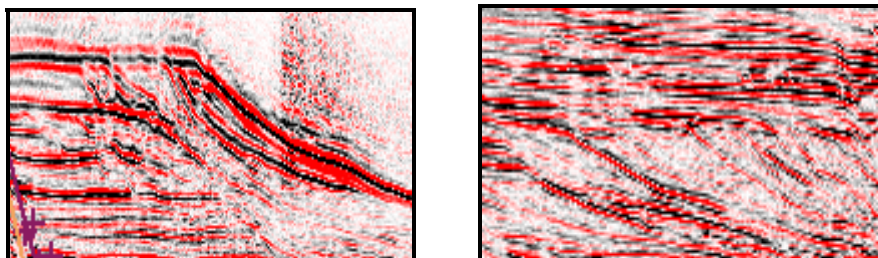


Figura 13. Algunos reflectores de tipo sigmoide (borde de plataforma) en la Cuenca Chihuix. En la imagen de la izquierda observamos el borde de plataforma actual, donde claramente se observa como los reflectores asociados a esos materiales presentan una clara forma sigmoidal, en cambio los reflectores más profundos ya no son tan claros porque se han producido erosión en esos materiales y se depositan los materiales más nuevos; así es más difícil ver reflectores con una gran continuidad. En la imagen de la derecha ya observamos las mismas formas sigmoidales pero con una baja amplitud y una mala continuidad.

CONFIGURACIÓN DE LAS REFLEXIONES

Esta configuración se observa fácilmente en la dirección perpendicular a la línea de costa, donde la pendiente del talud es mayor, así las formas sigmoidales son fácilmente identificables, pero en las secciones paralelas a la costa se observan los reflectores son paralelos y en algunos casos llegan a tener ligeras formas lenticulares (Bove, 2000) (Figura 13).

SEDIMENTACIÓN

Los sedimentos depositados en este tipo de unidad son arcillosos, clásticos finos y depósitos hemipelágicos.

UNIDAD 3

FACIES SÍSMICAS DE RELLENO EN LA BASE DE LA PENDIENTE

Tienen una configuración interna subparalela. Con una continuidad, amplitud y frecuencia variable.

FORMA EXTERNA

En abanico relativamente largo y con un desarrollo horizontal en montículos.

CONFIGURACIÓN DE LAS REFLEXIONES

Está representada por reflexiones paralelas o subparalelas cuando la sección es perpendicular a la pendiente, y reflexiones inclinadas hacia la cuenca sobre las secciones paralelas a la pendiente (Bove, 2000) (Figura 14).

SEDIMENTACIÓN

Está dominada por las arcillas y limos de aguas poco profundas, transportadas desde el continente por acción de la gravedad hacia la cuenca y en algunos casos a partir de corrientes marinas es removido y redepositado dentro de la cuenca.

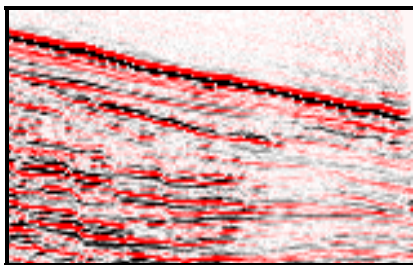


Figura 14. Algunos reflectores en la base de la pendiente en la Cuenca Chihuix, en esta imagen se observa la base de las sigmoides o propiamente hablamos del talud continental, ya que los reflectores más arriba forman parte de del talud actual y sus trazas son muy claras, pero los más profundos ya no son tan continuas sus trazas y su amplitud es muy variable. En la parte inferior derecha vemos como se vuelven caóticos los reflectores, se interpreta como montículos por derrumbes dentro del talud.

IV BORDES DE PLATAFORMA CLÁSTICA EN MARGENES PASIVOS

Las secuencias sedimentarias en los márgenes continentales pueden ser clasificadas de acuerdo a la migración del margen: ejemplo progradación, agradación o retrogradación. Esta clasificación está asociada a la velocidad de sedimentación con respecto a la subsidencia y la porción de sedimentos de facies de aguas profundas (pendiente) y de aguas someras (plataforma). En el caso de las plataformas clásticas progradantes (como en el caso de Chihuix) una subdivisión basada en la estabilidad gravitacional resulta útil.

Es importante hacer notar que en los bordes de plataforma inestable, existe la posibilidad que derrumbes a gran escala en el talud continental rompan con la geometría del depósito original, por lo que la clasificación de bordes de plataforma progradantes, agradantes o retrogradantes no es de mucha utilidad. El fenómeno de derrumbes puede generar una mayor tasa de subsidencia en el borde de una plataforma inestable en comparación con la tasa de sedimentación regional (inclusive para una margen pasiva). Es por eso que los depósitos en el borde de plataforma son volumétricamente sustanciales para el llenado de la cuenca.

La Cuenca Chihuix fue rellenada por una secuencia clástica de plataformas progradantes en una margen relativamente pasiva. Esta secuencia comenzó a acumularse en el Mioceno, al mismo tiempo que la falla lítrica principal del *rollover* Chihuix se originaba. En la base de esta secuencia los sedimentos tienen facies de talud superior que progresivamente va cambiando a facies menos profundas hasta el borde de plataforma actual.

Con los datos sísmicos de Lankahuasa se pueden reconocer diferentes geometrías de los reflectores, las cuales a su vez pueden estar asociadas a ciertos cuerpos sedimentarios. En la Cuenca Chihuix encontramos los siguientes conjuntos de reflectores: (a) reflectores paralelos, los cuales tienen una continuidad más o menos buena, se interpretan como secuencias de plataforma continental; (b) en los extremos de estos reflectores hacia el mar, se observa un incremento del echado hacia la cuenca, un cambio en el paralelismo y la continuidad disminuye, forman grupos con estructura sigmoide y algunas de estas estructuras se entrecruzan; en el quiebre de los reflectores horizontales con los sigmoides se interpretan como bordes de plataforma, el sigmoide se interpreta como el talud continental, en la base del sigmoide donde los reflectores pierden completamente su continuidad, paralelismo y algunos de ellos se terminan en un solo reflector, por lo que se interpreta como pie de talud y de algunos se piensa que son depósitos turbidíticos, con lóbulos y montículos de lodo en una fase de regresión marina; (c) la continuación de las terminaciones de los reflectores algunos de los cuales son continuos mar adentro, se vuelven más compactos, adquieren un grado de paralelismo, y se interpretan como depósitos de aguas profundas (Anexo A1).

En la Cuenca Chihuix fueron usadas estas características para poder hacer una interpretación de los paleoambientes y de las configuraciones de cada uno de ellos. Al hablar de plataformas progradantes se dice que se colman con depocentros que se desplazan hacia la cuenca, mientras la máxima actividad de las fallas regionales se da inmediatamente después y en la misma dirección. Estos fenómenos pueden ser utilizados como criterios alternos para la identificación del borde de plataforma cuando criterios más convencionales no pueden ser utilizados, o son inadecuados o ambiguos.

El borde de plataforma es el puente entre los ambientes de aguas profundas y aguas someras, por lo que se ve influenciada por ambos. Los mecanismos de transporte de sedimentos se agrupan en dos categorías: factores geológicos y factores oceánicos.

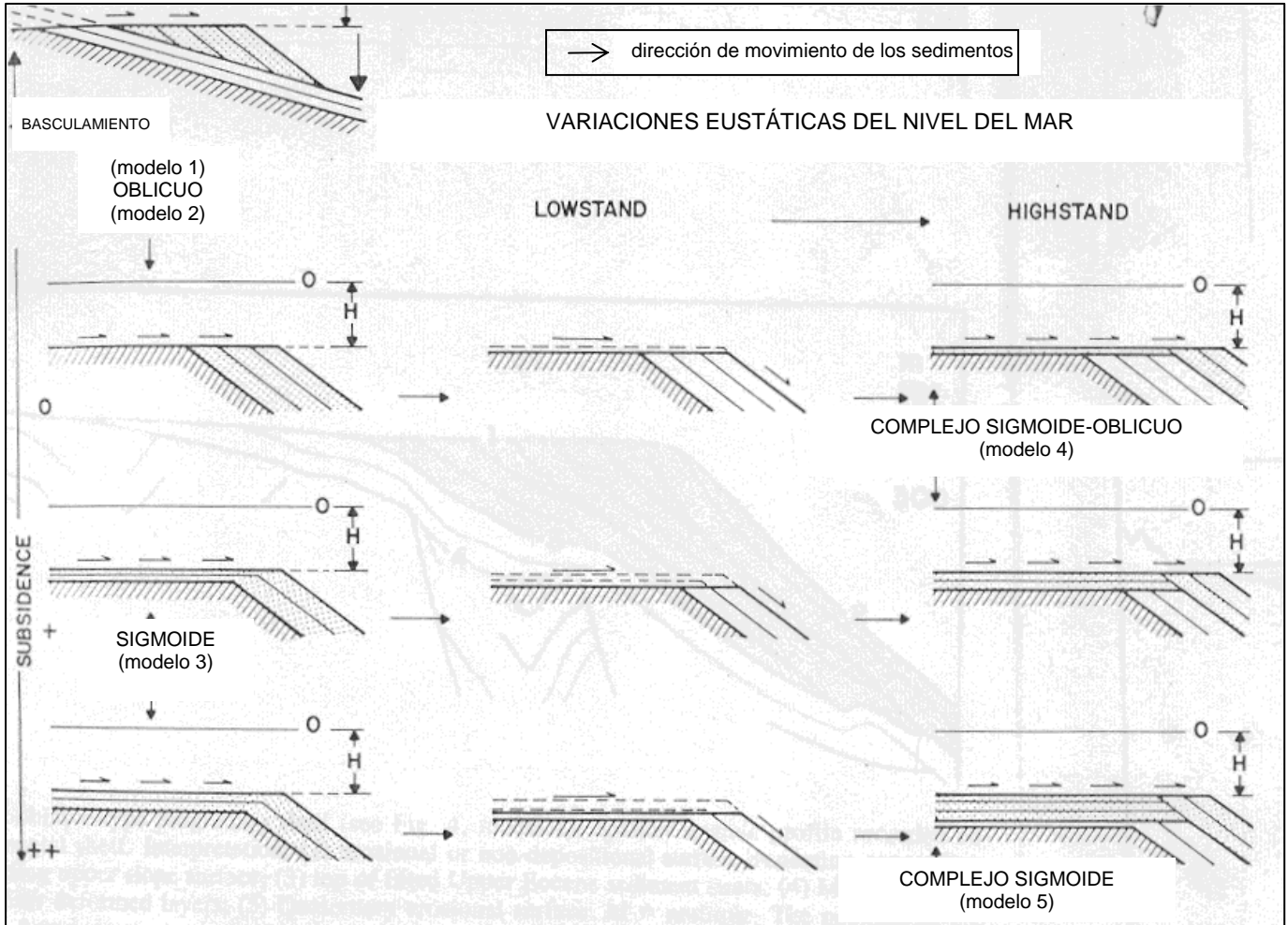


Figura 15. Modelo de borde de plataforma de Mougenot et al. 1983, en función de los cambios eustáticos y la subsidencia. Tenemos que H es la profundidad del borde de plataforma. H también se entiende como el nivel de equilibrio debajo del cual las partículas se sedimentan. Las capas antiguas tienen un rayado en la parte inferior, en cambio las recién formadas se representan por formas tabulares sombreadas. Las flechas indican la dirección del bypass (puenteo o no depósito de sedimentos) y las líneas discontinuas indican las capas erosionadas. En la parte izquierda tenemos el nivel del mar normal, en el centro tenemos una baja generalizada del nivel del mar (*lowstand*), en la parte derecha tenemos un aumento generalizado del nivel del mar (*highstand*). De arriba hacia abajo el grado de subsidencia va en aumento. La explicación de los diferentes modelos está en el texto.

Los factores geológicos incluyen tectonismo, aporte de sedimentos, tamaño del sedimento, profundidad del borde de plataforma, gradiente del talud superior e irregularidades batimétricas. Los factores oceánicos incluyen frentes de masas de agua, corrientes circundantes, corrientes inducidas por meteoros, mareas, olas internas y externas. Aunque cualquiera de estos factores puede operar simultáneamente en cualquier margen continental, su importancia varía con el

tiempo y el espacio. En la Cuenca Chihuix los factores que jugaron un papel principal son los geológicos: generando los sedimentos al Oeste, en el Cinturón Plegado; con un alto gradiente los ríos han removido un gran volumen de sedimentos y la existencia una gran área de depósito en la cuenca del Golfo de México.

La plataforma continental puede ser un área de depósito, de erosión o de *bypass* (no depósito), y en este último caso la sedimentación ocurre en la parte superior del talud, hacia mar abierto desde el borde de plataforma.

El origen del borde de plataforma en márgenes pasivas es el resultado de las interacciones de varios factores: (1) colapso tectónico de la plataforma externa por fallamiento normal y erosión retrogresiva en el talud, originando los bordes de plataforma retrogradantes (migración de la tierra), (2) acumulación de arrecifes en la plataforma externa que originan barreras, aquellos bordes hacia mar abierto constituyen un borde de plataforma construido, (3) progradación sedimentaria de la plataforma que resulta en bordes de plataforma que migran hacia mar abierto.

Mougenot et al., 1983, con base en estudios sísmicos de los márgenes continentales de la Península Ibérica y el Oeste del Mediterráneo propusieron un modelo teórico de los bordes de plataforma de tipo progradante que toma en cuenta los parámetros hidrodinámicos dominantes, basculamiento y subsidencia del borde de plataforma, y los cambios eustáticos del nivel del mar (Figura 15).

La profundidad del borde de plataforma (H), en este modelo, está controlada por las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias locales. H es equiparable con el nivel de depósito de equilibrio. La energía sobre H previene el depósito de partículas, las cuales migran hacia el borde de plataforma. Debajo de H, la cantidad de energía decrece hasta que las partículas se sedimentan y forman un talud en la parte superior de la pendiente. En este punto las capas se denominan oblicuas.

De acuerdo a este modelo, los siguientes tres parámetros deben ser tomados en consideración:

- 1) Las condiciones hidrodinámicas de las masas de agua cerca del borde de plataforma, las cuales varían a todo lo largo de la misma. Generalmente, desde la plataforma externa hasta el talud superior es un ambiente afectado por la alta energía, donde las corrientes de marea, olas internas y otros factores están activos.
- 2) La cantidad del aporte sedimentario, el cual depende de factores climáticos y tectónicos, además de la distancia desde la línea de costa donde las principales fuentes de terrígenos son desembocaduras de ríos y erosión costera.
- 3) El tamaño y la densidad de las partículas, las cuales decrecen proporcionalmente con el decremento de la energía, usualmente con un incremento de la profundidad. Los cambios en la pendiente del talud en equilibrio dependen de la textura y composición del sedimento.

De acuerdo a los modelos que Mougenot propone como posibles orígenes de borde de plataforma progradantes; tenemos en forma muy breve los siguientes 5 modelos:

Modelo 1. En este caso tenemos estratos subyacentes inclinados, los cuales en su parte más alta tienen una superficie de erosión, debido a un movimiento tectónico que bascula toda la secuencia. Para este modelo consideramos que H se mantiene constante como resultado de la formación de la cuña sedimentaria, al mismo tiempo la erosión se da arriba de la cuña, por lo que resulta con el tiempo en un avance de la cuña mar adentro (Figura 15).

Modelo 2. En este modelo existe solamente erosión tanto de las rocas previas al depósito como de aquellas de reciente formación, donde H se mantiene constante y la formación de nuevas capas se da hacia mar adentro. Aquí el nivel de subsidencia es bajo y solamente se ve afectado por las variaciones del nivel del mar (Figura 15).

Modelo 3. En este modelo el grado de subsidencia es mayor y H se mantiene constante, por lo que se forma espacio suficiente sobre la plataforma para la deposición de capas que se continúan hasta el borde de la plataforma y el talud. Si la subsidencia se incrementa habrá más espacio para el depósito de más capas sobre la plataforma continental (Figura 15).

Modelo 4. Aquí el grado de subsidencia se mantiene relativamente constante, pero hay una baja generalizada del nivel del mar (*lowstand*) y H es mayor que la profundidad de los sedimentos, por lo que se produce erosión mayor de las capas tanto de la plataforma continental como del borde de plataforma en comparación con el modelo 5 y la formación de depósitos de talud; después se produce una subida generalizada del nivel del mar (*highstand*) y H es menor que al espacio entre el nivel del mar y el fondo, por lo que se vuelve a producir de nuevo sedimentación en la plataforma continental y en el borde de la plataforma (Figura 15).

Modelo 5. En este modelo la subsidencia es máxima y a pesar de que hay un *lowstand*, éste no llega a erosionar totalmente los sedimentos que se depositaron en la fase previa; así que cuando hay un *highstand*, el espacio entre el nivel del mar y el fondo es mayor en comparación al modelo 4, por lo que la apilación de cuerpos sigmoides se da en forma casi vertical, donde la progradación es lenta (Figura 15).

Para explicar el origen de los cuerpos sedimentarios que se interpretan como bordes de plataforma en la Cuenca Chihuix usamos la similitud geométrica con el modelo 5 (Figura 15), el cual explica el origen de las plataformas: (a) Descenso del nivel del mar (*lowstand*), provocando el transporte o erosión (o no-depósito) de los sedimentos en la plataforma y donde la línea de costa se aproxima al borde de plataforma, ocurriendo la depositación en el talud continental; (b) Aumento del nivel del mar (*highstand*), donde la línea de costa se vuelve a situar en la posición previa a la regresión, por lo que las condiciones de progradación se vuelven a restablecer en el borde de plataforma y sus alrededores. Una gran cantidad de sedimentos restituye aquellos erosionados en el *lowstand*.

En el aumento del nivel del mar hay dos fases constructivas: primero, depósito de una capa horizontal en la plataforma, la cual restablece la profundidad H, ya que sustituye los sedimentos erosionados y la subsidencia de la plataforma durante el *lowstand*; segundo, el depósito de capas oblicuas progradantes más allá del borde de plataforma a partir de que el nivel H es alcanzado.

En la Cuenca Chihuix básicamente tenemos una secuencia de plataformas progradantes, aunque en algunos niveles de la secuencia y en la parte Sur de la cuenca se puede observar algunas superficies de erosión, pero el establecer su continuidad dentro de la cuenca no ha sido muy fácil de hacer.

V SISTEMA FALLA DE CRECIMIENTO/ROLLOVER

5.1 INTRODUCCIÓN

Las fallas de crecimiento se definen como aquellas que están activas durante la sedimentación. Una falla lítrica se caracteriza por el decremento de ángulo o de echado con la profundidad, siendo ésta una superficie con una concavidad hacia arriba. La mayor parte de las fallas lítricas han sido identificadas en bloques con deslizamientos gravitacionales en cuencas subsidentes que contienen gruesos paquetes arcillosos debajo de arenas progradantes (Shelton, 1984).

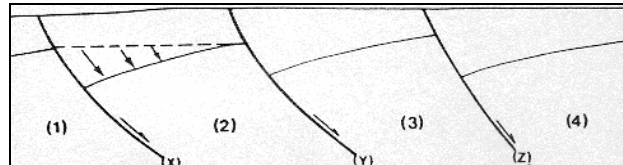


Figura 16. Bloques de falla, donde cada bloque de piso por rotación forma parte del bloque de techo de la siguiente falla lítrica a la izquierda. El fallamiento lítrico puede generar buenas trampas estructurales, como en los bloques 1, 2, 3, 4 que si en su parte más somera tienen una porosidad buena y las rocas que les cubren son impermeables, podrían almacenar buena cantidad de hidrocarburos (Shelton, 1984).

Shelton (1984) tomando como base el trabajo de otros investigadores, ha dividido a las fallas normales en dos categorías: rotacionales y no rotacionales. La categoría rotacional las divide en (a) aquellas con rotación sólo de estratos a lo largo de fallas lítricas, y (b) aquellas con rotación de estratos, fallas y otras estructuras (pliegues, discontinuidades, etc.) a lo largo de fallas planas o lítricas (Figura 16). En las fallas no rotacionales sólo se produce la discontinuidad de los estratos y el desplazamiento de unos con respecto a otros, pero siempre mantienen la misma orientación, es decir no giran las estructuras a lo largo de las fallas.

5.1.1 CAUSAS DEL FALLAMIENTO NORMAL

Las fallas normales existen en respuesta a la extensión, la cual puede ser extensión cortical, extensión de un perfil sedimentario, o extensión del basamento y/o perfil sedimentario (Shelton, 1984).

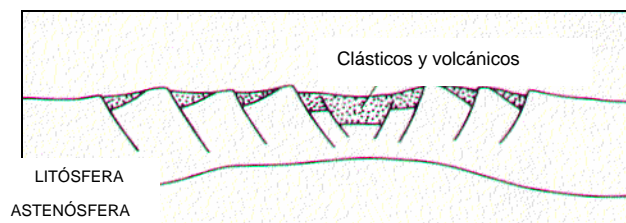


Figura 17. Sección esquemática de una zona de rupturas mayores en un continente, antes de la posible formación de un rift y la formación de un margen continental pasivo (Shelton, 1984).

1. La extensión cortical resulta de (a) movimiento de placas divergente, expresada por rifts (Figura 17), (b) arqueamiento por expansión termal (ej. el desarrollo de una pluma), y (c) tracción

acompañada de rompimiento divergente en torsión (torsión o fallamiento transformante) y movimiento a lo largo de fallas en escalamiento paralelas a subparalelas o a lo largo de una falla de torsión conjugada.

2. La extensión de un perfil sedimentario es resultado de (a) un flujo de un sustrato dúctil (arcillas y/o sal) (Figura 18), (b) el incremento del echado y como resultado de un deslizamiento gravitacional (Figura 19) (c) un combamiento o arqueamiento durante el levantamiento del terreno (Ej. asociado con una intrusión salina e ígnea) (Figura 20) y flexura cortical o concéntrico asociado con plegamiento compresional, (d) fallamiento a rumbo (posible separación normal a lo largo de al menos una parte de lo largo de una falla).

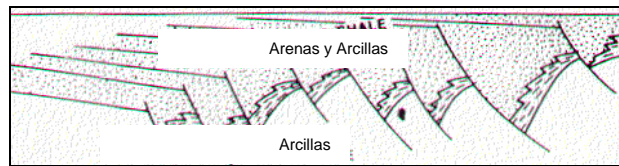


Figura 18. Fallamiento normal debido al flujo de arcillas dúctiles (Shelton, 1984).

3. La extensión del basamento y/o perfil sedimentario resultado de (a) un levantamiento del terreno durante una transpresión acompañada de fallamiento en torsión; (b) un colapso axial asociado con subducción; (c) un levantamiento y/o arqueamiento de un pliegue anterior.

5.2 FALLAS NORMALES LÍSTRICAS

El aplanamiento del echado de una falla normal con la profundidad, refleja una o más condiciones del ambiente o procesos a profundidad. El primer grupo son condiciones atribuidas a la formación de fallas lístricas (Shelton, 1984, Maudit y Brun, 1998).

1. Incremento en la ductilidad del prisma sedimentario, generalmente en relación con gruesos paquetes de arcilla y/o sal con sobrepresión (Figura 18), con extensión de los sedimentos enterrados debido al flujo o desprendimiento del sustrato.

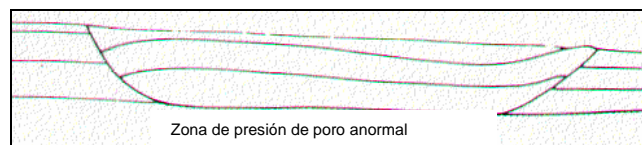


Figura 19. Fallamiento normal debido a un deslizamiento gravitatorio en respuesta al echado de los estratos con presión de poro anormal (Shelton, 1984).

2. Incremento en la ductilidad de la corteza (con extensión del sustrato dúctil).

El segundo grupo incluye procesos que operan después de la formación de la falla (Shelton, 1984), incluyendo a la deformación causada por:

1. La compactación de las arcillas en el bloque de piso (Figura 20).

2. El arqueamiento durante el levantamiento iniciado en rocas debajo de la falla (ej. debido a una intrusión salina o ígnea) (Figura 21).

3. El incremento del basculamiento (con rotación alrededor de un eje paralelo al rumbo de la falla) del bloque que sube de la falla, reflejando un movimiento subyacente bajo la falla.



Figura 20. Aplanamiento de una falla debido a la compactación de arcillas (Shelton, 1984).

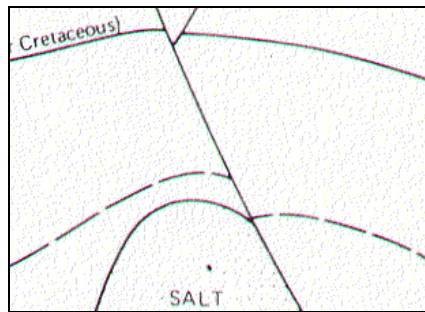


Figura 21. Fallas normales debido a la extensión en capas que sobreyacen sal (Shelton, 1984).

5.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS FALLAS LÍSTRICAS

GEOMETRÍA

El echado de una falla lístrica se vuelve cero con la profundidad ya sea que éste se termine en rocas dúctiles que se deforman por el flujo o que se vuelva una zona de despegue (*décollement*). Hay una fuerte tendencia a considerar que lo último es la disposición dominante en una falla lístrica. Donde existe un débil echado, el deslizamiento lento puede contribuir a desarrollar zonas de despegue o de fallas dúctiles en la base. Aún así, la relación de fallas lístricas con la arcilla y la sal sugiere un sistema de falla en flujo; además la ductilidad del sustrato refleja una sobrepresión en arcillas o plasticidad de la sal. Un equivalente de las fallas lístricas en mecánica de suelos es el fallamiento de cimientos, el cual es producido por una carga asimétrica (Shelton, 1984).

Algunas fallas se aplanan a profundidad a través de las arcillas y se profundizan debajo de éstas. La relación es generalmente atribuida a la compactación de las arcillas, pero a veces refleja un menor ángulo de echado debido a la ductilidad de las arcillas. La compactación reduce

significativamente el echado y el salto de la falla. Sin embargo, la naturaleza lítrica de las fallas en rocas quebradizas y la naturaleza lítrica de los deslizamientos rotacionales en fallas de cimientos indican que el aplanamiento del echado es una característica inherente de muchas fallas normales. El echado puede pasar de vertical en la superficie a 60° en la mayor parte de la falla y terminar horizontal (Shelton, 1984).

Un aspecto de las fallas normales es que vistas en planta pueden estar arqueadas o rectas, para las fallas arqueadas son comunes en sistemas deltaicos, mientras las fallas con trazas rectas son comunes en los sistemas donde los sedimentos ya están consolidados o no hay un aporte continuo de nuevos sedimentos. Esto refleja que en el primer caso existe un depocentro o punto de carga y en el otro caso son líneas de carga. Otra característica de las fallas es que tienden a ramificarse o extenderse en sus extremos o muestran fallas subsidiarias o en relevo. Las fallas que delimitan a la Cuenca Chihuix muestran que son arqueadas y que tienen muchas fallas en relevo (Figura 22).

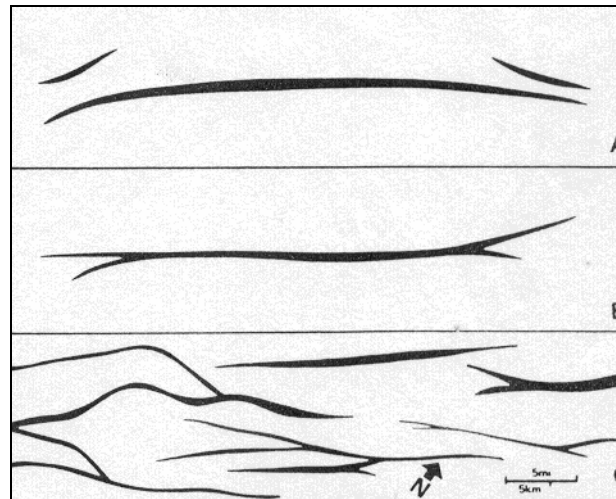


Figura 22. Posibles terminaciones de fallas normales en sus extremos: (a) por el relevo de otras fallas; (b) por la ramificación de la falla; (c) un mosaico de ramificaciones y de relevos (Shelton, 1984).

PROPAGACIÓN

Muchas fallas inician en una zona local y se extienden, propagan y crecen lateralmente. Una falla decrece lateralmente hacia sus extremos pero también hacia arriba y hacia abajo. Esta configuración de la falla es un indicador que el patrón horizontal de fallamiento (visto en planta) puede en algunos casos asistirnos en la estimación de la geometría vertical.

El patrón de propagación de una falla hacia arriba como hacia abajo se infiere generalmente como continuo. Sin embargo, algunos autores han sugerido que la propagación de una falla no es simple y que muchas fallas individuales pueden componer a una falla mayor. Los mecanismos para el crecimiento de una falla se resumen en la Tabla 2 (Shelton, 1984).

A pesar de estos mecanismos, la inestabilidad de la pendiente a gran escala (también llamado deslizamiento) explica mejor las siguientes características de los sistemas regionales de fallas de

crecimiento: (1) asimetría (predominantemente hasta la cuenca); (2) geometría lítrica, *rollover*, y el componente extensional a gran escala, todos indicativos de despegue (*décollement*); (3) fallamiento contemporáneo en todas las secuencias arcillosas; y (4) localización de los máximos porcentajes de extensión a lo largo del borde de plataforma. La Cuenca Chihuix fue creada en un régimen de extensión en la parte superior de la pendiente.

Mecanismo	Comentarios
Inestabilidad de la pendiente; deslizamiento por gravedad	Difícil de documentar en registros antiguos porque el relieve paleobatimétrico y las estructuras pie no son bien preservadas
Carga de arena sobre arcilla	No se explica el fallamiento de crecimiento en todas las secuencias arcillosas, o la ocurrencia de estructuras pie pendiente mas abajo del acuífero de arena
Compactación diferencial	No se toma en cuenta por grandes componentes extensionales o geometrías lítricas, puede causar fallamiento en algunos casos
Levantamiento de bordes de sal o de arcilla	No se toma en cuenta por asimetría (predominantemente hasta la cuenca) de la mayor parte de los sistemas de fallas de crecimiento, no predice grandes componentes extensionales de fallas mayores, útil en la explicación de fallas crestales y hasta en la cuenca

TABLA 2. Mecanismos para el crecimiento de una falla.

La evolución estructural puede ser considerada en dos escalas (Shelton, 1984): primera, la evolución regional de los estilos estructurales del borde de plataforma, en tanto éste prograda dentro de la cuenca; y segundo, la evolución de los estilos estructurales en un área específica que involucre desde un simple ambiente de plataforma hasta un ambiente estable de plataforma. A escala regional, tres fases pueden potencialmente desarrollarse si la progradación se presenta continuamente.

1. Una fase estable se caracteriza por la preservación de las clinofomas de la pendiente.
2. Una fase inicial se caracteriza por lo cerradas y eventualmente espaciadas fallas regionales hasta la cuenca, usualmente sin la complicación de diapiros contemporáneos. Fallas inversas y bordes o domos con núcleos de sal o arcilla se originan a lo largo de la pendiente baja como estructuras compresivas.
3. Una fase dominante de diapiros comienza cuando el borde de plataforma prograda sobre la arcilla o domos de sal formados durante la fase inicial

En una escala local, la evolución puede ser reconstruida con una serie de mapas de isopacas si las correcciones batimétricas apropiadas son hechas. La primera etapa de la evolución estructural, el régimen compresivo, no puede ser reconstruida usualmente porque la última deformación afecta severamente las estructuras anteriores y la perforación no penetra los depósitos de la parte inferior de la pendiente y son sísmicamente transparentes o absorbentes.

La segunda etapa es un estilo típico de fallas lítricas y *rollovers* contemporáneos hasta la cuenca. En la ausencia de calibración de tiempo por la estratigrafía, tasas relativas de crecimiento de la falla pueden ser calibradas con la tasa de expansión. Como en la mayor parte de las fallas, las tasas de expansión más grandes se observan en las estructuras más profundas y declinan permanente en la parte superior de la sección (Shelton, 1984).

La etapa final de la evolución estructural es el estilo de depositación de la plataforma, permaneciendo dentro de un régimen extensional pero aun más débil. La mayoría de las fallas de crecimiento continúan haciéndolo, pero con una tasa muy reducida. Este movimiento es aun suficiente en muchos casos para crear un cierre estructural (Shelton, 1984).

5.3 GÉNESIS DE LOS ROLLOVERS

Los *rollovers* son estructuras comunes de cuencas sedimentarias y en particular de deltas y de márgenes pasivos. Se desarrollan frecuentemente en donde existen estratos de rocas incompetentes (sal, anhidrita, arcillas subcompactadas) a profundidad, ofreciendo zonas potenciales de *décollement* (despegue interestratificado) y permitiendo que la gravedad sea responsable de la deformación con o sin una carga sedimentaria diferencial (atribuida a un delta) (Maudit y Brun, 1998). El origen de un *rollover* se explica por el plegamiento del bloque de techo que se colapsa sobre si mismo, en respuesta al movimiento sobre una falla normal no plana (comúnmente lítrica) (Xiao y Suppe, 1992), la cual tiende a disminuir el echado con la profundidad y finalmente se vuelve paralela a la superficie de *décollement*. Es un fenómeno en regiones en extensión como el Golfo de México (Norte y Noroeste) (Ewing, 1991; Xiao y Suppe, 1992, Maudit y Brun, 1998). Los sedimentos depositados en la fase más activa del fallamiento incrementan considerablemente el espesor de los paquetes plegados.

Un *rollover* está ligado a varios procesos que varían de acuerdo al ambiente tectónico, teniendo como variables asociadas: (1) la forma de la falla, (2) el desplazamiento total después del depósito de una capa, (3) la dirección de movimiento relativo de una partícula en el bloque de techo, (4) la historia de la relación entre la tasa de sedimentación (el factor más importante dada la geometría de una falla) y la tasa de desplazamiento de la falla, y (5) la compactación (Xiao y Suppe, 1992).

5.3.1 MODELO SIMPLIFICADO DE FORMACIÓN DE UN ROLLOVER

Ya que el bloque de techo durante el fallamiento se colapsa para ocupar el espacio dejado entre ambos bloques (Figura 23). El colapso puede ser (1) vertical: el bloque de techo cae verticalmente (muy improbable) o (2) no vertical: el bloque de techo cae en una dirección antitética a la falla normal (Xiao y Suppe, 1992).

Los *rollovers* casi nunca preservan el espesor de la estratificación, dado que el desplazamiento entre estratos es poco común en tectónica extensional, ya que el máximo esfuerzo compresivo es perpendicular a éstos; además geoméricamente es imposible que se preserve para las fallas con un fuerte echado con respecto a la estratificación (Xiao y Suppe, 1992).

Para predecir la dirección de colapso a partir de los mecanismos de deformación tendríamos que saber (1) las orientaciones de las fallas normales y (2) la proporción del desplazamiento en cada conjunto. El colapso se presenta en la dirección de la superficie axial activa y ésta generalmente tiene la orientación de fractura de Coulomb (65° - 70°) (Xiao y Suppe, 1992).

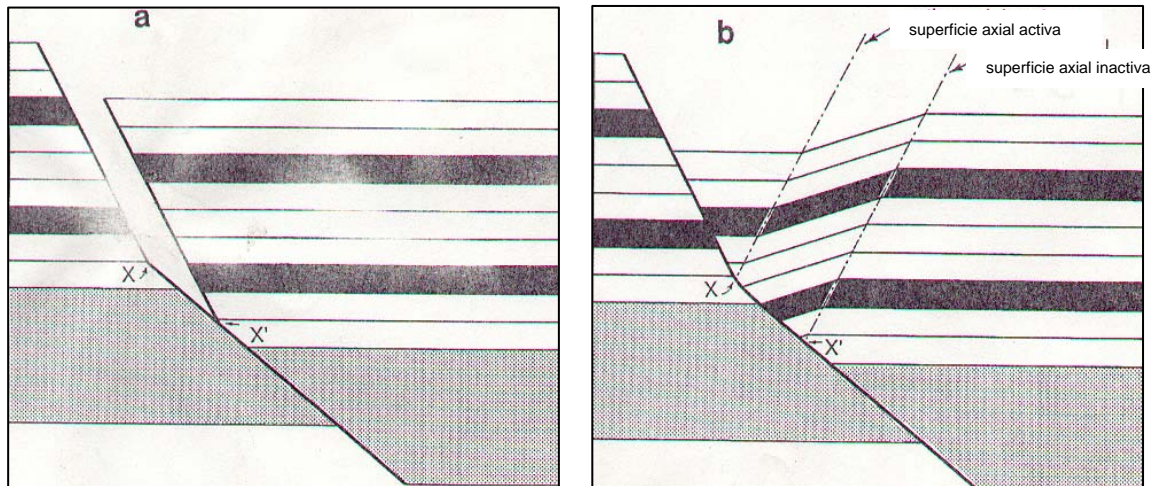


Figura 23. Modelo de desarrollo de un *rollover* con un solo doblez cóncavo de falla, donde se asume colapso en la dirección antitética a la falla normal (Xiao y Suppe, 1992).

5.3.2 SUPERFICIES ACTIVAS E INACTIVAS

El papel de las superficies activas en el desarrollo de un *rollover* se ejemplifica mejor con una falla de un solo doblez. En la Figura 23 se muestra un pliegue como resultado del colapso en la dirección antitética de Coulomb. En el pliegue hay dos superficies axiales con la misma dirección que el bloque de techo colapsado: la superficie axial superior que termina en el pliegue del bloque de piso (x en al Figura 23b) y la superficie axial inferior se termina en el quiebre del bloque de techo (x' en al Figura 23b). El desplazamiento en el segmento inferior de la falla "xx" es menor que en el segmento superior de la falla porque parte del desplazamiento es absorbido por el pliegue (Xiao y Suppe, 1992).

Las superficies axiales siempre se presentan en pares tanto en pliegues de falla compresivos y extensivos, ya que los cortes de los bloques de techo y de piso siempre se presentan en pares.

La superficie que viene del quiebre en el bloque de techo x' es llamada superficie axial inactiva o fija, porque ésta está bloqueada con las rocas del bloque de techo y no se mueve con respecto a éste. La superficie axial que viene del quiebre en el bloque de piso se llama superficie axial activa, porque ésta está en el lugar del plegamiento activo o colapso; esta superficie está fija al bloque de piso y las rocas del bloque de techo pasan a través de ésta cuando se desplaza (Xiao y Suppe, 1992).

Antes del desplazamiento ambas superficies axiales coinciden y el pliegue tiene un ancho de cero. Al desplazarse el bloque de techo, los estratos que pasan por la superficie axial activa se basculan; así los estratos que quedan a la izquierda de ésta se mueven con un vector de

velocidad paralelo al segmento superior de la falla, mientras que los estratos del bloque a la derecha de esta superficie se mueven paralelos al segmento inferior de la falla. El cambio de velocidad se da por la deformación en la superficie axial activa (Xiao y Suppe, 1992).

5.3.3 RELACIÓN ENTRE LA FORMA DE LA FALLA Y LA FORMA DEL PLIEGUE

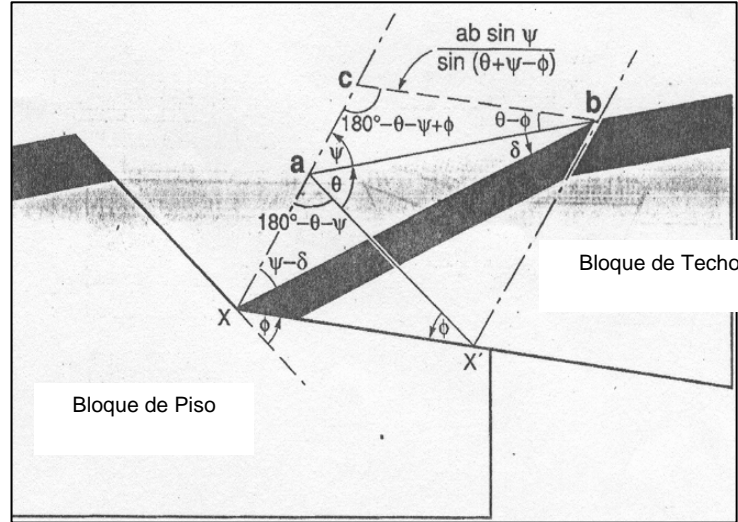


Figura 24. Relación geométrica entre la forma de la falla y la forma del *rollover* para una falla con un solo doblez. El colapso del bloque de techo es en la dirección de la superficie axial (ax y bx). La forma no deformada de las capas inclinadas en bxx' es abx' (Xiao y Suppe, 1992).

Esta relación está dada por la orientación de la superficie axial. Para modelar un caso simple de pliegue (Figura 24), Xiao y Suppe (1992) tomaron el cambio en el echado de la falla como ϕ , y θ como el ángulo de las capas con respecto al segmento superior de la falla. Si el bloque de techo en el segmento inferior de la falla se desplaza una distancia xx' , la superficie de estratificación ab se colapsará para volverse xb y así ocupar el vacío $\Delta axx'$ (en el perfil es el triángulo con vértices en axx'). Las áreas de Δabx y $\Delta axx'$ son iguales porque solamente es el mismo material que se movió para ocupar el hueco de $\Delta axx'$. Aplicando las leyes de los senos a $\Delta axx'$ obtuvieron:

$$\frac{xx'}{\text{sen}(\theta + \psi)} = \frac{ax}{\text{sen } \theta} \tag{1}$$

Donde ψ es el ángulo de colapso medido con respecto a los estratos no deformados. Aplicando la ley de senos a Δabx , obtuvieron:

$$\frac{ab}{\text{sen}(\psi - \delta)} = \frac{ax}{\text{sen } \delta} \tag{2}$$

Donde δ es el ángulo de los estratos dentro del *rollover* medido con respecto a los estratos no deformados. Para hacer la línea cb paralela a la línea xx' y aplicando la ley de senos a Δabx , obtuvieron:

$$xx' = cb = \frac{ab \operatorname{sen} \psi}{\operatorname{sen}(\theta + \psi - \phi)} \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones 1, 2, y 3, relacionamos la forma de falla (θ y ϕ) y la forma del pliegue (δ y ψ).

$$\frac{\operatorname{sen} \psi \operatorname{sen}(\psi - \delta)}{\operatorname{sen}(\theta + \psi - \phi) \operatorname{sen}(\theta + \psi)} = \frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \phi} \quad (4)$$

La ecuación no tiene una solución analítica, por lo que debe ser resuelta numéricamente. Así también las variables pueden tener los siguientes rangos: $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$, $0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ y $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$; donde ϕ es positivo para un pliegue cóncavo y negativo para uno convexo. Si $\theta = \phi$, en el caso donde el segmento inferior de la falla es paralelo a la estratificación, la ecuación (4) se reduce a:

$$\tan \psi = \frac{2 \tan \theta \tan \delta}{\tan \theta - \tan \delta} \quad (5)$$

5.3.4 SUPERFICIES AXIALES DE CRECIMIENTO

Los anteriores modelos son para *rollovers* con estratos preexistentes, sin embargo los estratos depositados durante el desarrollo del *rollover* nos van a arrojar una geometría diferente, ejemplo de ello es la Figura 25 (Xiao y Suppe, 1992).

La superficie axial inactiva se reorienta mientras entra dentro de la zona de crecimiento, lo cual se manifiesta en un estrechamiento progresivo de la banda deformada en la parte superior hasta que éste tiene un espesor de cero en la superficie actual de depósito, donde ambas superficies coinciden. Las capas post-cinemáticas no son tocadas por la superficie axial activa. La superficie que conecta las superficies axiales activas e inactivas se llama superficie axial de crecimiento. Junto con el plano de falla, las tres superficies axiales forman un cerco que delimita la parte deformada (banda *kink*) del bloque de techo.

La superficie axial de crecimiento controla en cada capa la posición de la superficie axial activa en el fondo marino al tiempo de depósito y el cambio abrupto en la tasa de sedimentación de éstas; dando información completa sobre los movimientos de deformación.

El echado de la superficie axial de crecimiento γ depende del echado del segmento inferior de la falla ($\beta = \theta - \phi$) (Figura 27) con respecto a la estratificación, la dirección del colapso del bloque de techo ψ , y la proporción de la sedimentación del bloque de techo sobre el segmento inferior de la falla t_b y la sedimentación del bloque de piso t_f , llamado índice de expansión ($EI = \frac{t_b}{t_f}$) (Figura 27):

$$\cot \gamma = \frac{EI - 1}{EI} \cot \beta - \frac{1}{EI} \cot \psi \quad (6)$$

Estos ángulos se miden con respecto a la estratificación fuera del *rollover*. Generalmente las superficies axiales de crecimiento son curvas porque el índice de expansión a lo largo de la falla cambia con la profundidad.

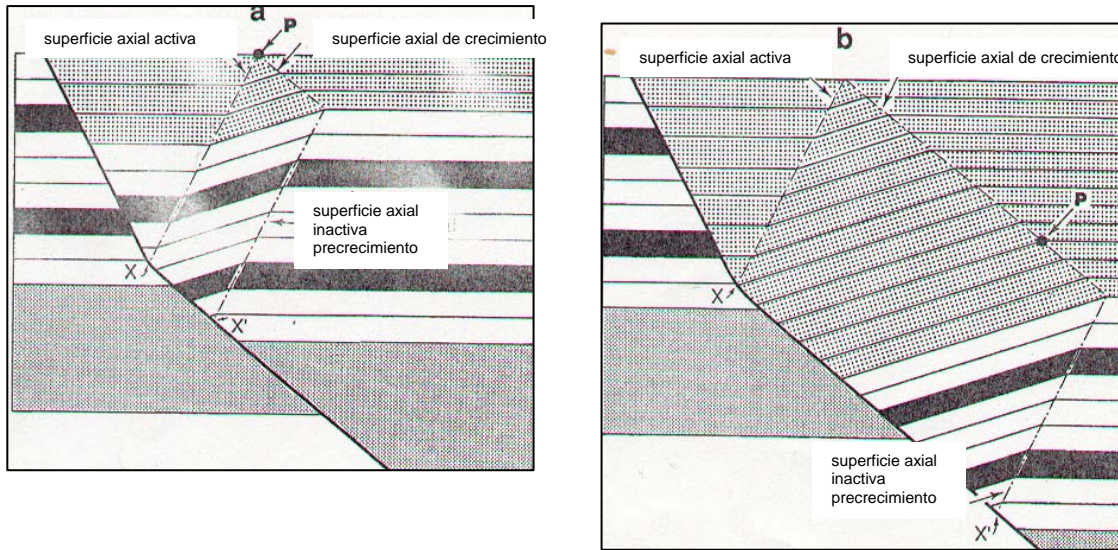


Figura 25. Modelo con dos etapas (a y b) de desarrollo de un *rollover* con un solo doblez cóncavo de falla, con el progresivo desarrollo de un *rollover* con una sola banda de falla; donde se asume colapso en la dirección antitética a la falla normal. La superficie axial de crecimiento es el área opuesta al plano de falla, que delimita a todas las superficies axiales activas durante la formación del *rollover*, ejemplo de ello es la partícula p que se encuentra en la superficie del fondo marino y en el extremo de la superficie axial activa, conforme continua la sedimentación y la deformación, p forma parte de la superficie axial de crecimiento. La banda torcida tiene un ancho cero en el fondo del mar porque la capa acaba de depositarse y no ha pasado a través de la superficie axial activa. Las tres superficies axiales junto con el segmento de falla xx' forma un cerco que incluye a todas las partículas que han pasado a través de la superficie axial activa y después han sido plegados (Xiao y Suppe, 1992).

5.3.5 ROLLOVER CAUSADO POR UN DOBLEZ CONVEXO

Los dobleces cóncavos producen colapsos en la dirección del fallamiento normal antitético. La banda *kink* dentro del cerco axial tiene un sentido normal de cizalla paralela a la superficie axial activa. En un doblez convexo (Figura 26) la orientación sintética para las superficies axiales es mecánicamente más razonable ya que produce un sentido normal de cizalla hacia el *rollover*. Una falla con un doblez convexo con una superficie axial activa sintética que va del quiebre del bloque de piso x, una superficie axial inactiva sintética que va del quiebre del bloque techo x', y una superficie de crecimiento asociada, junto con el segmento de falla xx' forman un cerco cizallado normalmente y sintéticamente (Xiao y Suppe, 1992).

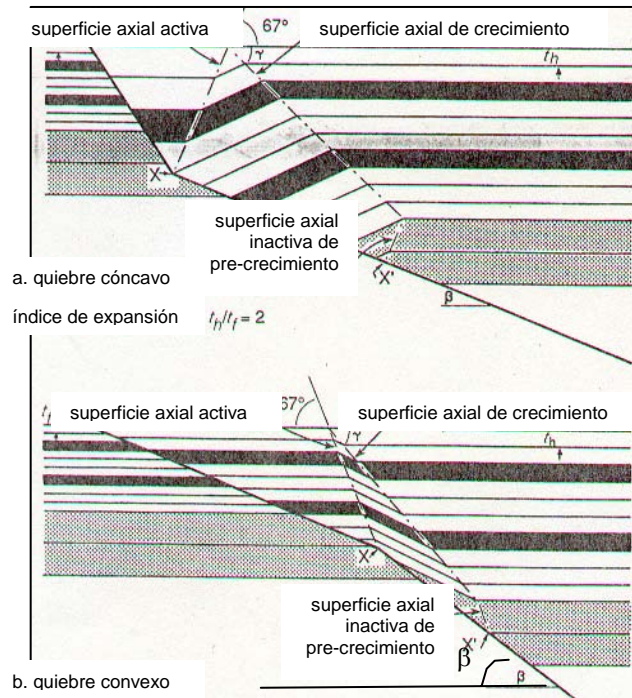


Figura 26. (a) Modelo de desarrollo de un *rollover* con un solo doblez cóncavo de falla, donde se asume colapso en la dirección antitética a la falla normal; (b) modelo de un *rollover* con un solo doblez convexo, donde la dirección de colapso es sintética (Xiao y Suppe, 1992).

5.3.6 PAPEL DE LA TASA DE SEDIMENTACIÓN Y VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO EN LA FALLA

Los cambios en la tasa de sedimentación y en la velocidad de desplazamiento en la falla producen efectos sobre la forma del *rollover* (Figura 27). Esta figura muestra que el echado de la superficie axial de crecimiento incrementa con la tasa de sedimentación y decrece con la velocidad de desplazamiento en la falla.

5.3.7 FALLAS CON MULTIDOBLECES

La mayoría de las fallas tienen más de un doblez y un cerco de deformación asociado, si el movimiento en la falla continúa estos cercos pueden traslaparse. Un ejemplo es (Figura 28) donde el material a la izquierda de la superficie axial activa que está asociada al quiebre del bloque de piso e incluyendo la superficie de crecimiento preexistente asociada al quiebre de piso x , será cizallado por la superficie axial activa. Después de pasar a través de la superficie axial activa, la superficie axial de crecimiento será cizallada a un nuevo ángulo. En el área traslapada por dos cercos de deformación, los estratos se inclinan fuertemente. En el ejemplo los estratos tienen un echado moderado en los cercos de deformación fuera del traslape y fuera de los cercos el echado de los estratos permanece horizontal (Xiao y Suppe, 1992).

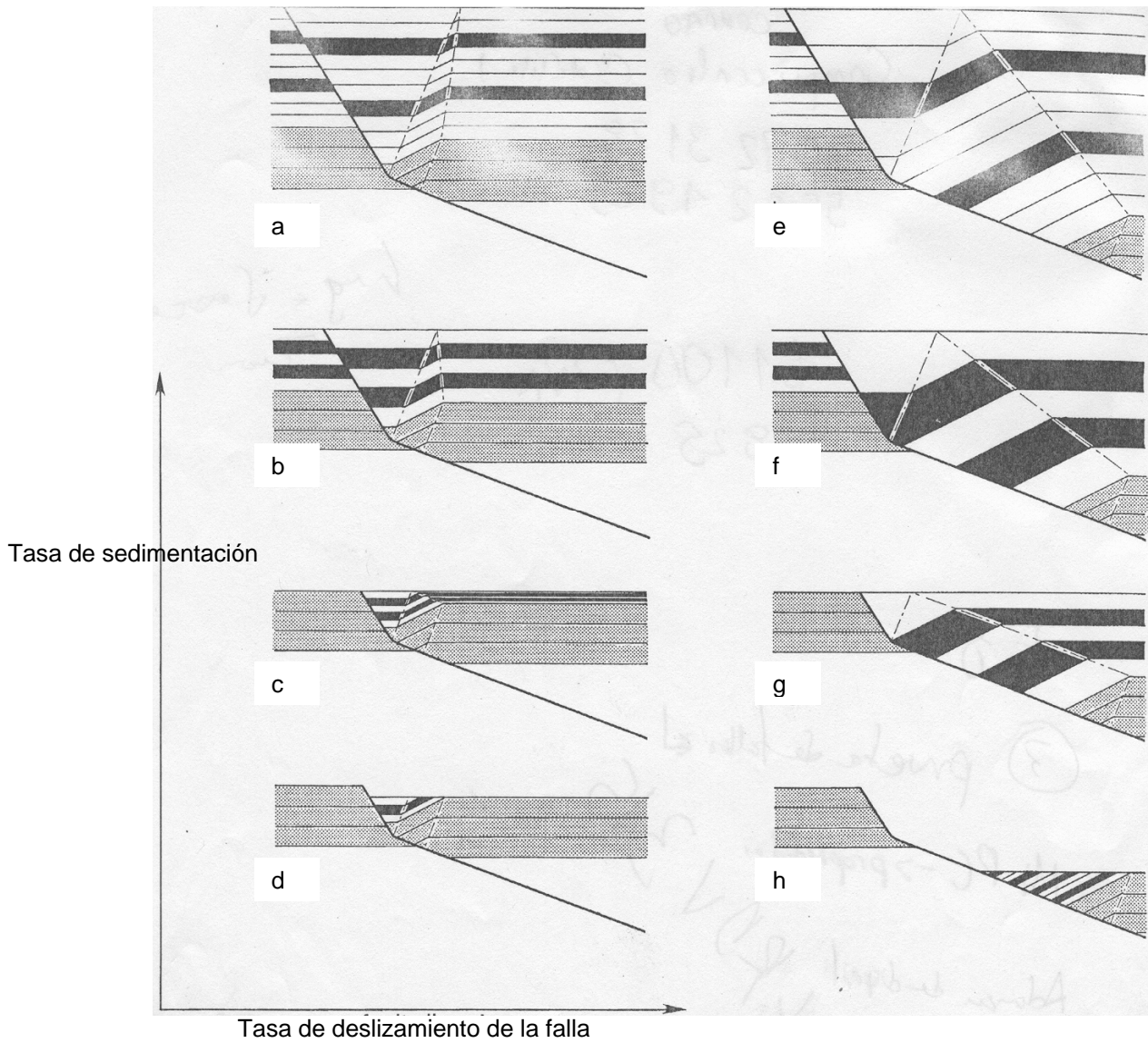


Figura 27. Modelos de geometría de rollover con una forma constante de falla con variables tasas de sedimentación y deslizamiento de la falla. El echado de la superficie axial de crecimiento se incrementa con la sedimentación y se reduce con el deslizamiento de la falla. El área sombreada son los estratos previos a la formación de la falla, mientras que el resto son estratos de crecimiento. El echado se reduce con el índice de expansión, ya que la tasa de sedimentación y la tasa de deslizamiento determinan el índice de expansión (ecuación 6). (a, b) Una alta sedimentación y un pequeño deslizamiento de la falla. (c, d) Una baja sedimentación y un pequeño deslizamiento de la falla. (e, f) Una alta sedimentación y un gran deslizamiento de la falla. (g, h) Una baja sedimentación y un gran deslizamiento de la falla (Xiao y Suppe, 1992).

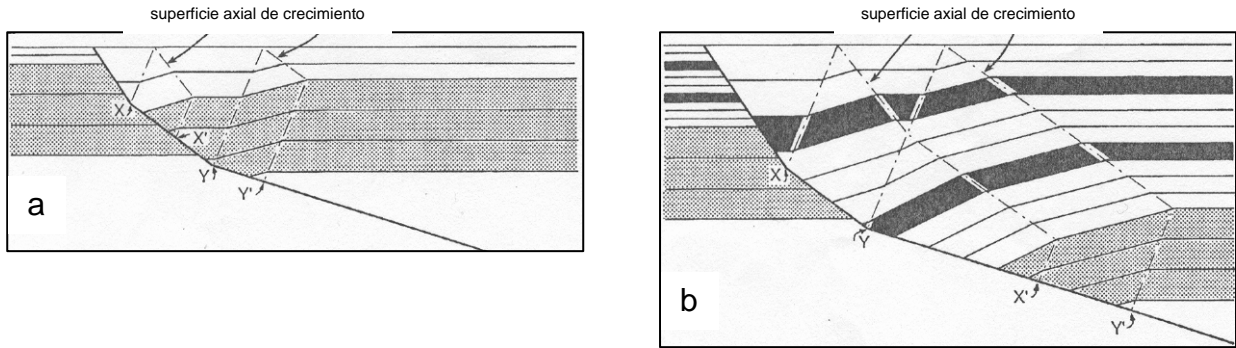


Figura 28. Un *rollover* formado por dos pliegues de falla cóncavos, creando dos áreas de estratos inclinados limitados por dos lazos (líneas punteadas). (a) Los dos cercos aun no se traslapan. (b) Los dos cercos se traslapan. En la intersección de los cercos la inclinación de los estratos es mayor (Xiao y Suppe, 1992).

Un *rollover* con un cierre de cresta puede ser formado por un doblez cóncavo y uno convexo. El doblez cóncavo provoca una estratificación con un echado antitético y el doblez convexo provoca una estratificación con un echado sintético. Al tiempo que el *rollover* se desarrolla dos cercos axiales, xx' y yy' aumentan de tamaño y se traslapan. El esfuerzo varía con respecto a la ubicación en el bloque de techo. El material dentro del cerco xx' pero fuera del área traslapada ha sido sujeto a una cizalla antitética simple. El material en la zona traslapada de los cercos ha sido sometido a una cizalla antitética y sintética, con un esfuerzo resultante originado en mayor medida por la cizalla antitética y evidenciado por el echado antitético de las capas. El material dentro del cerco yy' pero fuera de la zona traslapada ha sido sometido a una cizalla normal simple. El echado fuera de los cercos permanece horizontal (Xiao y Suppe, 1992). Por eso para obtener un pliegue real es necesario modelarlo con muchos dobleces (Figura 29)

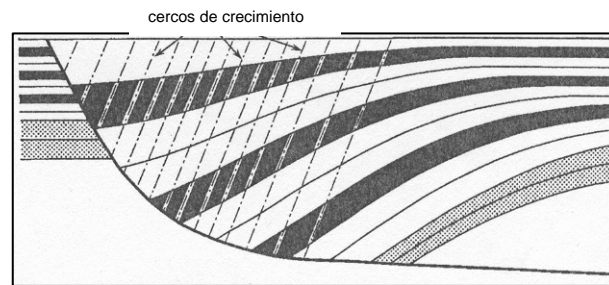


Figura 29. Modelo de Xiao y Suppe (1992) donde se modelo un *rollover* con múltiples dobleces, el cual puede ser equiparado a la forma actual del *rollover* de la Cuenca Chihuix.

5.3.8 COMPACTACIÓN

La compactación reduce sustancialmente el echado de la falla normal de crecimiento. La compactación mecánica instantánea no sólo reduce la amplitud del *rollover*, sino que afecta al bloque de piso reduciendo el echado de la falla, dando como resultado la reducción de la cantidad de cizalla simple en cada una de las superficies axiales activas, y esto a la vez reduce la amplitud del pliegue.

Un ejemplo de la compactación es el presentado por Xiao y Suppe (1992) (Figura 30) donde se modela una falla en arcilla con múltiples dobleces cóncavos y convexos y un índice de expansión variable; en la Figura 30a se muestra una sección con los bloques de techo y de piso no compactados; en la Figura 30b tanto el bloque de techo como el de piso han sido compactados progresivamente, afectando la geometría del plano de falla, el cual reduce su echado y la amplitud del *rollover*. La figura 30c nos muestra la misma falla pero con el bloque de piso compactado y el bloque de piso no lo compactamos obtenemos una forma similar mas no idéntica a la figura anterior.

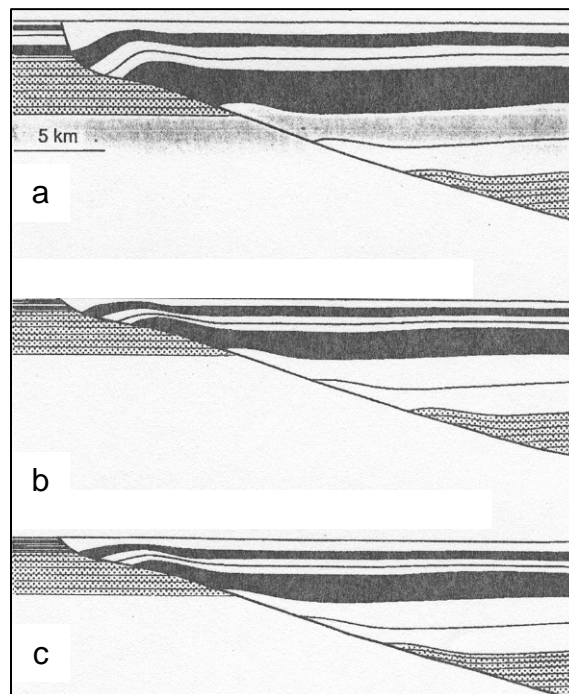


Figura 30. Modelo de computadora de Xiao y Suppe (1992) en el cual se muestra los efectos de la compactación en el desarrollo de un *rollover*. (a) Modelo de un *rollover* con seis pliegues y sin compactación. (b) Modelo con una compactación progresiva. (c) Modelo donde se toma el bloque de piso ya compactado y una compactación progresiva, en el bloque de techo.

5.4 DESARROLLO PROGRESIVO DE UN SISTEMA FALLA DE CRECIMIENTO/ROLLOVER

Maudit y Brun (1998) hicieron experimentos con modelos físicos a escala de las condiciones precinemáticas, cinemáticas y postcinemáticas del origen de una falla de crecimiento/*rollover*, para ello usaron materiales que tuviesen las propiedades reológicas y mecánicas que simulasen las condiciones de los materiales en la naturaleza. Es importante que explique los resultados a que llegaron para tener una idea más clara de cómo interactuaron todas las variables que se pueden aplicar a la evolución de la Cuenca Chihuix.

A diferencia del modelo simplificado del origen de un rollover, Maudit y Brun (1998) consideraron que el bloque levantado podía moverse al igual que el bloque hundido, ya que si consideraban que en los modelos donde el bloque levantado se mantiene fijo solo podía aplicar a fallas de

crecimiento sintéticas en las que su echado tiene la misma dirección que su desplazamiento con respecto al basamento. Esas fallas lístricas pudieran ser cortas y muy inclinadas, y se aplanan a profundidad hasta la zona de décollement. En contra, esos modelos no se pueden aplicar para fallas antitéticas en las que su echado se opone al sentido de desplazamiento; así que no existe una sola superficie o zona de movimiento lístrico desde la falla hasta el décollement y los sentidos de la cizalla son opuestos a lo largo de la falla antitética y de la zona dúctil con respecto al basamento (Figura 31). Hay que aclarar que la zona de décollement con respecto al basamento propiamente no es una falla pero tiene un comportamiento similar (por ser una zona dúctil) (Maudit y Brun, 1998).

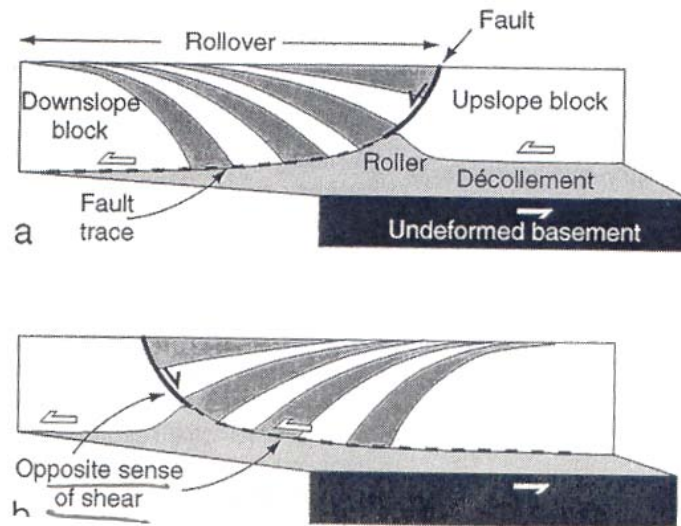


Figura 31. Comparación entre un sistema de falla de crecimiento/rollover (a) sintético y (b) antitético. Downslope block, bloque hundido. Upslope block, bloque levantado. Roller, rodillo. Undeformed basemenent, basamento no deformado. Fault trace, traza de falla. Fault, falla. Opposite sense of shear, sentido opuesto de cizalla (Maudit y Brun, 1998).

Durante el deslizamiento y sedimentación, la columna sedimentaria se engrosa y se alarga como producto de esa movilidad y al mismo tiempo la capa dúctil se adelgaza, por lo que da como resultado un cambio constante entre las capas quebradizas y dúctiles, por lo que el desarrollo de las fallas de crecimiento/rollovers son producto de esa inestabilidad. Así podemos hablar de tres etapas de desarrollo: nacimiento, crecimiento y desmiento.

5.4.1 NACIMIENTO

Durante el deslizamiento en un bloque tabular se forma un graben con una geometría casi simétrica y en su interior se inicia el desarrollo incipiente de un rollover (Figura 32a), donde la falla sintética es la más activa; sin embargo cuando a ambos lados del graben los bloques están basculados, se puede formar un semi graben (Figura 32d). Debajo de los bloques basculados y de las fallas de crecimiento asociadas a los rollovers, existe una estructura llamada rodillo que puede ser plana o cóncava hacia abajo (Maudit y Brun, 1998).

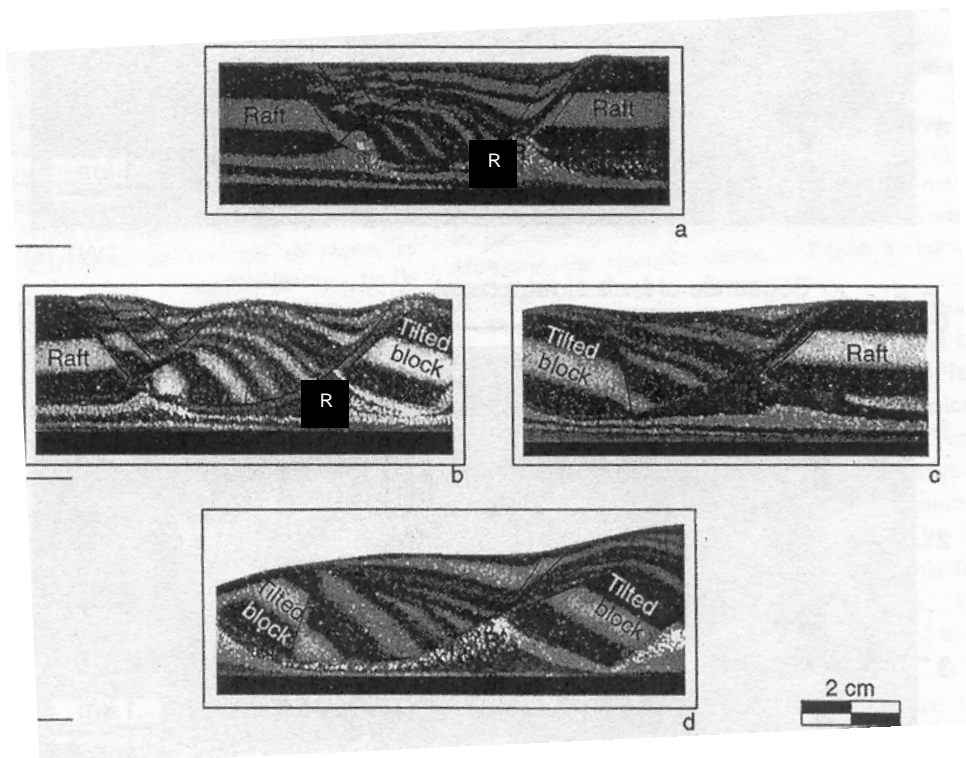


Figura 32. Cuatro tipos de *rollovers*, desarrollados de acuerdo a la naturaleza de los bloques circundantes. (a) Entre dos bloques tabulares, (b) entre un bloque hundido tabular y un bloque levantado basculado, (c) entre un bloque levantado tabular y un bloque hundido basculado, (d) entre dos bloques basculados. R, rodillo, Raft, bloque tabular, Tilted block, bloque basculado (Maudit y Brun, 1998).

5.4.2 CRECIMIENTO

Una segunda etapa de desarrollo es cuando los sedimentos se acumulan en el espacio dentro del graben, contribuyendo al desarrollo del *rollover*, aunque el crecimiento de éste es variable en el tiempo. Si el bloque levantado es un bloque basculado, la falla de crecimiento progresivamente disminuye su echado hasta casi cero (Figura 32b) y si el bloque hundido es un bloque basculado, la progresiva rotación de las capas dentro del *rollover* es acomodado por el bloque basculado, sin producir un fallamiento dentro del *rollover* (Figura 32c, 33a). Cuando el *rollover* se desarrolla dentro de dos bloques tabulares, la rotación de las capas es principalmente acomodada por fallas antitéticas (Figura 33b, 33c, 33d) (que se inclinan opuestas al plano de la falla de crecimiento) o por una conjugación de fallas sintéticas y antitéticas (Figura 33c, 33d), llamados en inglés *keystone graben* (Maudit y Brun, 1998).

Las fallas antitéticas son planas o ligeramente cóncavas hacia arriba, con un fuerte echado y no se modifican durante la de deformación progresiva. Las fallas sintéticas siguen la rotación de las capas; así que mientras más vieja es la falla menor es su echado (Figura 33c, 33d). Los puntos de intersección de las fallas sintéticas y antitéticas en el *rollover* migran hacia el plano de la falla de crecimiento durante la ampliación del graben (Figura 33d). Cuando la falla de crecimiento se aplanan, el *rollover* rápidamente se amplía más y la velocidad de rotación de las capas disminuye e incrementa la velocidad de migración de las intersecciones de las fallas conjugadas dentro del *rollover*.

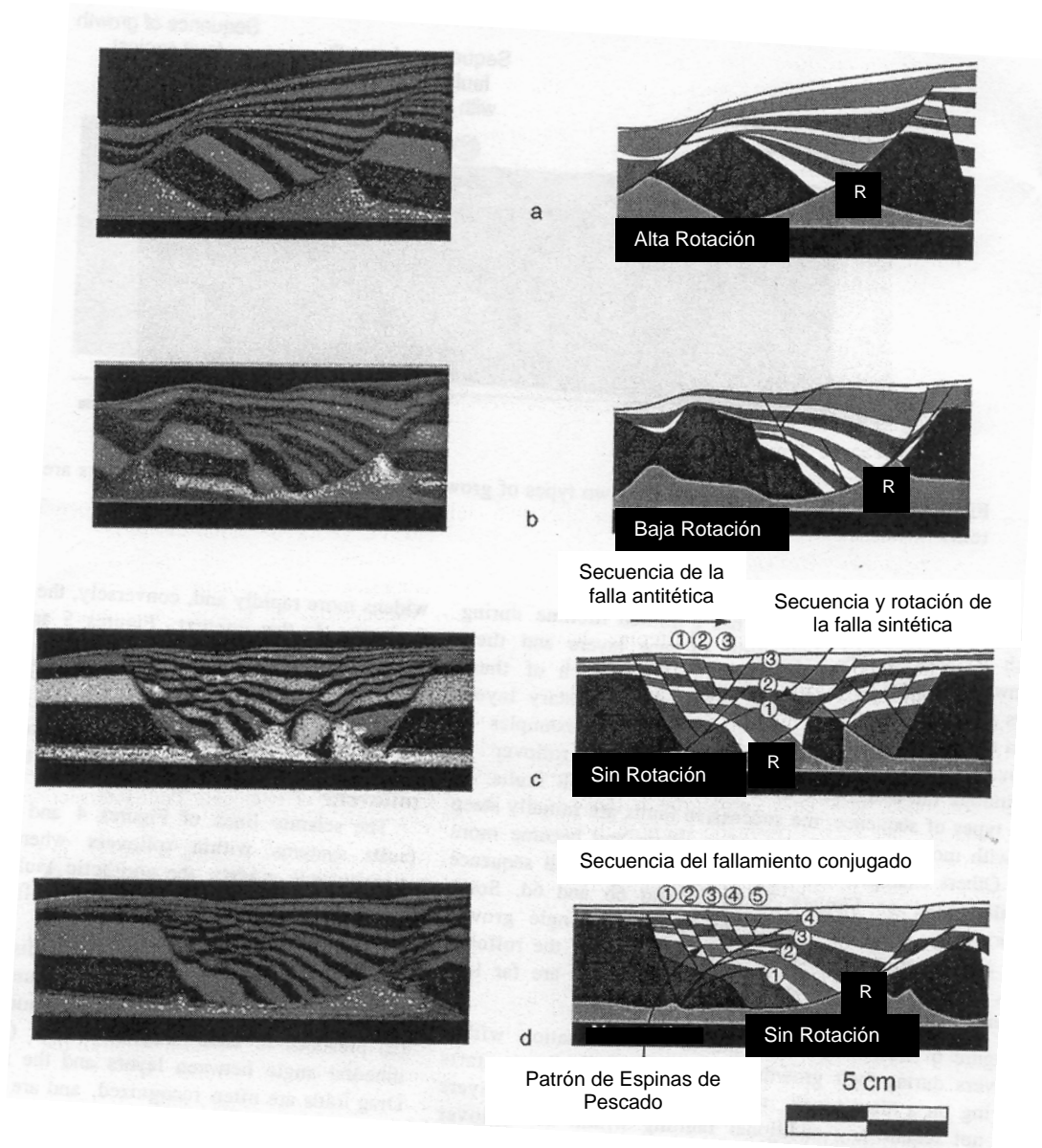


Figura 33. Sección de modelos que muestran los modos básicos de rotación de capas y fallamiento dentro de los *rollovers*. (a) *rollover* creciendo en un bloque basculado. La rotación de las sucesivas capas no requiere de fallamiento adicional dentro del *rollover*. (b) *Rollover* creciendo entre dos bloques tabulares, la rotación de las capas es acomodado por fallas antitéticas. (c) Un incremento en la rotación de capas es acomodado por *keystone grabens*. El echado de las fallas antitéticas no cambia durante la deformación y las fallas sintéticas rotan con las capas; así que mientras más vieja es la falla, menor es su echado. (d) La rotación de fallas sintéticas le da la forma cóncava hacia arriba. R, rodillos (Maudit y Brun, 1998).

5.4.3 DECAIMIENTO

El desplazamiento del sistema de falla de crecimiento/*rollover* va a continuar sobre la zona dúctil hasta que ésta se adelgaza lo más posible y ya no fluye más. En la Figura 34 tenemos simplificado diferentes casos de decaimiento.

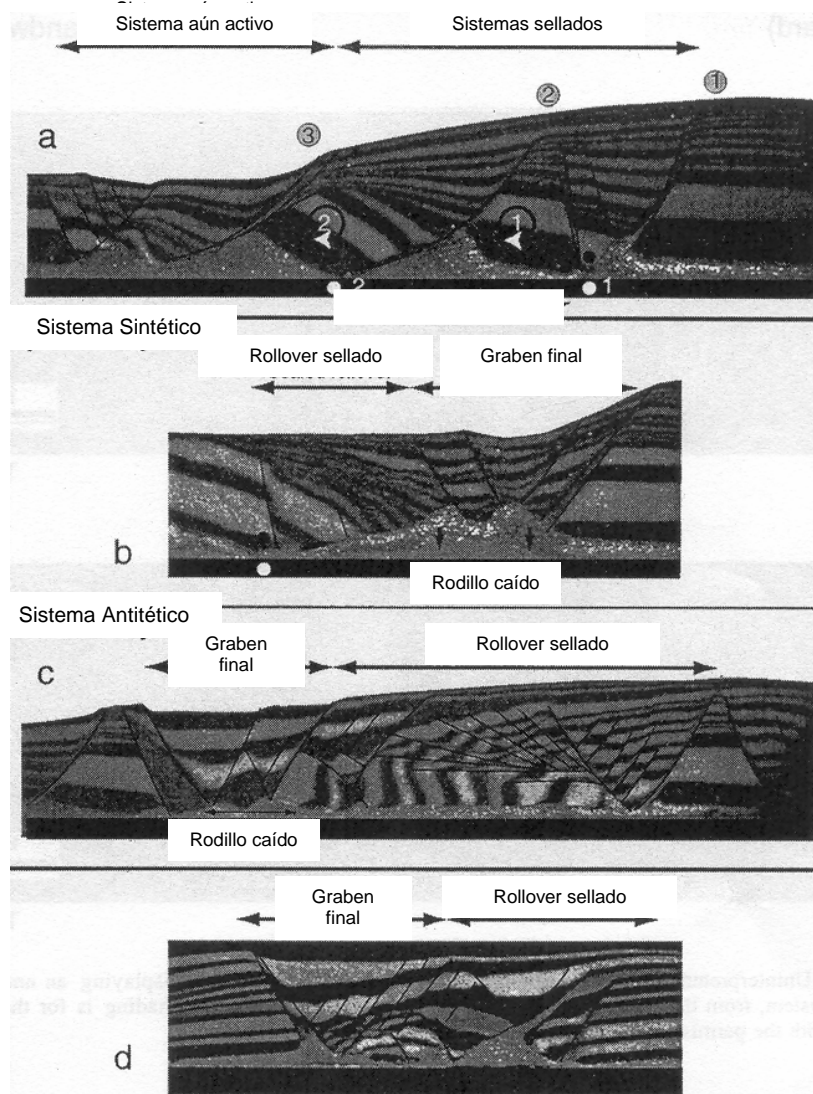


Figura 34. Varios modelos que muestran los tres modos de decaimiento de un *rollover*. (a) una secuencia de fallas de crecimiento. Las fallas 1 y 2 son sucesivamente abandonadas y cubiertas. El desplazamiento es transferido de esas fallas hacia la falla 3 en dirección del mar. (b) La falla principal es reemplazada por un graben en un sistema falla de crecimiento/*rollover* sintético. (c) La falla principal es reemplazada por un graben en un sistema de falla de crecimiento/*rollover* antitético. Cuando el rodillo cae, un conjugado de fallas normales se desarrolla en la cima del rodillo (diapiro) y el crecimiento de la falla es reemplazada por un graben. Hay que hacer notar que en la figura c, el rodillo ha desaparecido totalmente y la base del graben toca casi el basamento. (d) Parte posterior de un *rollover* cortado por un graben, así cuando el graben se amplifica el movimiento de la falla se detiene y es cubierta por nuevas capas (Maudit y Brun, 1998).

En el caso a, el sistema de fallas de crecimiento/*rollover* totalmente sintético, donde las fallas de crecimiento 1 y 2 son abandonadas y cubiertas por los sedimentos, el desplazamiento es transferido a otra falla de crecimiento. En el caso b y c tenemos un sistema de fallas de crecimiento/*rollover* conjugado por fallas sintéticas y antitéticas, en la cual la falla principal es reemplazada por un graben. El *rollover* y el graben es cubierto por sedimentos. Este tipo de

desarrollo corresponde a un colapso del rodillo. El último modo de decaimiento **d**, ocurre cuando la parte posterior de un *rollover* es cortada por un graben, así cuando este se amplifica la falla principal detiene su movimiento y es cubierta por nuevas sedimentos (Maudit y Brun, 1998).

VI CUENCA CHIHUIX

Un hecho que complica la interpretación de la historia de depósito es que ésta no es similar en la parte Sur, Centro y Norte, ya que la continuidad de algunas capas tiende fácilmente a truncarse por el intenso fallamiento en la parte central de la cuenca, es decir en la parte Sur de la cuenca las fallas normales están relativamente menos espaciadas que en la parte Centro y la cantidad de ellas es menor que en la parte Norte, por lo que hacer una continuación de esas capas es muy compleja. La segunda complicación es la Falla Lítrica y la Falla Conjugada que se ha mantenido activa desde su origen y la magnitud de su desplazamiento no es uniforme, siendo que en el Norte esa magnitud es pequeña, en el Centro esa magnitud es mayor y en el Sur de la cuenca esa magnitud es máxima, dado que el mayor aporte de sedimentos se ha dado en la parte Sur, por lo que la potencia de algunas capas puede ser muy grande en un punto de la cuenca y disminuir bruscamente más al Norte.

Dadas todas estas complicaciones lo primero que hice fue tratar de correlacionar algunos reflectores fuera de la cuenca, de los cuales se conocen su edad. Se infiere la edad de los reflectores dentro de la cuenca con la ayuda de la correlación, ya que no hay ningún pozo dentro de la cuenca que nos pueda dar la edad de las secuencias dentro de ella y solamente existía un pozo en el área Lankahuasa al momento de escribir esta tesis (Pozo A), con información muy pobre de la sección estratigráfica de interés (Figura 1).

Dado que el Pozo A tenía objetivos cretácicos, la información de los sedimentos terciarios es de muy mala calidad, ya que sólo se hizo recuperación de las muestras de canal pero posiblemente mezclando varios niveles; así que de los niveles estratigráficos de interés (Plioceno Temprano y Tardío) en este trabajo los tratamos correlacionar dentro de la Cuenca Chihuix, se hicieron a partir de otros pozos (fuera del área de Lankahuasa). Con el conocimiento de la profundidad en donde se hallaban los horizontes de interés, se pudieron construir los sismogramas sintéticos (Anexo A2) que pudieron definir los marcadores en los perfiles 2D que representaban esos niveles estratigráficos: el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.). Usando la sísmica 2D se cercó el área Lankahuasa dentro de un volumen que nos pudiese servir de marco de referencia. Posteriormente se fueron interpretando los perfiles que interceptaban el área Lankahuasa (Anexos B3-B5), para ir cerrando el cerco de interpretación. En la cuenca Lankahuasa pensamos que solamente dos niveles estratigráficos están dentro esta, aunque la veracidad de esta interpretación debe ser comparada en el futuro con pozos. Esta interpretación se hizo siguiendo tanto la forma, la continuidad, la amplitud y la frecuencia de los reflectores dentro y fuera de la cuenca, además de establecer grupos de reflectores como si fuesen secuencias de estratos tanto interna como externamente (a ambos lados de las fallas que delimitan la cuenca); esta forma de separarlos hizo más fácil visualizar grupos con relaciones similares aunque la potencia de cada uno de ellos tuviera un espesor (hablando en tiempo doble) diferente a cada lado de la falla.

Los marcadores del perfil 2D se traslaparon con el cubo sísmico Lankahuasa, dentro del cual se correlacionaron todos estos niveles estratigráficos dentro de la cuenca. Esta fue una de las etapas que más tiempo de interpretación consumió, ya que dado el alto grado de fallamiento el reposicionamiento de estos niveles tenía que hacerse con mucho cuidado y siempre conservando la coherencia en todos los puntos de la cuenca.

El mapa de cada uno de los horizontes estratigráficos se muestra en el Anexo A3, los cuales nos dan su geometría dentro de la cuenca.

6.1 GEOMETRÍA DE LA CUENCA CHIHUIX

Una aproximación para comprender la geometría de la Cuenca Chihuix es imaginar a ésta como un barco en una posición normal (Figura 35). La Cuenca Chihuix vista en planta, en los extremos es menos ancha que en su parte central; vista transversalmente, disminuye su amplitud conforme es más profunda, yendo desde su máxima amplitud en la superficie hasta llegar a cero; vista longitudinalmente conserva básicamente el mismo espesor, salvo en los extremos donde se acuña. La Cuenca Chihuix tiene una longitud en planta de 65 km y en su parte media tiene un ancho de 16 km en promedio, pero en la parte Norte tiene un ancho de 15 km y en la parte Sur de 10 km; la cuenca tiene una orientación NW-SE y es paralela a la línea de costa del Este de México.

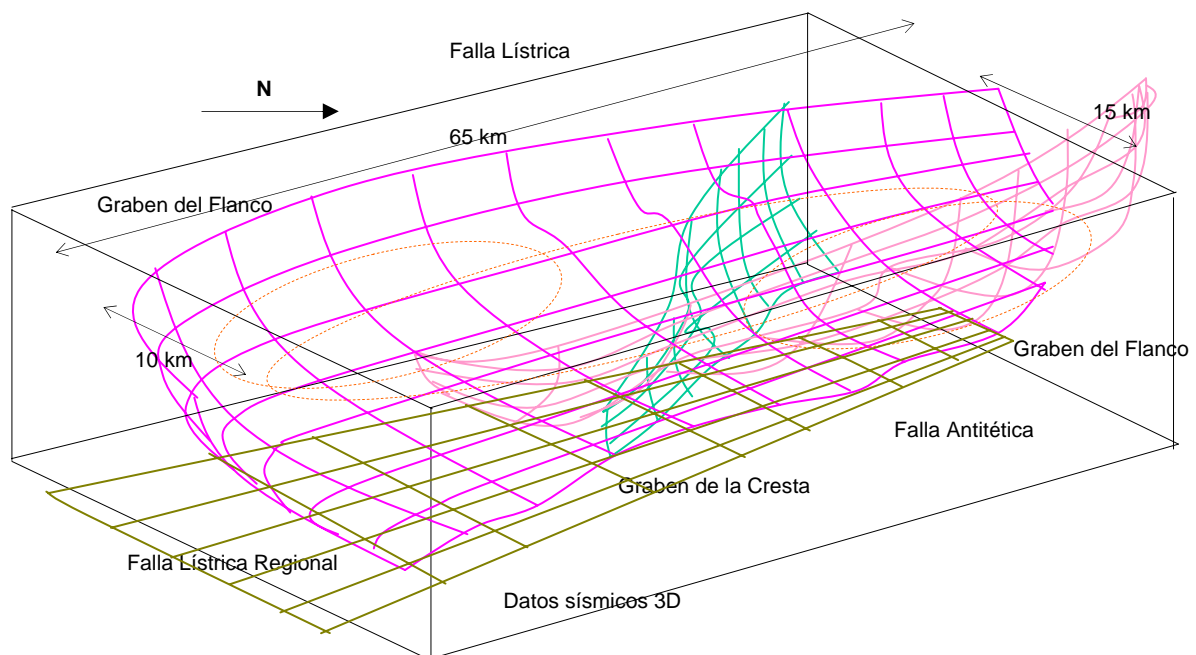


Figura 35. Geometría de la Cuenca Chihuix, el prisma rectangular representa el cubo sísmico Lankahuasa. El enrejado dentro del cubo sísmico representan los diferentes elementos que componen a la Cuenca Chihuix. En líneas violetas tenemos la representación de la Falla Lístrica, en líneas rosadas tenemos la representación de la Falla Antitética, en líneas azules tenemos la representación de las Fallas Transversales, en líneas marrones tenemos la representación de la Falla Lístrica Regional y en círculos discontinuos son los conjuntos de fallas normales: Graben de la Cresta y Grabens de los Flancos.

La potencia de la Cuenca Chihuix derivada de los datos sísmicos es variable con 3700 ms (tiempo doble) en la parte más profunda de la parte Norte y en la parte Sur con 4100 ms (tiempo doble) también en su parte más profunda; así que si tomamos que la velocidad de las arcillas es de 1100-2500 m/s y de las areniscas es de 3000-4500 m/s que representan las litologías más representativas de la cuenca, entonces la velocidad promedio para convertir los datos en

profundidad será de 2700 m/s, así que usando la ecuación de $v=d/t$, la profundidad máxima para la parte Norte es de 5000 m y en la parte Sur de 5500 m.

La descripción anterior es simplificada de una forma mucho más compleja. Para hacer una mejor descripción de la Cuenca Chihuix hay que describir la geometría de los elementos mayores que la componen: una falla regional en la base de la cuenca; tres fallas normales de crecimiento; tres tipos de geometrías de pliegues; tres zonas de grabens. Estos son los detalles de los elementos que le dan la forma actual a la cuenca:

6.2 FALLA REGIONAL

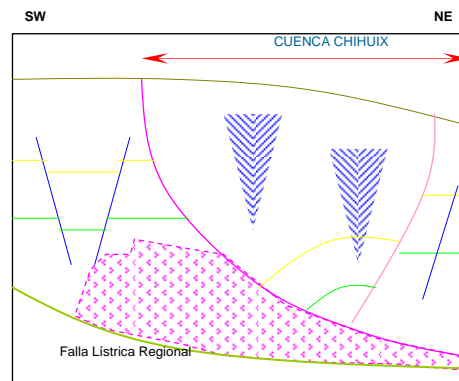


Figura 36. Esquema de un perfil sísmico de la Cuenca Chihuix en su parte Sur, en la parte baja de este esquema se observa la traza de la Falla Lítrica Regional que tiene un echado hacia la cuenca del Golfo de México.

La Falla Lítrica Regional (Figura 36) es una estructura de gran tamaño, ésta comienza en la parte continental y se inclina hacia el NE, yendo desde su parte más somera de la zona de costa hacia la zona de aguas profundas. Por no poseer perfiles sísmicos suficientes de toda la zona marina no se ha definido completamente. Su geometría es de una falla de crecimiento, con una concavidad hacia arriba, con un echado fuerte hacia la costa y pasa a ser horizontal hacia mar adentro, donde termina en grandes estructuras compresivas (pliegues y cabalgamientos). Se orienta paralela a la línea de costa y termina hacia el Sur del área Lankahuasa en una zona de fallamiento lateral. En la parte Norte del área Lankahuasa ésta tiene una pendiente mucho más fuerte y su área de afectación se ve reducida, ya que en la parte Este de Lankahuasa hay un crecimiento arrecifal llamado plataforma de Tuxpan en rocas del Cretácico, el cual actúa como un alto estructural que impide que la falla regional pueda desarrollarse a través de sus rocas, así la falla tiende a penetrar las rocas clásticas del Terciario y cuando sobrepasa la plataforma se inclina mucho más hasta llegar a alcanzar la misma profundidad que en la zona Sur. Estudios regionales de gravimetría han permitido delinear esta falla.

6.3 FALLAS DE CRECIMIENTO

1. La Falla Lítrica o Falla Sintética tiene una orientación NW 30° SE en su mayor parte y se curva en su parte meridional hacia el Este y con un echado hacia el NE y N; como es una falla de crecimiento, en la parte más somera tiene un echado en promedio de 60°-70° y disminuye

conforme se profundiza hasta tener un echado muy cercano a la horizontal y casi paralelo a la estratificación; en su parte más profunda se enraíza en la falla regional (Figura 37).

La longitud de la falla en la parte NW 30° SE es de 65 km aproximadamente y delimita a Chihuix en su parte poniente, cuando cambia de dirección hacia el Este en la parte Sur. Aun no se ha podido cuantificar su extensión. En la parte Norte termina con la reducción del desplazamiento y sustitución por plegamiento. Esta falla está compuesta de múltiples fallas curvas en el plano, que conforman un sistema de fallas en relevos, donde el desplazamiento máximo se da en la parte central de cada falla, pero en los extremos disminuye su desplazamiento hasta llegar a cero; así que cuando va disminuyendo el desplazamiento una falla, la siguiente falla comienza su desplazamiento, sumando los desplazamientos permite que la falla sintética tenga un desplazamiento más homogéneo.

2. La Falla Conjugada o Falla Antitética (Figura 37) tiene una orientación NW 30° SE y con un echado hacia el SW; también por ser una falla de crecimiento en la parte más somera tiene un echado en promedio de 60°-70° y disminuye conforme se profundiza hasta tener un echado de 10°-15° y se termina en el contacto con la primera falla en forma antitética.

La longitud de la falla es de 60 km aproximadamente y delimita a Chihuix en su parte oriental, se termina al Sur y al Norte por una reducción del desplazamiento. Esta falla esta formada por un sistema de fallas en echelon (escalonadas).

3.- La Falla Transversal tiene una orientación NW-SE y con un echado de 65°-75° hacia el NE, siendo éste más pronunciado en comparación con las fallas anteriores, también es una falla de crecimiento que se enraíza en la falla sintética. Es una falla que atraviesa la Cuenca Chihuix y la divide en dos partes; así que sus extremos están en las dos fallas anteriores (sintética y antitética).

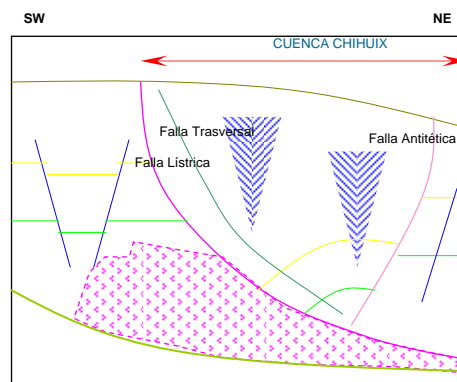


Figura 37. Esquema de un perfil sísmico de la Cuenca Chihuix en su parte Sur, en la parte central de este esquema se observan las trazas de las Fallas Lística, Transversal y Antitética, todas esas fallas son las estructuras más importantes de la Cuenca Chihuix.

La longitud de la falla es de 10 km y está conformada por un sistema de fallas en echelon.

6.4 PLIEGUES

1.- El primer tipo de pliegue se encuentra en la parte Sur de la Cuenca Chihuix, el eje del pliegue coincide con el eje de la cuenca; el plano axial está en la parte cercana a la falla antitética y tiene una forma asimétrica, donde el flanco poniente tiene un echado (40° en promedio) más grande que su flanco oriente (25° en promedio).

2.- El segundo tipo de pliegue se encuentra en la parte central de la Cuenca Chihuix, igualmente su eje coincide con el eje de la cuenca; el plano axial está en la parte media a las dos fallas y el pliegue tiene una forma simétrica, donde ambos flancos tienen la misma inclinación (25° en promedio).

3.- El tercer tipo de pliegue se encuentra en la parte Norte de la Cuenca Chihuix, su plano axial tiene la misma orientación que la cuenca; ese plano axial está en la parte cercana a la falla sintética y por lo tanto el pliegue tiene una forma asimétrica, donde el flanco oriente tiene un echado más grande (50° en promedio) que su flanco poniente (20° en promedio).

Podemos decir que mecánicamente podría haber una continuidad de la creación de estos pliegues, porque en el Sur el flanco poniente actúa con mayor peso que el flanco oriente. En la parte central ambos flancos tienen la misma importancia. En la parte Norte cambia completamente el juego de los flancos, siendo el flanco oriente el que presenta mayor movimiento. La explicación de este cambio de geometría se atribuye al cambio de la pendiente de la falla regional, al tipo de rocas que componen la secuencia y a las rocas subyacentes, con respecto al cambio de pendiente; en la parte Norte existen elementos previos como la plataforma de Tuxpan que crea un aumento brusco (o llamado de otra manera quiebre) en el echado de la falla (se inclina en dirección de mar abierto) que tiene una pendiente suave al oriente de la cuenca y cuando pasa al occidente esta pendiente se vuelve fuerte, por lo que permite un mayor desplazamiento de la falla antitética en comparación de la sintética; en cambio en la parte Sur no existen esos elementos y el echado que es más homogéneo, permitiendo que la gravedad juegue una función más importante y menos compleja sobre los sedimentos. Con respecto al tipo de rocas de las que esta compuesta la Cuenca Chihuix, en los perfiles sísmicos se aprecia que en la parte Sur los prismas del borde de plataforma empiezan a progradarse dentro de la cuenca, es decir que en la base de la cuenca los sedimentos son más finos ya que representan los depósitos más distantes de las plataformas, pero conforme se va ocupando el espacio disponible estos prismas de borde de plataforma avanzan hacia el Este, por lo que empiezan a llegar sedimentos más gruesos y más pesados, por lo que esto hace que se desarrolle más la falla sintética; en cambio en el Norte la plataforma de Tuxpan está debajo de la falla regional funciona casi como un *bypass* o zona de poca deposición, por lo que los sedimentos gruesos se asientan inmediatamente después de esta zona y de esta forma se desarrolla más la falla antitética. Sobre las rocas infrayacentes éstas juegan el papel de permitir fácilmente el desplazamiento en una dirección u otra, por lo que en la parte Sur las rocas infrayacentes son grandes paquetes de lutitas y arcillas, en cambio en la parte Norte han de ser pequeños los paquetes de lutitas y las calizas han de ser preponderantes. A pesar de haber una falla transversal que afecta la Cuenca Chihuix en dos partes, podemos decir que está se presentó posterior al plegamiento simétrico.

6.5 GRABENS

Se denomina graben a un conjunto de fallas normales en enrejado (*keystone graben*) (Figura 38) que usualmente se asocian al eje del pliegue y se supone que se originaron como un graben que fue evolucionando con múltiples fallas en ambos sentidos que se cortan en muchos puntos y dan la forma de enrejado. Básicamente los grabens están asociados al tipo de pliegue, ya que los pliegues asimétricos presentan dos tipos de grabens paralelos dentro del mismo pliegue: un Graben de la Cresta y el otro Graben del Flanco de mayor echado. En cambio en el pliegue simétrico solamente hay un graben. En la parte Sur de la cuenca tenemos dos Grabens paralelos al eje de la cuenca, pero el Graben del Flanco con mayor echado va desapareciendo conforme el pliegue se vuelve simétrico hasta que desaparece completamente cuando el pliegue se vuelve simétrico. De nuevo cuando el pliegue se vuelve asimétrico hacia el Norte, aparece un Graben de la Cresta del pliegue y es paralelo al plano de falla.

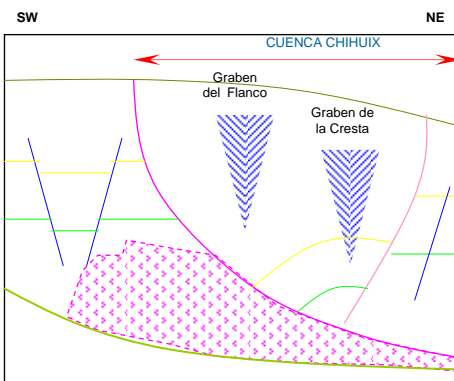


Figura 38. Esquema de un perfil sísmico de la Cuenca Chihuix en su parte Sur, en la parte central de este esquema se observan las trazas del Graben del Flanco y del Graben de la Cresta, Los Grabens cortan el rollover de la Cuenca Chihuix.

6.6 GÉNESIS DE LA CUENCA CHIHUIX

De acuerdo a los horizontes que se han correlacionado dentro de la Cuenca Chihuix, se observa que el inicio de la cuenca fue anterior al Plioceno Inferior (5.2 M.a.) ya que los reflectores inferiores son paralelos y preservan el mismo espesor, por lo que se supone se depositaron en un fondo marino estable y semiplano.

Debido a que hubo un gran aporte de sedimentos clásticos desde la parte occidental (con gran preponderancia de clásticos carbonatados) en un lapso de tiempo muy corto, pasando gradualmente de texturas finas a texturas más gruesas (en la base predominan lutitas y areniscas finas y en la cima areniscas gruesas y conglomerados), probablemente transportados por corrientes de marea que alimentaron el borde de plataforma y el talud. Existen modelos de sedimentación deltaica bien desarrollados para explicar como se puede ver afectado el sistema de fallas de crecimiento por la sedimentación, pero en la Cuenca Chihuix no hay evidencias de deltas para poder aplicarlos.

Algunas características morfológicas y sedimentarias que debieron afectar a la Cuenca Chihuix en su evolución son: (1) depresión flexural de la corteza debido a la carga sedimentaria en una litosfera elástica y a la vez causada por depocentros que progradan; así la máxima subsidencia

corresponde al centro de la carga aplicada, la cual generalmente ocurre en la parte superior del talud o en el borde de plataforma; (2) rápida extensión del borde de plataforma debido al fallamiento normal, el cual causa un notable adelgazamiento de la sección sedimentaria arriba de la zona de despegue, la subsidencia se concentra en la zona que cae de la falla; (3) compactación de la gruesa sección recientemente depositada debajo de los sedimentos (un mecanismo de amplificación).

Los líticos al estar poco consolidados, con un gran contenido de agua y al estar en continuo estado de enterramiento, sufren de esfuerzos en la base que se propagan horizontalmente generando movimientos en las litologías más dúctiles, por lo que las lutitas funcionan como un material donde se propagan mejor estos movimientos en comparación con las texturas más gruesas.

Para hacer un modelo de evolución de la Cuenca Chihuix; primero se tomó como marco de referencia lo explicado en el capítulo anterior sobre el desarrollo de una falla lítrica y de un *rollover*. El segundo paso obligado es tomar los datos sísmicos que se disponen, ya que no se conoce con certeza la litología dentro de la Cuenca Chihuix y las grandes estructuras presentes, por lo que establecer un modelo (ver anexo F1 a F6 y sus explicaciones de cada una de los pasos de evolución de la Cuenca Chihuix) ya sea en computadora o en una caja de arena resulta demasiado complicado; así que traté de recrear la evolución de la Cuenca Chihuix con la forma que tienen cada uno de los bloques y la geometría de la falla con cada uno, ya que la geometría está íntimamente ligada con su evolución; también tomé la analogía de las fallas dentro y fuera de la cuenca, en las cuales se mostrasen diferentes etapas de desarrollo, ya que si éstas se encuentran en el mismo material de la cuenca nos darán algún indicio de como se comenzaron a formar las fallas principales de Chihuix; otro de los elementos a tomar es la forma e inclinación de los reflectores, ya que suponiendo que siguen a la estratificación nos delimiten las zonas axiales activas e inactivas del pliegue de la falla.

En las interpretaciones que realicé para cada uno de los perfiles (ya sea inlines o crosslines) traté de identificar cada uno de los elementos de la falla de crecimiento: las fallas principales, los reflectores que representen la misma edad, la geometría en general de los reflectores, el echado de los reflectores y las relaciones en los cambios de echado. Con todos estos datos se identificaron las superficies axiales activas e inactivas del pliegue de la falla. Toda esta información está esquematizada en un pequeño gráfico que acompaña a cada una de los perfiles (Anexo C, D, E). Esta información me sirvió para entender como se desarrolló el pliegue en cada una de las direcciones y si los cambios en la evolución fueron significativos entre una etapa y otra.

Para hacer una explicación de la evolución de la Cuenca Chihuix hice seis esquemas (Anexo F4-F9) donde se representa cada etapa y con base en estos esquemas se da una explicación más amplia. Hay que resaltar que para una mejor comprensión de la evolución hay que tener en mente el gran aporte de sedimentos (con un espesor promedio de 5000 m) en un tiempo muy corto (de solamente 5.2 M.a.), por lo que hay que resaltar que en su generalidad la cuenca del Golfo de México ha tenido un proceso muy rápido de subsidencia asociado a una fuerte extensión en dirección hacia el Atlántico, para haber creado el espacio suficiente para tal acumulación de sedimentos.

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

La Cuenca Chihuix es un hundimiento estructural que se originó en un margen pasivo durante el Plioceno Temprano, en la parte Este de la Cuenca Tampico-Misantla, resultado de una falla lítrica que cortó una secuencia clástica miocénica y generó el espacio suficiente para el depósito de otra secuencia clástica, por lo que desarrolló características estructurales y sedimentológicas conspicuas que la diferenciaron de las estructuras adyacentes; así que se decidió llamar Cuenca Chihuix a este hundimiento estructural.

La secuencia clástica que relleno la Cuenca Chihuix se depositó en un medio de plataformas que progradaban; ya que el Sierra Madre Oriental, al Oeste de la cuenca, aportó los materiales para el relleno de la misma. La tasa de sedimentación fue muy alta, ya que en 5.2 M.a. se depositó un espesor de 5000 m de sedimentos. Debido al tipo de deformación y a la información del pozo A en el área Lankahuasa, infiero que existe en la Cuenca Chihuix una columna litológica que en la base está compuesta por arcillas y en la cima son arenas y conglomerados.

La falla lítrica fue generada por la presencia de un depocentro en su parte media, pero ésta fue incrementando su tamaño hacia los lados y en profundidad, por lo que en un punto de su evolución alcanzó a tocar una falla lítrica regional, por lo que el desplazamiento se transmitió a través de la falla regional. En las fallas normales que delimitan a la cuenca es claro como un conjunto de fallas menores tiene un desplazamiento total igual al de una falla mayor.

Al poco tiempo se formó una falla antitética; así ambas fallas delimitan a esta cuenca y juegan un papel fundamental en el control del volumen y textura de los sedimentos que entran a la cuenca y al mismo tiempo ambas fallas permitieron que la Cuenca Chihuix aumentara de tamaño.

La Cuenca Chihuix tiene una forma en el espacio de barco; donde La falla antitética corta a la falla lítrica se forma la quilla, la parte más ancha estaría en la parte más somera y vista en planta la Cuenca Chihuix tiene forma de huso. Existe una falla normal transversa en la parte media que corta a la cuenca en dos partes. Además los reflectores están plegados en un *rollover*. El *rollover* se encuentra entre dos fallas normales pero tiene tres geometrías diferentes dependiendo de su ubicación dentro de la Cuenca Chihuix: (a) en la parte Norte es asimétrico y el plano axial de este corre paralelo y cercano a la falla antitética; (b) en la parte central es simétrico y su plano axial es paralelo a ambas fallas; (c) en la parte Sur es asimétrico y su plano axial es paralelo y cercano a la falla lítrica. En cada cresta de los *rollovers* hay un graben y en los asimétricos hay un graben en el flanco de pendiente más suave.

La formación de cada uno de los elementos de la Falla se da en tiempos diferentes, siendo la Falla Lítrica la primera en formarse y tiempo después la Falla Antitética. Al inicio ambas Fallas crecieron simultáneamente al tiempo que se captaban los sedimentos. Una primera etapa fue el incipiente desarrollo de un *rollover* o de una forma más precisa el plegamiento antitético simétrico en toda la cuenca. Pero conforme crecía la cuenca este plegamiento iba aumentando de magnitud, pero no se desarrollo de una manera uniforme, ya que en la parte Norte la Falla Antitética tuvo un mayor desarrollo en comparación con la Falla Lítrica y en el Sur es mayor el

desarrollo que la Falla Lútrica; así que en el centro se contrarrestaban ambos procesos y por eso el plegamiento permaneci6 simétrico. Ya que ambas Fallas actuaban de una forma asimétrica (dominando el fallamiento sintético en el Sur) se creó una Falla Transversal en el centro de la cuenca. Las últimas etapas son el mayor basculamiento hacia el Sur de la parte de la cuenca en la porción Sur, en comparación a la porción Norte donde este basculamiento casi no se sintió. En la última etapa se generaron los grabens como producto de la continua extensión de la cuenca y éstos se propagaron en profundidad en la cuenca.

La Cuenca Chihuix es un hundimiento estructural que se mantiene en continuo crecimiento y que actualmente controla la topografía del piso marino.

La Cuenca Chihuix potencial petrolero muy bueno, ya que presenta todos los elementos necesarios para la existencia de hidrocarburos. Si habláramos del play en esta Cuenca en principio tenemos como roca generadora a una de las formaciones arcillosas con alto contenido de materia orgánica del Cretácico (posiblemente las mismas formaciones que sirvieron como rocas generadoras de los campos de Tuxpan) que se encuentra debajo de la columna clástica terciaria, aunque en posteriores estudios se podrá determinar si existe dentro de la secuencia terciaria otros cuerpos con hayan tenido el contenido orgánico, hayan alcanzado las temperaturas, presiones y el tiempo suficiente necesario para la maduración de esta materia orgánica para atravesar la ventana de los hidrocarburos. Las rocas almacenadoras dentro de la Cuenca Chihuix, pertenecen a aquellas litologías que son más jóvenes que los horizontes de interés para PEMEX, ya sea tanto del Plioceno Inferior como del Plioceno Superior, porque esos límites representan superficies de erosión y debajo de esos horizontes las litologías están compuestas por areniscas de grano grueso intercaladas con conglomerados; pero hay que hacer un estudio petrofísico de esas litologías para determinar el grado de porosidad y de permeabilidad y así determinar si son potenciales rocas almacenadoras de hidrocarburos. Las rocas sello dentro de la Cuenca Chihuix son aquellas que se encuentran por encima de los horizontes de interés para PEMEX, ya que las rocas que se depositaron por encima del Plioceno Inferior y Plioceno Superior están compuestas por arcillas; aunque no se sabe con certeza la calidad de esas rocas sello, porque debido a la continua evolución de la Cuenca Chihuix y al movimiento continuo de toda la columna estratigráfica, es probable que estas rocas sello se encuentren fracturadas o falladas y ya no cumplan con su función de impedir la migración de los hidrocarburos. Si habláramos de trampas principalmente hablaremos de trampas estructurales aunque por el cambio horizontal del tipo de materiales depositados no se descartan las trampas estratigráficas o una combinación de ambas. Las trampas estructurales consistirían básicamente del pliegue antitético creado por el *rollover* y por las fallas normales que forman el Graben de la Cresta y el Graben del Flanco y por una combinación de Fallas y el pliegue que pondrían en contacto rocas almacenadoras con rocas sello. Las trampas estratigráficas serían aquellas que dentro de un mismo horizonte basculado dentro de la Cuenca Chihuix cercano a las Fallas Lútrica o Antitética estarían constituido por materiales de una granulometría más gruesa y conforme se avanza perpendicular al rumbo de Falla esa granulometría va reduciéndose y posiblemente llegando a zonas con arcillas, por lo que de esta forma la granulometría actuaría como trampas estratigráficas. Si habláramos de migración secundaria es muy posible que después de haber sido expulsado los hidrocarburos de las rocas mesozoicas ellos hallan viajado a una zona de menor profundidad y de menor presión hidrostática y para ello hallan utilizado la Falla Lútrica Regional como zona de paso hacia la Cuenca Chihuix y después dentro de la Cuenca, la Fallas

Lístrica y la Falla Antitética hayan servido de camino para la continuación de la migración de los hidrocarburos para ponerlos en contacto con las rocas almacenadoras que ya se encuentran basculadas. Con respecto al *timing* o calendarización de los sucesos, podemos decir que tanto la formación de las rocas almacenadoras como de las rocas sellos se dio posteriormente a la formación de las rocas generadoras que se encuentran más profundas y ya tenían la capacidad de alimentar a las rocas almacenadoras cuando ellas se depositaron; además la formación de las trampas estructurales y estratigráficas se dio casi simultáneamente a la formación de las rocas almacenadoras y rocas sello y continuaron su formación después, por lo que las trampas se formaron en un momento adecuado para la acumulación de hidrocarburos.

Hablando específicamente de la importancia de los *rollovers* para la formación de trampas petroleras, creo que han sido ampliamente estudiados en márgenes pasivos ya sea de la costa occidental de África como de la parte correspondiente al Golfo de México en Estados Unidos y en muchos de los casos por la geometría interna de las rocas se puede decir que son de las mejores trampas estructurales siempre y cuando el fallamiento interno no corte la totalidad del espesor de las rocas sello dentro de la cresta de los pliegues antitéticos que se forman.

Por último hablaremos del sistema de esfuerzos que generaron la Cuenca Chihuix, el esfuerzo principal (σ_1) es vertical, producto del peso producido por una rápida acumulación de materiales provenientes de la costa. El esfuerzo secundario (σ_2) es de extensión y es paralelo a la orientación de la Cuenca Chihuix (NW 30° SE) y su sentido es hacia el NW, porque en esa dirección se produce una parte del movimiento de apertura de las fallas lístrica y antitética. El esfuerzo terciario (σ_3) es de extensión también y tiene una dirección perpendicular a la orientación de la Cuenca Chihuix (NE 60° SW) y su sentido es hacia el NE, en dirección al centro de la cuenca del Golfo de México.

7.2 RECOMENDACIONES

Elaborar un mapa de isopacas detallado para encontrar los depocentros que se fueron formando con el tiempo y así obtener una explicación a la evolución de la Cuenca Chihuix.

Hacer un pozo exploratorio en la cuenca para poder aclarar muchas incógnitas, como el tipo de litología detalladamente, los horizontes dados por los microfósiles y poder hacer una conversión a profundidad con mayor precisión de la cuenca.

Con la conversión a profundidad hacer una sección balanceada para poder colocar en el espacio de una manera coherente los elementos aquí descritos y comprender así su evolución.

BIBLIOGRAFÍA

Aranda Mario, 2000, *Geología Estructural y potencial gasífero en el cubo Lankahuasa*. Estudio de la Geología Estructural regional inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Bertram G. T., 2000, *Sequence Stratigraphy*. Ri Stratigraphic Research International, pp. 10.

Bove Marie, 2000, *Stratigraphie de sequences*, ENSPM, cuaderno de notas, pp. 45.

Dula William, 1991, *Geometric models of listric normal faults and rollover folds*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 75, No. 10, pp. 1609-1625.

Galloway William, 1989, *Genetic stratigraphic sequences in basin analysis II: application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 73, No. 2, pp. 143-154.

Karl A. Herman, Carlson P.R., y Cacchione, 1983, *Factors that influenced sediment transport at the shelfbreak*. SEPM Special Publication, No. 33, p. 219-321.

Lavergne Michel, 1989, *Seismic Methodes*. Éditions Technip, pp. 172.

Maudit Thomas AND Brun Jean Pierre, *Growth fault/rollover systems: Birth, growth, and decay*. Journal of Geophysical Research, V. 103, No. B8, pp. 18119-18136.

Maudit Thomas y Brun Jean Pierre, *Growth fault/rollover systems: Birth, growth, and decay*. Journal of Geophysical Research. Vol. 103, No. B8, pp. 18119-18136.

McCly K. R., 1996, *Recent advances in analogue modelling: uses in section interpretation and validation*. Geological Society Special Publication, No. 99, pp. 201-225.

Morley K. Chris, 1999, *Patterns of displacement along large normal faults: implications for basin evolution and fault propagation, based on examples from East Africa*. AAPG Bulletin, V. 83, No. 4, pp. 613-634.

Mougenot D., Boillot G., y Rehault J.P., 1983, *Prograding shelfbreak types on passive continental margins: some European examples*. SEPM Special Publication, No. 33, pp. 61-77.

Nemec W. et al., 1998, *Anatomy of Collapsed and Re-established Delta Front in Lower Cretaceous of Eastern Spitsbergen: Gravitational Sliding and Sedimentation Processes*. AAPG Bulletin, V. 72, No. 4, pp. 454-476.

PEMEX Exploración y Producción, 1999, *Las reservas de hidrocarburos de México*, V. I, p. 199.

PEMEX Exploración y Producción, 1999, *Las reservas de hidrocarburos de México*, V. II, p.398.

Ramasayer G. R., 1979, *Seismic stratigraphy; a fundamental exploration tool*. OTC proceedings, V. 3, pp. 1859-1867.

Riojas Margarita, 1999, *Estudio bioestratigráfico de los foraminíferos del pozo A*. Estudio paleontológico inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Rodríguez Joel, 2000, *Estudio bioestratigráfico y paleoecológico en detalle del nanoplancton del pozo A*. Estudio paleontológico inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Salvador A., 1991, *The Gulf of Mexico basin*. Geological Society of America, V. J, pp.245-324.

Sánchez Román, 2000, *Importancia de los sistemas progradantes en la exploración del proyecto Lankahuasa activo Misantla - Golfo de México*. Estudio estratigráfico inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Sánchez Román, 1991, *El Comportamiento del Basamento en el área Sardina-Lamprea y sus Implicaciones Tectónicas*. Estudio gravimétrico inédito del Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Shelton John, 1984, *Listric normal faults: an illustrated summary*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 68, No. 7, pp. 801-815.

Stewart S.A: y Argent J. D., 2000, *Relationship between polarity of extensional fault arrays and presence of detachments*. Journal of Structural Geology 22, pp. 693-711.

Vázquez Pedro, 2000, *Reporte petrológico del pozo A*. Estudio petrográfico inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Vélez Daniel, 2000, *Potencial gasífero de los plays terciarios de la plataforma continental del activo Misantla--Golfo de México*. Estudio inédito del PEP, Activo Misantla-Golfo de México, PEMEX.

Winker Charles y Edwards Marc, 1983, *Unestable progradational clastic shelf margins*. SEPM Special Publication, No. 33, pp. 139-157.

Xiao Hongbin y Suppe John, 1992, *Origin of Rollover*, AAPG Bulletin, V. 76, No. 4, pp. 509-529.

ANEXO A

ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA LANKAHUASA

Lámina A3. En esta lámina se muestra la columna estratigráfica que fue construida a partir de los datos del Pozo A que está dentro del cubo sísmico Lankahuasa (su ubicación dentro del cubo se muestra en la Figura 4), pero fuera de la Cuenca Chihuix. Como se puede observar en la parte basal de la columna tenemos areniscas y lutitas del Mioceno Medio Inferior que fueron depositados en un ambiente profundo, que se depositaron en la parte baja del talud continental. Posteriormente como límite de secuencias tenemos un depósito de material volcánico, con la presencia de tobas.

Ya en el Mioceno Medio Superior encontramos que en la base existen conjuntos de areniscas y conglomerados que progradan a una secuencia de lutitas y arcillas dúctiles; estos depósitos fueron formados en un ambiente de abanico submarino y dentro de la sección sísmica esas lutitas y arcillas nos dan como respuesta un conjunto de reflectores caóticos o definitivamente la ausencia de ellos. Es posible que las Fallas Lítrica y la Falla Antitética que conforman la Cuenca Chihuix se hallan formado dentro o sobre esta secuencia que habrá servido de material dúctil que ayudo al desplazamiento de esas fallas así como del material sobreyace.

Después hay otro límite de secuencia con la presencia de una superficie de erosión sobre el Mioceno Medio Superior y posteriormente fue rellena con materiales con texturas variadas, que iban desde conglomerados, pasando por areniscas hasta lutitas en la base del Mioceno Superior; posiblemente asociados a un sistema de cañones y canales de aguas profundas. En la cima del Mioceno Superior tenemos el depósito de areniscas y lutitas que fueron depositados en un ambiente de abanicos submarinos progradantes.

En el Plioceno Superior tenemos una secuencia de areniscas y lutitas, asociado posiblemente a un conjunto de formas sigmoideas progradantes de un borde de plataforma.

En el Pleistoceno tenemos la presencia de conglomerados, areniscas y lutitas, asociadas a un medio de depósito de plataforma.

En la parte superior derecha de la lámina hay un esquema que muestra el medio de depósito de los sedimentos del Pozo A, la interpretación que se hace de ellos es que pertenecen desde la base del pozo hasta la cima como: depósitos de talud, depósitos de abanicos submarinos, depósitos de borde de plataforma y depósitos de plataforma en una secuencia progradante; además nos da una referencia de su posición batimétrica. Las lutitas y areniscas de grano fino están representadas en azul. Las areniscas de grano medio están representadas en amarillo y las areniscas de grano grueso y los conglomerados están representados en verde.

En la parte inferior derecha tenemos un perfil sísmico 2D que se encuentra al Sur de la Cuenca Chihuix, en los que se muestran los diferentes marcadores en varios colores que representan los diferentes límites de edades dentro de la región Lankahuasa. Junto a este perfil tenemos una columna estratigráfica simplificada en donde están escritas esas edades. Este perfil es característico de la región Lankahuasa, ya que casi no ha sido deformado ni fallado. En él se pueden ver las diferentes formas sigmoideas que representan los bordes de plataforma que progradan, agradan y vuelven a programar.

Lámina A4. En la columna izquierda tenemos la posición del Pozo A dentro de un perfil sísmico 2D. Con los datos obtenidos de algunos registros geofísicos del Pozo A, se elaboró un sismograma pseudosintético en la columna del centro, donde se pusieron los niveles estratigráficos de interés: Plioceno Inferior (en verde) y Plioceno Superior (en amarillo) y a que tipo de onda correspondía; así de esta forma se pudieron empatar tanto el sismograma pseudosintético con el perfil sísmico y el resultado en la columna derecha. Con esta información sobre el perfil sísmico se pudo hacer una correlación de estos horizontes dentro del área Lankahuasa y con esa correlación se llegó a la Cuenca Chihuix.

Lámina A5. Después de haber correlacionado los horizontes del Plioceno Inferior y Plioceno Superior dentro de cada inline y crossline de la Cuenca Chihuix, se elaboró un mapa estructural de cada uno de estos horizontes, dando como resultado su forma y su posición relativa en profundidad en tiempo doble, es decir un mapa donde cada color representa una profundidad determinada; así que para una profundidad más somera el color va a ser rojo y conforme va profundizando se torna amarillo, pasando por un color verde hasta llegar a un tono azulado y en la parte más baja un tono azulado oscuro.

Dentro de cada uno de esos mapas, hay partes que están oscuras, la razón principal de que existan estas zonas se debe a la presencia ya sea de discontinuidades de la cuenca en sí como fallas o fracturas o que en algunas partes de la cuenca no se pudo llevar a cabo una buena correlación de esos horizontes en algunas inlines o crosslines.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL CUBO SÍSMICO LANKAHUASA Y EL POZO A

Imagen de Sánchez, 2000

SERIES	LITOLOGIA Y AMBIENTES
PLIO-PLEISTOCENO	M.A. Conglomerados, Areniscas y Lutitas de Plataforma.
	3.4 Areniscas y Lutitas en Sistema Progradantes.
	5.2 Areniscas y Lutitas en Sistema Progradante y Abanicos Submarinos.
	10.2 Areniscas y Conglomerados y Lutitas en Sistema de Cañones y Canales
MIOCENO	Zona sin Reflexión Lutitas y Arcillas Dúctiles
	12.5 Areniscas y Conglomerados de Abanicos Submarinos ¿Volcánico?
	MEDIO INFERIOR Areniscas y Lutitas de Ambientes Profundos

Imagen modificada de Vélez, 2000

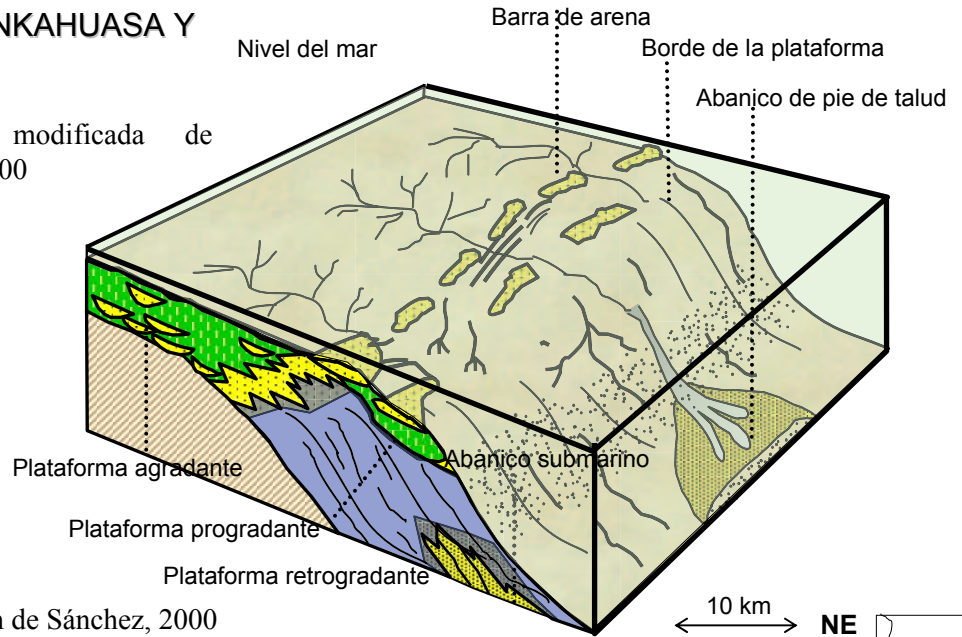
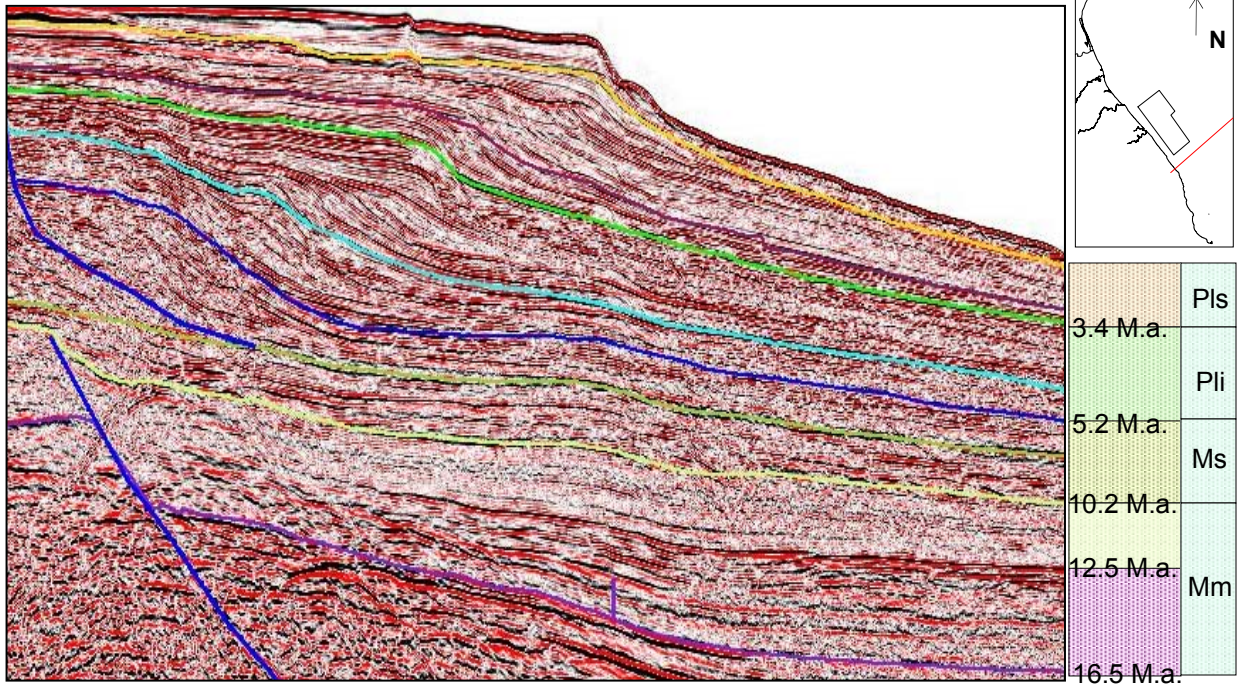
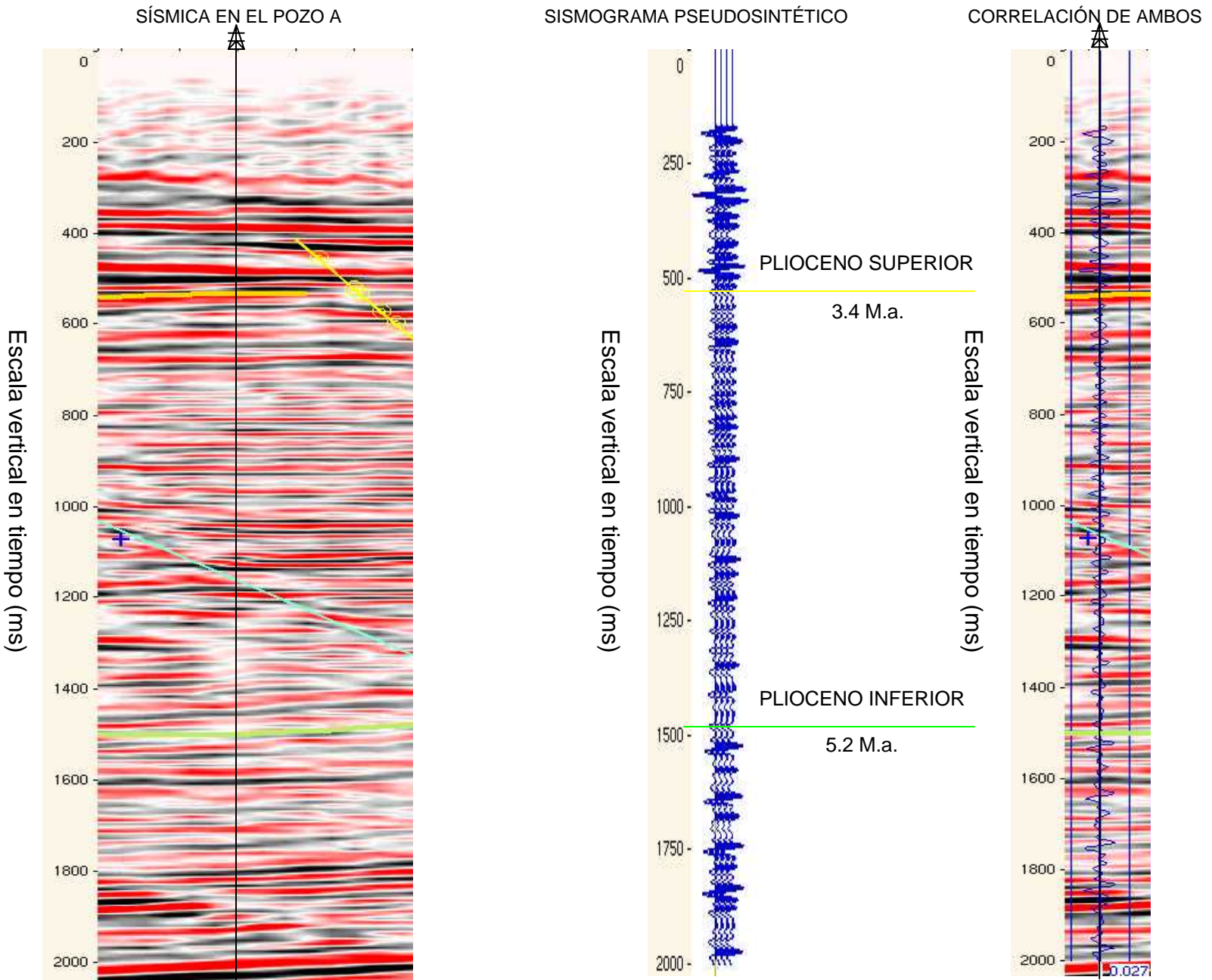


Imagen de Sánchez, 2000



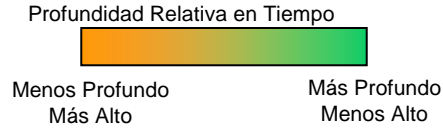
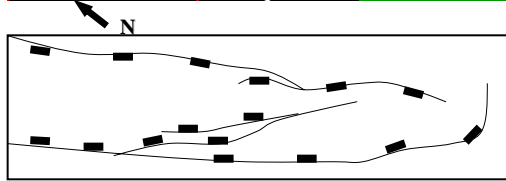
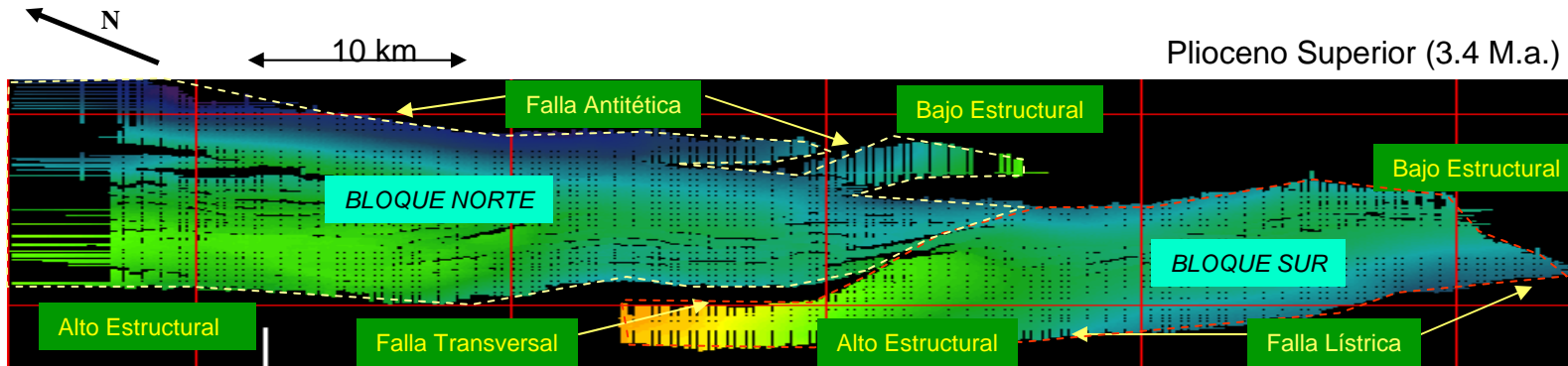
Mm: Mioceno Medio, Ms: Mioceno Superior, Pli: Plioceno Inferior, Pls: Plioceno Superior-Pleistoceno

CORRELACIÓN ENTRE EL CUBO SÍSMICO LANKAHUASA Y EL POZO A



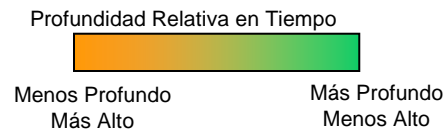
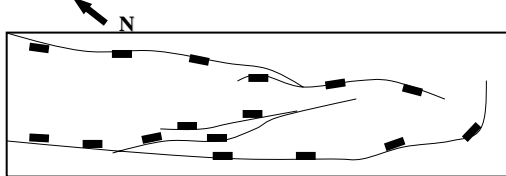
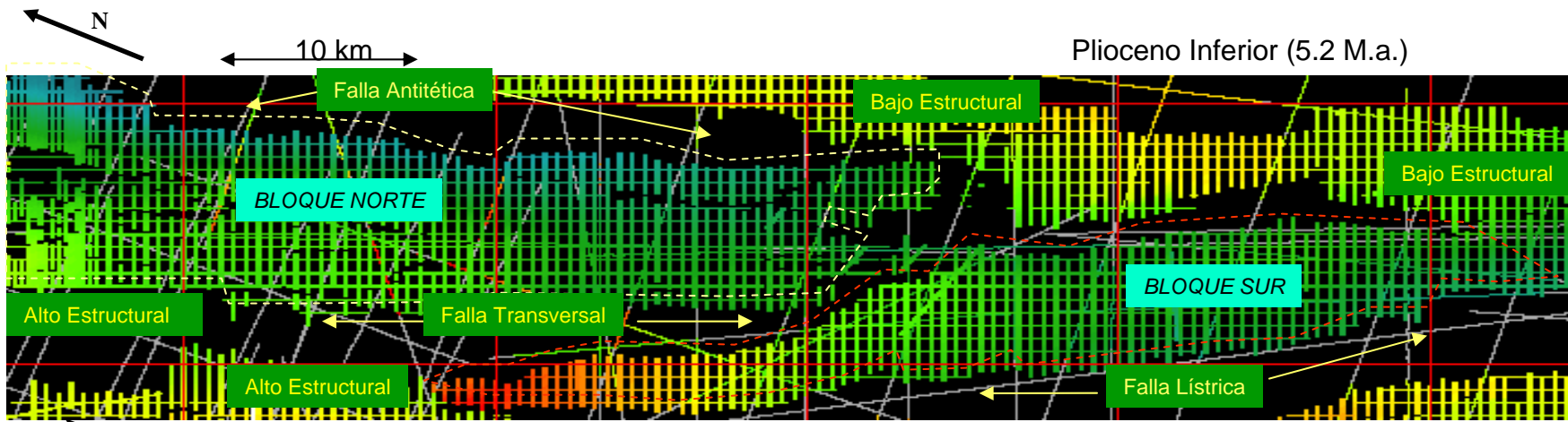
POSICIÓN DEL HORIZONTE 3.4 M.a. EN LA CUENCA CHIHUIX

Marco Antonio Orduña Reyes



POSICIÓN DEL HORIZONTE 5.2 M.a. EN LA CUENCA CHIHUIX

A5



ANEXO B

SECCIÓN SÍSMICA REGIONAL 2D

Al Sur de la Cuenca Chihuix. En la parte superior de la lámina se observa un esquema del perfil sísmico que se haya en la parte inferior, este perfil es la imagen sísmica 2D tomada al Sur a unos cuantos kilómetros de la Cuenca Chihuix donde podemos observar las estructuras mayores que forman parte de la cuenca Misantla y que muchas de ellas controlaron la evolución de la Cuenca Chihuix. En la parte izquierda del perfil tenemos la traza de la Falla Lítrica en amarillo que corre en dirección NW-SE, empieza con un echado fuerte y conforme se profundiza progresivamente cambia hasta volverse casi horizontal hasta los 4500 ms de profundidad, al punto de encontrarse con la Falla Lítrica Regional. Esta falla lítrica forma un *rollover*, con una forma interna divergente hacia el plano de falla y se comportan después como paralelos ondulados en lo que he dado en llamar la cresta del pliegue (el punto de máxima inflexión que tiene una concavidad hacia abajo). La falla lítrica es similar a la Falla Lítrica de la Cuenca Chihuix, pero a diferencia de la Cuenca Chihuix no existe o es muy pequeña (traza en morado) una Falla Antitética que si está bien desarrollada en la Cuenca Chihuix. En color verde tenemos la traza de la Falla Lítrica Regional y se ha llamado así porque otras fallas sintéticas que están en dirección a la costa tienen raíz en esa falla. En azul se muestra la traza de las fallas normales que están dentro del *rollover*, algunas de ellas forman parte del flanco y otras de la cresta.

Para ejemplificar en el esquema algunos reflectores están en rojo para mostrar que en el bloque de piso están mucho más condensados en comparación con los del *rollover* así tenemos que el reflector más antiguo que se haya a pocos milisegundos de profundidad en el bloque de piso, se haya a una gran profundidad en el *rollover*, lo que se induce que la estructura se formó en un periodo relativamente corto de tiempo; también en el perfil algunos grupos de marcadores dentro del *rollover* están en diferentes colores para mostrar un abanico de crecimiento y como la secuencias se condensan en el lado opuesto de la falla lítrica. Además por los reflectores con formas sigmoideas creados en un ambiente de borde de plataforma, se ve que estos han ido progradando y que los primeros materiales que se depositaron dentro del *rollover* fueron en un ambiente de talud continental.

Más a la derecha tenemos la traza de una falla normal en verde, probablemente sea el incipiente inicio de otro *rollover* hacia mar adentro y junto a este tenemos la formación de un pliegue asociado a esa falla normal. Esta falla normal y su pliegue asociado son ejemplo de como fueron los orígenes incipientes de la Falla Lítrica y del *rollover*, siendo que las fallas más antiguas están hacia la costa y su evolución se ha dado hacia mar adentro.

Al Centro de la Cuenca Chihuix. En la parte superior de la lámina se observa un esquema del perfil sísmico que se haya en la parte inferior, es la imagen sísmica 2D tomada al centro de la Cuenca Chihuix. En la parte inferior se observa como la Falla Lítrica Regional está más somera y su pendiente es mayor (4000 ms) en comparación con la lámina anterior. En amarillo se tiene la Falla Lítrica y también en amarillo se muestra una falla con un echado opuesto al echado de la Falla Lítrica, llamada Falla Antitética. Los marcadores plegados por ambas fallas forman un pliegue simétrico, donde los estros de crecimiento cercanos a cada falla tienen espesores muy similares. El bloque de piso y el bloque de techo están basculados. En el momento de formarse cada falla principal (Lítrica y Antitética) se formaron fallas antitéticas secundarias asociadas a cada falla principal, por lo que en el centro del pliegue simétrico se formó un *keystone graben*.

El arreglo interno de los reflectores es paralelo ondulado y con una buena continuidad, por lo que se interpreta que están asociados a materiales depositados en la plataforma; además a diferencia del perfil anterior ya no existen las formas sigmoideas típicas del borde de la plataforma. En la parte derecha del diagrama se ve un conjunto de estratos plegados, asociados a una intrusión de algún material plástico (posiblemente arcillas) como un diapiro.

Al Norte de la Cuenca Chihuix. En la parte superior de la lámina se observa un esquema del perfil sísmico que se haya en la parte inferior, es la imagen sísmica 2D tomada al Norte de la Cuenca Chihuix. Se observa que la Falla Lítrica Regional está mucho más somera (3500-4000 ms) y con una mayor pendiente en comparación con las láminas anteriores. Se observa un gran desarrollo de la Falla Antitética (en amarillo) que delimita a la Cuenca Chihuix, siendo que los reflectores junto a la Falla Antitética muestran una gran área de crecimiento, en comparación con la Falla Lítrica donde esos reflectores no tienen una gran área de crecimiento. Existe paralela a la Falla Antitética (C2), otra falla (en azul) llamada Falla Antitética (C3), que correspondería una fase primaria del desarrollo de la Falla Antitética (C2) que está a su lado.

A diferencia del perfil anterior se forma un pliegue asimétrico que es cortado por fallas normales. Podemos dividir esas fallas normales en dos conjuntos que responderían a condiciones completamente de crecimiento: el primer conjunto llamado Graben de la Cresta del pliegue son fallas con una extensión pequeña que están asociadas a la formación de la Falla Lítrica y el segundo conjunto de fallas que he llamado Graben del Flanco del pliegue y son fallas que se formaron por la acción conjunta de las Fallas Lítrica y Antitética, las cuales tienen una extensión mayor que las del Graben de la Cresta y sus intersecciones llegan hasta la Falla Lítrica.

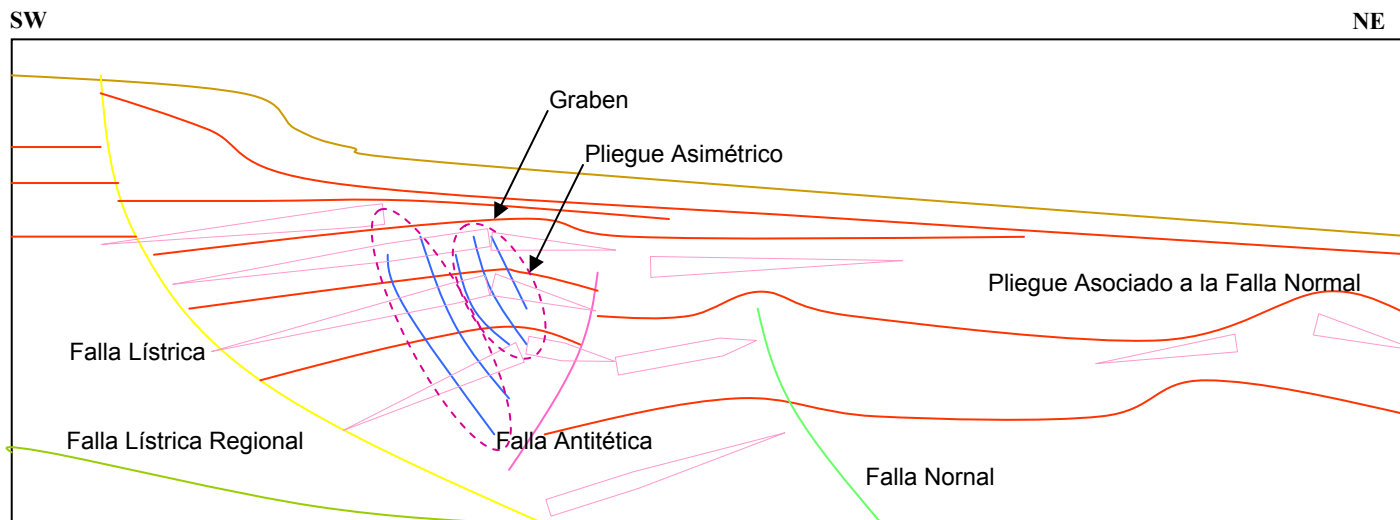
En el perfil sísmico algunos reflectores han sido agrupados y coloreados para mostrar como se deforma la secuencia en la parte más lejana del *rollover* y como se producen algunas flexiones o pliegues para acomodar el material que el mismo *rollover* está desplazando.

En la parte derecha se observa unos pliegues en los reflectores que están asociados a la intrusión de cuerpos plásticos (posiblemente arcillas) que deforman el conjunto de reflectores que anteriormente no estaban basculados.

SECCIÓN SÍSMICA REGIONAL 2D AL SUR DE LA CUENCA CHIHUIX

Marco Antonio Orduña Reyes

Evolución Estructural de la Cuenca Chihuix



Inclinación de Estratos

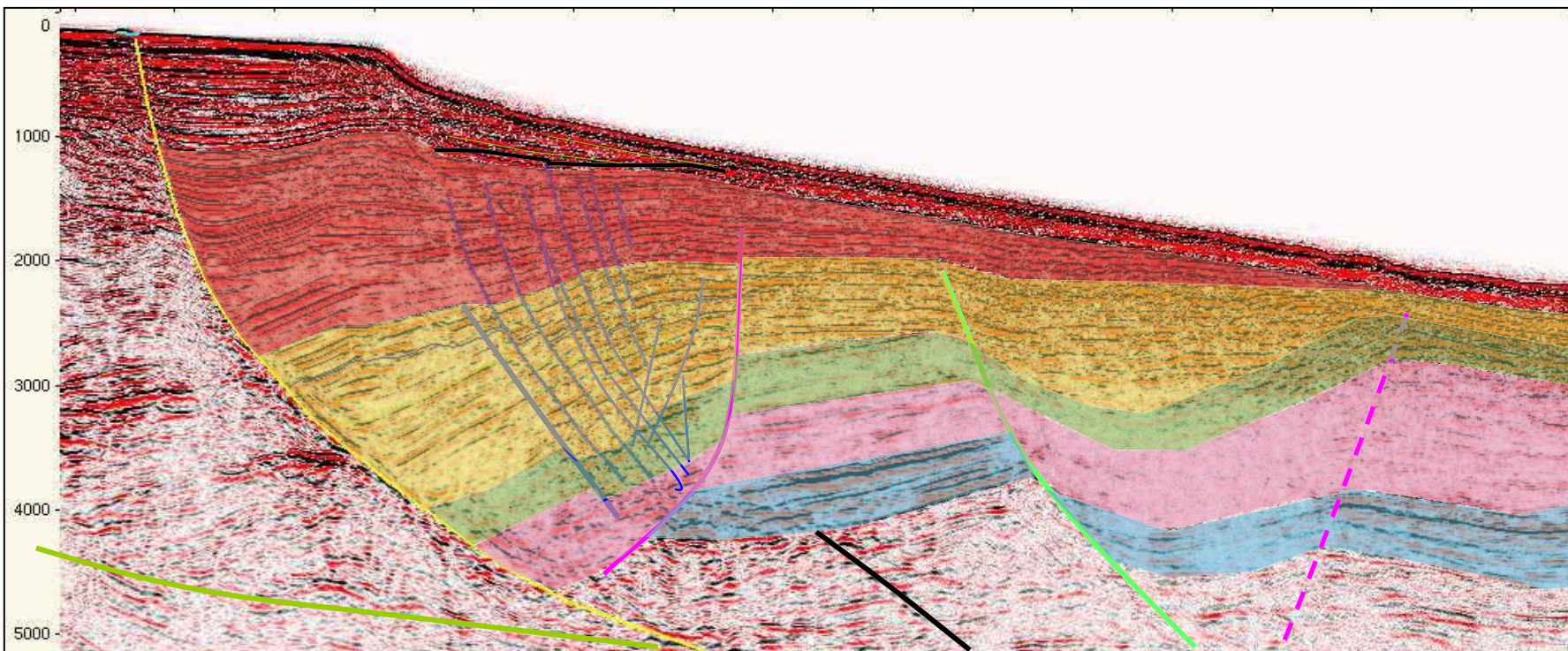


SW

NE

Escala vertical en tiempo (ms)

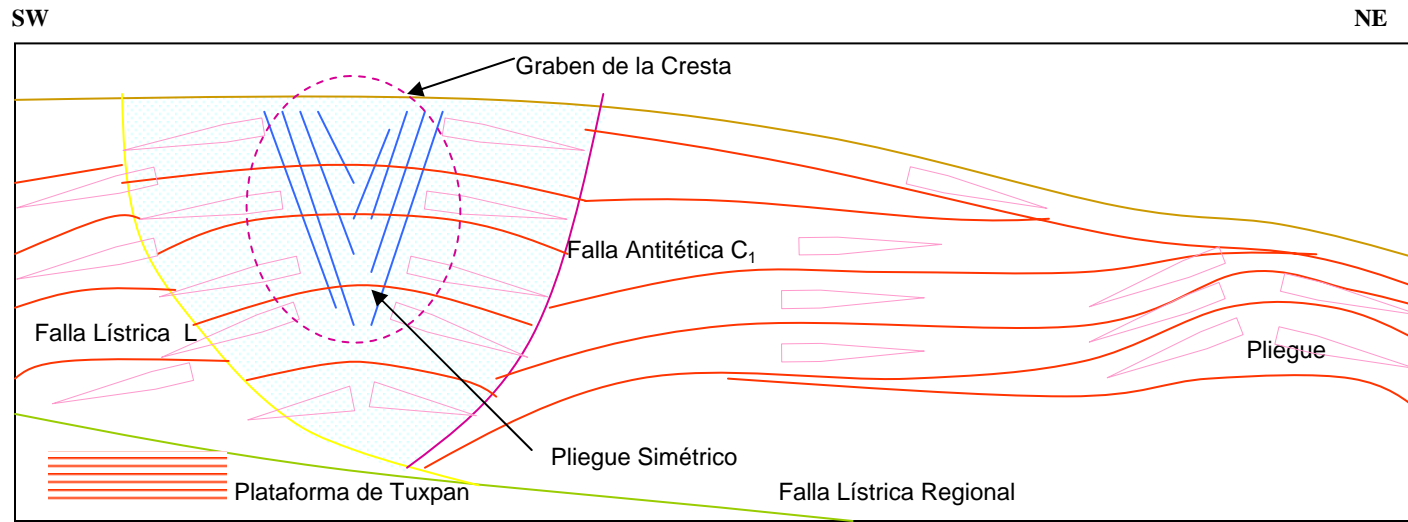
B3



SECCIÓN SÍSMICA REGIONAL 2D AL CENTRO DE LA CUENCA CHIHUIX

Marco Antonio Orduña Reyes

Evolución Estructural de la Cuenca Chihuix



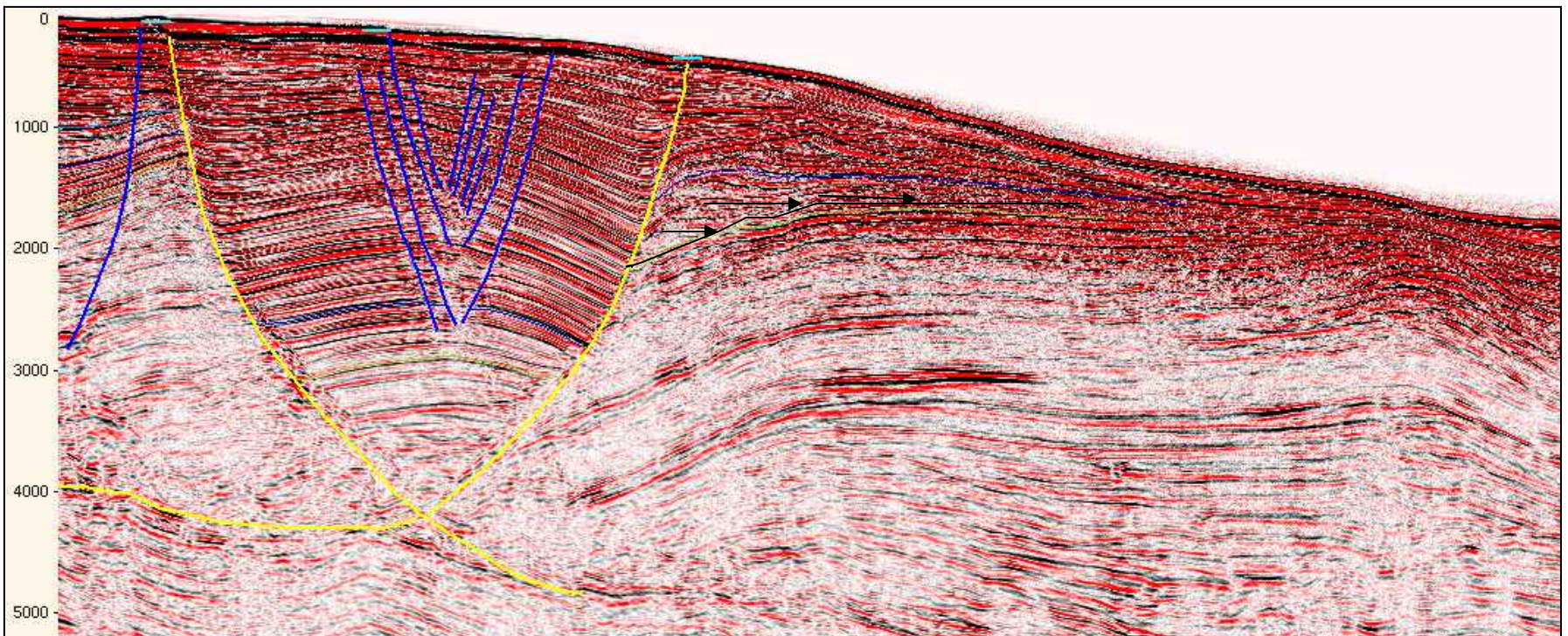
SW

NE

SW

NE

Escala vertical en tiempo (ms)

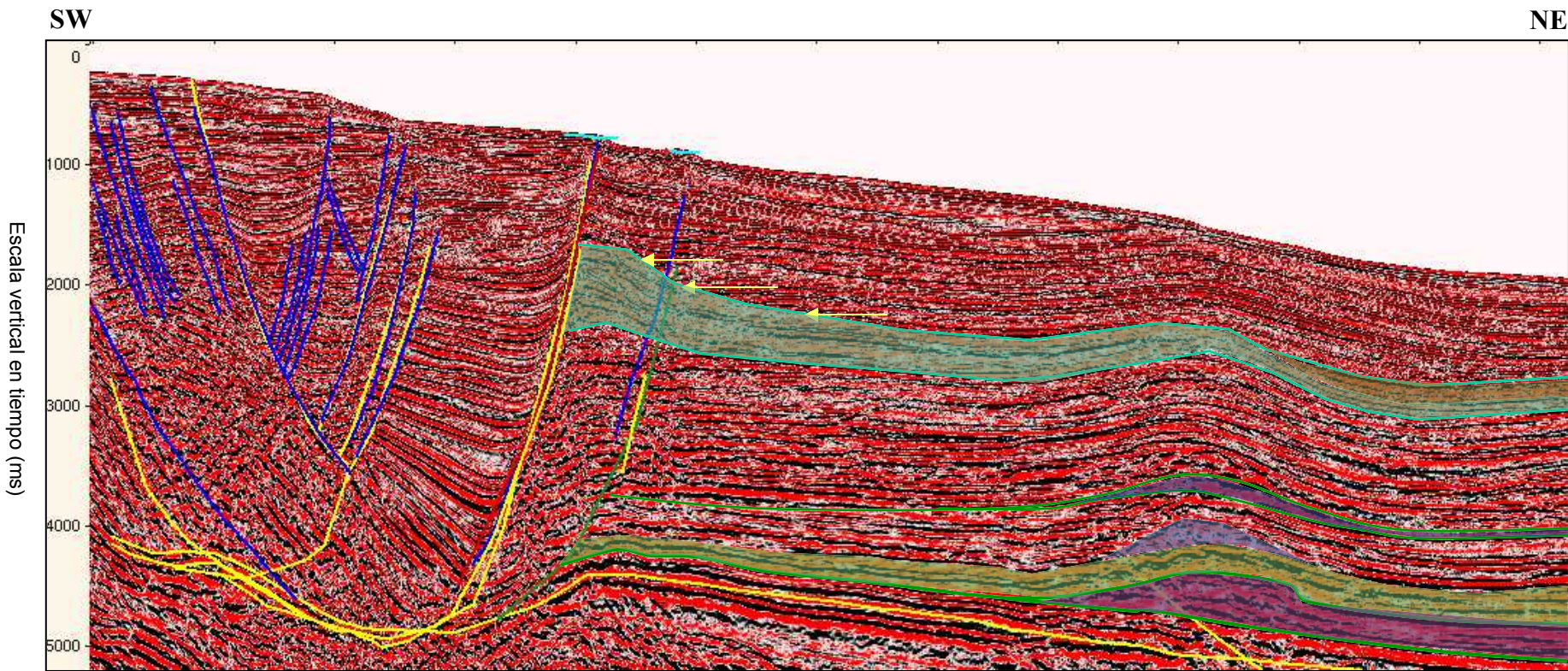
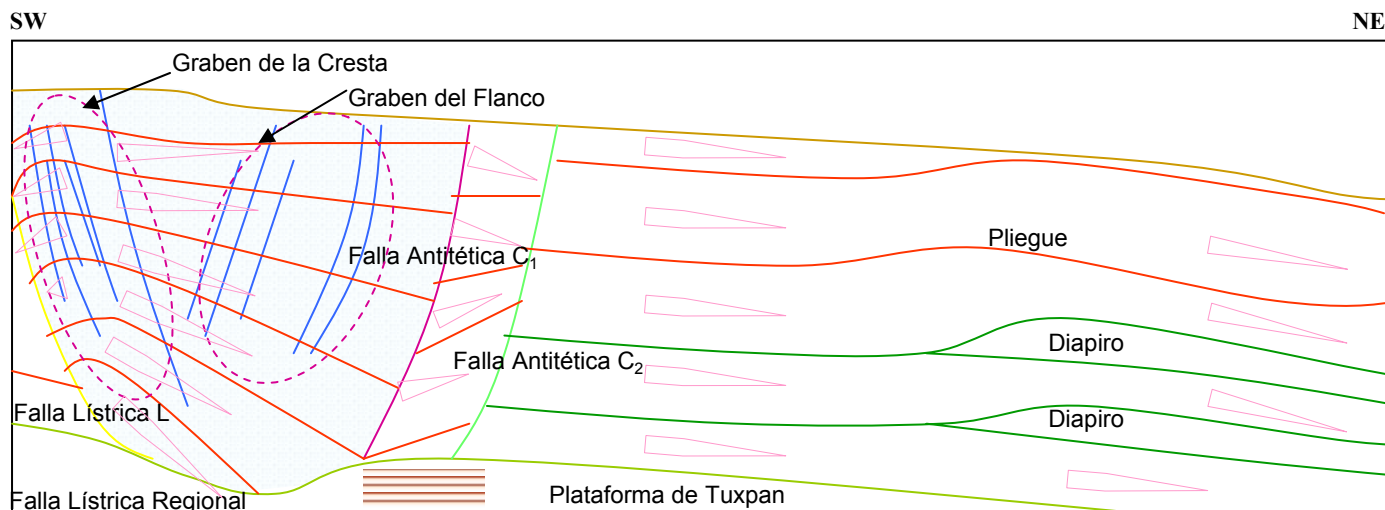


B4

SECCIÓN SÍSMICA REGIONAL 2D AL NORTE DE LA CUENCA CHIHUIX

Marco Antonio Orduña Reyes

Evolución Estructural de la Cuenca Chihuix



B5

ANEXO C

DESCRIPCIÓN DE LAS INLINES

Hay que hacer notar que en toda el área Lankahuasa y con mayor énfasis en la Cuenca Chihuix se trató de correlacionar los reflectores que representan el Plioceno Temprano (en verde), 5.2 M.a., y el Plioceno Tardío (en amarillo), 3.4 M.a., por lo que en todos los perfiles van a estar presentes estos reflectores en todas las Inlines. Su presencia en el bloque de techo y en el bloque de piso nos dan un indicio de la velocidad de sedimentación en ese punto de la cuenca, del tamaño del desplazamiento de la Falla Lítrica y Antitética en la Cuenca Chihuix y poder dar la edad de los sucesos en ella; además nos van a indicar el grado de basculamiento en cada uno de los bloques que circundan a la cuenca y el grado de fallamiento dentro de ella. Por lo que al hablar de características ya sean de tipo cronológicas, sedimentarias o estructurales, muchas de esas conclusiones se obtuvieron a partir de un análisis de esos reflectores.

Inline I1. Es la sección dentro del cubo sísmico que está más al Sur de la Cuenca Chihuix. En la parte central observamos que la Falla Lítrica tiene una superficie irregular, un echado fuerte y éste cambia poco hasta que llega la falla a una profundidad de 3500 ms, donde se produce una inflexión que provoca una concavidad y que torna la falla horizontal. La Falla Lítrica Regional está relativamente profunda y aparece a los 4500 ms con una geometría curva. Es notorio que el bloque de piso está muy basculado y el bloque de techo está menos basculado, por lo que posiblemente el fuerte echado de la Falla Lítrica se deba a la rotación del bloque de piso que la pone en una posición cada vez más vertical. En esta parte las formas sigmoides características del borde de plataforma se ven en posición progradante. En la parte baja de la Falla Lítrica se ve que los reflectores tienen una forma parecida a la caparazón de una tortuga, muy posiblemente a la presencia de un cuerpo plástico que sirve como rodillo del *rollover*. Hay algunas pequeñas fallas normales en el *rollover* de la Cuenca Chihuix.

Inline I2. La Falla Lítrica tiene una superficie mucho más lisa que el perfil anterior, pero sigue teniendo un fuerte echado que progresivamente va disminuyendo y llega a la Falla Lítrica Regional hasta los 5000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene una curvatura mayor que en el perfil anterior y tiene un fuerte echado. Aquí también aparecen las formas sigmoides que progradan. Las superficies axiales activa e inactiva nos delimitan los sedimentos que son sincinemáticos y los precinemáticos. El bloque de techo y el de piso están fuertemente basculados, por lo que se infiere que la Falla Lítrica ha sido rotada hacia una posición más vertical por el bloque de piso que gira. Hay una mayor presencia de fallas normales dentro del *rollover* de la cuenca y su extensión es mayor, aunque su espaciamiento es mayor en comparación con otras fallas normales más al Norte. Aquí aparece de nuevo un rodillo por debajo de la Falla Lítrica.

Inline I3. La Falla Lítrica tiene una superficie mucho más lisa con un fuerte echado y progresivamente disminuye, pero tiene una fuerte inflexión en los 2000 ms y llega a la Falla Lítrica Regional hasta los 4500 ms. La Falla Lítrica Regional es menos curva que en los perfiles precedentes y tiene un echado más suave. Hay dos superficies axiales activas y dos superficies axiales inactivas. Hay un conjunto de fallas normales conjugadas junto a cada superficie axial activa, dando como resultado dos keystone grabens. Uno de esos conjuntos se llama Graben de la Cresta y el otro Graben del Flanco. Tanto el bloque de techo como el de piso están basculados, pero menos que en los perfiles anteriores. Aún se observa a las formas sigmoides progradantes, aunque el espacio entre ellas es más amplio. En la parte inferior de la Falla Lítrica hay un rodillo.

Inline I4. La forma de la Falla Lítrica es más curva y su grado de curvatura máximo se halla a los 3500 ms y se junta con la Falla Lítrica Regional a los 4500 ms. La Falla Lítrica Regional tiene una pendiente más suave que en los perfiles anteriores. En el bloque de piso se observa que se ha desarrollado un graben que ha sido sellado. En el bloque de techo el *rollover* se ve afectado por el incipiente desarrollo de la Falla Antitética que hace que los reflectores dentro de éste se curven hacia abajo, empezando con el desarrollo de un pliegue asimétrico con la cresta cercana a la Falla Antitética, por lo que se puede decir que la Falla Antitética es posterior a la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta presenta básicamente fallas sintéticas, en cambio en el Graben del Flanco es un conjunto de fallas conjugadas. Hay una superficie axial activa y tres superficies axiales inactivas. Dentro del *rollover* hay estructuras de erosión y relleno, que nos indican la presencia de paleocanales. El bloque de piso ha reducido bastante su basculamiento y el bloque de techo continúa con su fuerte basculamiento, por lo que la Falla Lítrica ha sido menos rotada hacia la verticalidad. Existe debajo de la Falla Lítrica un rodillo.

Inline I5. La forma de la Falla Lítrica es menos cóncava y tiene una fuerte inflexión en los 2500 ms y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4700 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado más suave que en los perfiles anteriores pero una superficie más irregular. Hay una superficie axial activa y tres superficies axiales inactivas. El Graben del Flanco ha desaparecido casi en su totalidad y el Graben de la Cresta está compuesto por fallas conjugadas con una extensión muy pequeña. La Falla Antitética es casi plana y con un fuerte echado, se curva ligeramente al llegar a la Falla Lítrica. El pliegue dentro del *rollover* cada vez es más simétrico, ya que la cresta de éste se mueve hacia el centro de la cuenca. La tasa de sedimentación dentro del *rollover* es mayor que en los perfiles anteriores. El bloque de techo y el de piso están menos basculados y dentro del bloque de piso hay un conjunto de fallas antitéticas a la Falla Lítrica Regional. Existen aquí también reflectores que nos indican la presencia de paleocanales. Existen todavía ligera presencia de formas sigmoideas progradantes pero cada vez están más espaciadas unas de otras y tienen formas muy alargadas. Existe debajo de la Falla Lítrica un rodillo.

Inline I6. La forma de la Falla Lítrica es menos cóncava que en el perfil anterior y tiene dos fuertes inflexiones a los 2700 ms y a los 4200 ms, se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4700 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado más suave que en los perfiles anteriores pero una forma más ondulada. El Graben del Flanco casi no existe y en el Graben de la Cresta predominan las fallas normales de corta extensión. El pliegue cada vez es más simétrico. Hay una superficie axial activa y tres superficies axiales inactivas. La Falla Antitética es más curva en comparación con los perfiles anteriores. En el bloque de piso se han desarrollado unas fallas antitéticas poco extensas. El bloque de techo y el de piso están cada vez menos basculados. Los abanicos de crecimiento junto a la Falla Antitética son cada vez más simétricos con los abanicos de crecimiento de la Falla Lítrica. Existen todavía ligera presencia de formas sigmoideas progradantes pero cada vez están más espaciadas unas de otras y con una forma alargada. Existe debajo de la Falla Lítrica un rodillo.

Inline I7. La forma de la Falla Lítrica es más curva y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4500 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado más suave que en los perfiles anteriores pero una forma más ondulada. El Graben del Flanco consta solamente de unas cuantas fallas

normales de muy corta extensión y en el Graben de la Cresta las fallas conjugadas vuelven a cruzar todo el *rollover*, aunque el espaciamento de las fallas sintéticas es menor a las fallas antitéticas. El pliegue que forma el *rollover* es cada vez más simétrico y los abanicos de crecimiento junto a cada falla (lístrica y antitética) casi tienen el mismo tamaño, pero aún son más grandes los que están junto a la Falla Lístrica. La Falla Antitética tiene un echado fuerte en la superficie y tiene una inflexión significativa a los 2700 ms. En el *rollover* hay una superficie axial activa y dos superficies axiales inactivas. Tanto en el bloque de techo como en el bloque de piso el basculamiento es poco. En el bloque de piso se han desarrollado dos grandes fallas sintéticas. Las formas sigmoideas ya no existen y simplemente los reflectores tienen una forma paralela y con una buena continuidad y amplitud, por lo que se infiere que el material ahí presente corresponde a un ambiente de depósito de plataforma. El desplazamiento de la falla es mayor que en los perfiles anteriores y por lo tanto nos indica que mayor cantidad de sedimentos se precipitaron en comparación con los perfiles anteriores. Existe debajo de la Falla Lístrica un rodillo.

Inline I8. La forma de la Falla Lístrica es más curva y su radio de curvatura tiende a ser constante, se conecta con la Falla Lístrica Regional a los 4300 ms. La Falla Lístrica Regional tiene un echado más suave en comparación con los perfiles anteriores y una superficie menos irregular. En la parte central de la cuenca se empieza a desarrollar una falla que delimita al Graben de la Cresta en la parte izquierda del perfil (o su parte más cercana a la Falla Lístrica) que he llamado Falla Transversal (en verde) Ahora solamente existe el Graben de la Cresta en el cual sus fallas conjugadas tienen la misma extensión, el mismo echado, la misma separación y la misma cantidad de fallas sintéticas como antitéticas. El pliegue es casi simétrico con abanicos de crecimiento casi del mismo tamaño junto a cada falla (Lístrica y Antitética). Hay una superficie axial activa y tres superficies axiales inactivas. La Falla Antitética tiene una mayor curvatura en comparación con el perfil anterior. Tanto el bloque de techo como el de piso están basculados y tienen la misma inclinación. El bloque de piso sigue teniendo dos fallas sintéticas y una antitética. Existe debajo de la Falla Lístrica un rodillo que en perfil se hace cada vez más pequeño en comparación con los perfiles anteriores.

Inline I9. La Falla Lístrica es más curva y con una superficie lisa, se conecta con la Falla Lístrica Regional a los 4200 ms. La Falla Lístrica Regional tiene un echado suave. El Graben de la Cresta es simétrico, con el mismo número de fallas (sintéticas y antitéticas), la misma extensión de ellas, el mismo espaciamento y está ubicado en el centro del pliegue. La Falla Transversal tiene una extensión mayor que el resto de las fallas del Graben de la Cresta y se va hasta la base del pliegue. El pliegue es simétrico y los abanicos de crecimiento son idénticos a ambos lados del pliegue; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El basculamiento de los bloques que rodean a la cuenca es el mismo. El bloque de piso tiene dos fallas Antitéticas y en el bloque de techo hay dos fallas sintéticas. La Falla Antitética tiene un radio de curvatura mayor que en los Inlines anteriores y una superficie lisa. Existe debajo de la Falla Lístrica un rodillo que en perfil se hace cada vez más pequeño en comparación con los Inlines anteriores.

Inline I10. La Falla Lístrica tiene un radio de curvatura bueno y se conecta con la Falla Lístrica Regional a los 4100 ms. La Falla Lístrica Regional tiene un echado suave y tiene una forma casi

lisa. La Falla Antitética tiene un echado fuerte en la superficie y una inflexión a los 2300 ms que hace reducir fuertemente su echado. La Falla Transversal tiene una extensión mayor que el resto de las fallas del Graben de la Cresta y se va hasta la base de la cuenca. El Graben de la Cresta es simétrico, con el mismo número de fallas (sintéticas y antitéticas), la misma extensión de ellas (mayor que en el perfil anterior), el mismo espaciamiento y está ubicado en el centro del pliegue. El pliegue es casi simétrico y los abanicos de crecimiento son casi idénticos a ambos lados del pliegue, ya que son un poco más grandes aquellos junto a la Falla Antitética; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El basculamiento de los bloques que rodean a la cuenca es el mismo (aunque mayor que en el perfil anterior). El bloque de piso tiene dos fallas antitéticas y en el bloque de techo hay dos fallas sintéticas. Existe debajo de la Falla Lítrica un rodillo que en este perfil es más pequeño en comparación con los perfiles anteriores.

Inline I11. La Falla Lítrica tiene una orientación cada vez más horizontal en comparación con los perfiles anteriores y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado suave y una superficie lisa. La Falla Antitética tiene un echado fuerte en la superficie y sufre una fuerte inflexión en los 2500 ms. Junto a la Falla Lítrica (en rosa) se empieza a desarrollar otra Falla Antitética (C2) (en violeta) de una extensión corta (va desde la superficie hasta los 3000 ms), que tiene el mismo echado que la primera Falla Antitética (C1). La Falla Transversal tiene una extensión mayor que el resto de las fallas del Graben de la Cresta y se va hasta la base de la cuenca. El Graben de la Cresta pierde su simetría y se desarrollan más las fallas sintéticas, aunque estas son de poca extensión y ahora están más cerca de la Falla Antitética (C1). El pliegue es asimétrico y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y dos superficies axiales inactivas. El basculamiento de los bloques que rodean a la cuenca es el mismo. El bloque de piso tiene una falla antitética y en el bloque de techo hay varias fallas sintéticas. Existe debajo de la Falla Lítrica un rodillo muy pequeño.

Inline I12. La Falla Lítrica tiene una orientación cada vez más horizontal y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado suave y una superficie lisa. La Falla Antitética (C1) tiene un echado fuerte en la superficie y sufre una fuerte inflexión en los 2500 ms e igualmente la otra Falla Antitética (C2) tiene la misma posición y llega ya hasta la Falla Lítrica. La Falla Transversal (T1) tiene una extensión mayor que el resto de las fallas del Graben de la Cresta y ahora hay un incipiente desarrollo de otra Falla Transversal (T2) (amarillo) hacia el centro del Graben de la Cresta. El Graben de la Cresta pierde su simetría y se desarrollan más las fallas sintéticas (tanto en número como en extensión), y las fallas antitéticas son de corta extensión aunque su número es mayor en comparación con el Inline anterior; así el Graben de la Cresta está más cerca de la Falla Antitética (C1). El pliegue es asimétrico y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso no tiene basculamiento y el bloque de techo sigue teniendo basculamiento. El bloque de piso tiene una falla antitética y debajo de ella y de la Falla Lítrica hay un rodillo que es

mucho más pequeño en comparación con los perfiles anteriores. En el bloque de techo hay varias fallas sintéticas.

Inline I13. La Falla Lítrica tiende a ser menos horizontal y con una buena curvatura, se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4500 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado suave y una superficie lisa. La Falla Antitética (C1) tiene un echado constante y se vuelve cada vez más horizontal e igualmente la otra Falla Antitética (C2) tiene la misma posición. La Falla Transversal (T1) tiene una extensión mayor que el resto de las fallas del Graben de la Cresta y la otra Falla Transversal (T2) va hasta la base del pliegue; aunque por la ampliación del Graben de la Cresta hace que la Falla Transversal (T1) se aproxime a la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es asimétrico y se desarrollan más las fallas sintéticas (tanto en número pero menores en extensión), y las fallas antitéticas son de mayor extensión y separación entre ellas que las fallas sintéticas; así el Graben de la Cresta está más cerca de la Falla Antitética (C1). El pliegue es asimétrico y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso no tiene basculamiento y el bloque de techo tiene basculamiento. El bloque de piso tiene una falla antitética. En el bloque de techo hay varias fallas sintéticas.

Inline I14. La Falla Lítrica tiene una posición más vertical y una forma menos curva que en el perfil anterior, se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4300 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor que en los otros perfiles y una superficie lisa. La Falla Antitética (C1) casi desaparece y la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal; entre ambas fallas Antitéticas hay fallas antitéticas más pequeñas. La Falla Transversal (T1 y T2) tienen la misma orientación, un fuerte echado y van hasta la base de la cuenca, pero la separación entre ellas es mayor y la Falla Transversal (T1) se aproxima más a la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es asimétrico y se desarrollan más las fallas sintéticas (en número, extensión y separación entre ellas, incluso algunas de ellas llegan hasta la Falla Lítrica) que las fallas antitéticas; así que el Graben de la Cresta está más cerca de la Falla Antitética (C1). Aquí se muestra el desarrollo de otro conjunto de fallas normales llamado Graben del Flanco y está compuesto básicamente de fallas antitéticas. El pliegue es asimétrico y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C1); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una falla antitética.

Inline I15. La Falla Lítrica tiene una posición más vertical y una forma menos curva, aunque tiene una inflexión a los 3500 ms y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4200 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor que en el perfil anterior y una superficie lisa. La Falla Antitética (C1) casi desaparece y la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y una buena curvatura; ambas Fallas Antitéticas tienen la misma orientación. Las Fallas Transversales (T1 y T2) tienen la misma orientación, un fuerte echado y van hasta la base de la cuenca; la Falla Transversal (T1) está más cerca de la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es asimétrico y se desarrollan menos las fallas sintéticas (tanto en número como en extensión), las fallas antitéticas son de mayor extensión (incluso algunas llegan a la base de la cuenca) y su

separación es mayor; ahora el Graben de la Cresta está más cerca de la Falla Lítrica. El Graben del Flanco en esta parte de la cuenca está compuesto por un conjunto de fallas sintéticas de mediana extensión y unas pequeñas fallas antitéticas. El pliegue es asimétrico, con un ancho mayor en comparación con el perfil anterior, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética; además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una Falla Antitética.

Inline I16. La Falla Lítrica tiene una posición más vertical y con una curvatura mejor y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4200 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa. La Falla Antitética (C1) es más pequeña y la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y curvatura mayor; ambas fallas Antitéticas tienen la misma orientación. Las Fallas Transversales (T1 y T2) tienen la misma orientación y un fuerte echado. La Falla Transversal (T2) se queda en el límite del Graben de la Cresta; en cambio la Falla Transversal (T1) está más cerca de la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es asimétrico y se desarrollan menos las fallas sintéticas (tanto en número, extensión y separación entre ellas) que las fallas antitéticas. El Graben de la Cresta está más cercano a la Falla Lítrica. El Graben del Flanco en esta parte de la cuenca está compuesto por un conjunto de pequeñas fallas sintéticas. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una falla antitética que tiene una posición cada vez más horizontal con respecto al perfil anterior.

Inline I17. La Falla Lítrica tiene una curvatura mejor que el Inline anterior y se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C1) es más pequeña y ambas Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen un echado cada vez más horizontal y con una buena curvatura. Las Fallas Transversales (T1 y T2) tienen la misma orientación y un fuerte echado, aunque están curvadas y sólo la Transversal (T1) va hasta la base de la cuenca y la otra es más somera como el Graben de la Cresta, siendo ésta última muy pequeña; la Falla Transversal (T1) está cada vez más cerca de la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es asimétrico y se desarrollan menos las fallas sintéticas (en extensión y separación entre ellas), que las fallas antitéticas que son menos numerosas; el Graben de la Cresta está más cercano a la Falla Lítrica. El Graben del Flanco en esta parte de la cuenca está compuesto por un conjunto muy pequeño de pequeñas fallas sintéticas. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una falla antitética que tiene una posición cada vez más horizontal con respecto al perfil anterior.

Inline I18. La Falla Lítrica tiene una curvatura mejor que el perfil anterior y tiene una posición más horizontal; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4200 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor que en el perfil anterior y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C1) es pequeña y casi desaparece; además la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y una buena curvatura; ambas fallas Antitéticas tienen la misma orientación. La Falla Transversal (T1) tiene un fuerte echado, es curva, va hasta la base de la cuenca y está cada vez más cerca de la Falla Lítrica; además la otra Falla Transversal (T2) ya no está en este perfil. En el Graben de la Cresta se desarrollan menos las fallas sintéticas (en extensión, número y su separación es mayor) que las fallas Antitéticas; además el Graben de la Cresta está más cercano a la Falla Lítrica. El Graben del Flanco en esta parte de la cuenca está compuesto por un conjunto de fallas sintéticas y unas cuantas antitéticas. Tanto el Graben de la Cresta como el Graben del Flanco están más cerca uno del otro. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una falla antitética que tiene una posición cada vez más horizontal con respecto al Inline anterior.

Inline I19. La Falla Lítrica tiene una curvatura mayor que el perfil anterior y tiene una posición más horizontal; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor que en el perfil anterior y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C1) es pequeña y la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y una buena curvatura; ambas fallas Antitéticas tienen la misma orientación. La Falla Transversal (T1) tiene un fuerte echado, es curva, va hasta la base de la cuenca y está cada vez más cerca de la Falla Lítrica. El Graben de la Cresta es un conjunto de fallas sintéticas de extensión media. El Graben del Flanco en esta parte de la cuenca está compuesto por un gran conjunto de fallas sintéticas y unas cuantas antitéticas de extensión media. Tanto el Graben de la Cresta como el Graben del Flanco ya están muy cerca uno del otro. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene una falla antitética que es menor de tamaño con respecto al Inline anterior.

Inline I20. La Falla Lítrica tiene una curvatura mayor que el perfil anterior y tiene una posición más horizontal; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor que en el perfil anterior y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C1) ya no existe y la otra Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y un radio de curvatura mayor. La Falla Transversal (T1) tiene un fuerte echado, es curva, va hasta la base de la cuenca y está muy cerca de la Falla Lítrica en un punto que casi se traslapan. En el Graben

de la Cresta y el Graben del Flanco se fusionaron un solo conjunto de fallas conjugadas (con un gran número de fallas antitéticas, más espaciadas que las fallas sintéticas de corta extensión) y a este nuevo conjunto se le quedó el nombre de Graben de la Cresta. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene un graben sellado en su interior.

Inline I21. La Falla Lítrica tiene un fuerte echado en la parte superior y una inflexión a los 2000 ms hace que tenga una posición más horizontal en comparación con los perfiles anteriores; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores, posiblemente debido a que ésta se desarrolló en materiales que están sobre la Plataforma de Tuxpan y cuando más avanzamos hacia el Norte, ésta está más somera. La Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y un gran radio de curvatura. La Falla Transversal (T1) ya no existe. En el Graben de la Cresta es asimétrico, con fallas antitéticas muy espaciadas, de una gran extensión, y fallas sintéticas poco numerosas y de corta extensión. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta cerca de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene un graben sellado en su interior.

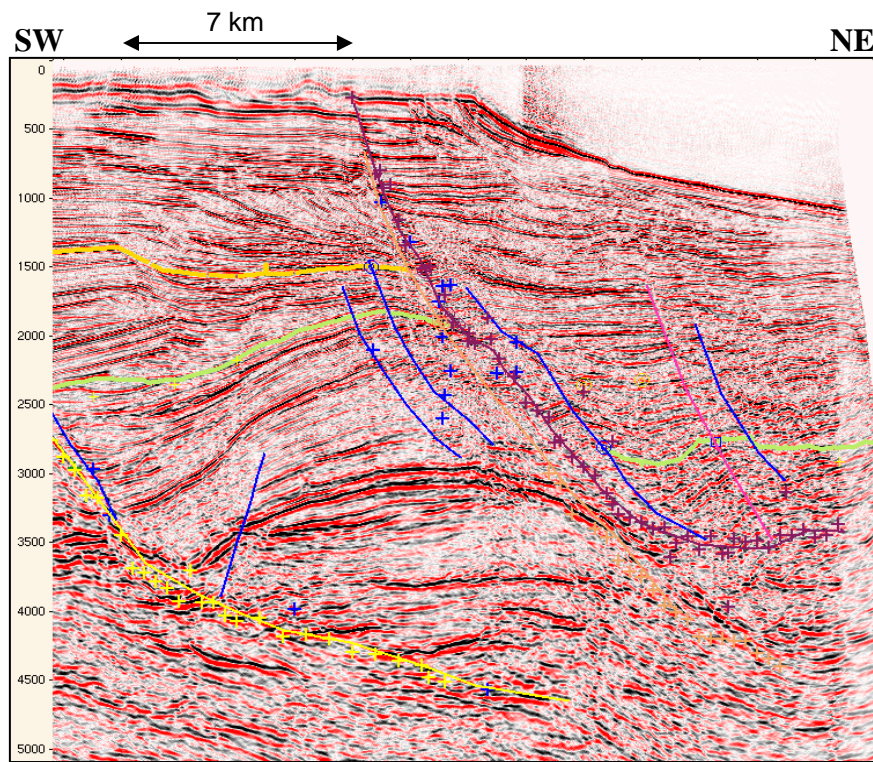
Inline I22. La Falla Lítrica tiene un fuerte echado en la parte superior y una inflexión a los 1200 ms que la pone en una posición más horizontal en comparación con el perfil anterior; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4200 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y un gran radio de curvatura. En el Graben de la Cresta es más simétrico, con gran número de fallas antitéticas y sintéticas poco espaciadas, de una gran extensión. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta más alejada de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene un graben sellado en su interior.

Inline I23. La Falla Lítrica tiene un fuerte echado en la parte superior y una inflexión a los 1300 ms que la pone en una posición más horizontal en comparación con el perfil anterior; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 4000 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y un radio de curvatura mayor. En el Graben de la Cresta es de nuevo asimétrico, con gran número de fallas

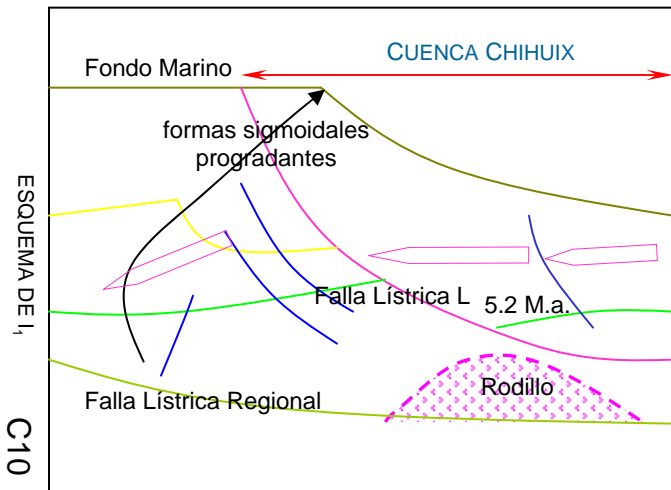
antitéticas muy espaciadas, de una gran extensión y unas cuantas fallas sintéticas poco espaciadas y de poca extensión. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta más alejada de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso no tiene basculamiento. El bloque de piso tiene un conjunto de fallas sintéticas en su interior.

Inline I24. La Falla Lítrica tiene un fuerte echado en la parte superior y una inflexión a los 1700 ms que la pone en una posición más horizontal en comparación con el perfil anterior; además se conecta con la Falla Lítrica Regional a los 3600 ms. La Falla Lítrica Regional tiene un echado mayor y una superficie lisa, además tiene una posición más superficial en comparación con los perfiles anteriores. La Falla Antitética (C2) tiene un echado cada vez más horizontal y un radio de curvatura mayor. En el Graben de la Cresta es simétrico, con gran número de fallas conjugadas poco espaciadas, de una gran extensión. El pliegue es asimétrico con un ancho cada vez mayor, con la cresta más alejada de la Falla Lítrica y los abanicos de crecimiento son más grandes junto a la Falla Antitética (C2); además el arreglo interno de los reflectores es paralelo y continuo, con una fuerte amplitud, indicadores de un ambiente de plataforma continental. Hay dos superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. El bloque de piso tiene un basculamiento opuesto al bloque de techo. El bloque de piso tiene un conjunto de fallas sintéticas en su interior que llegan hasta la base de él en la Falla Lítrica Regional.

INLINE I₁

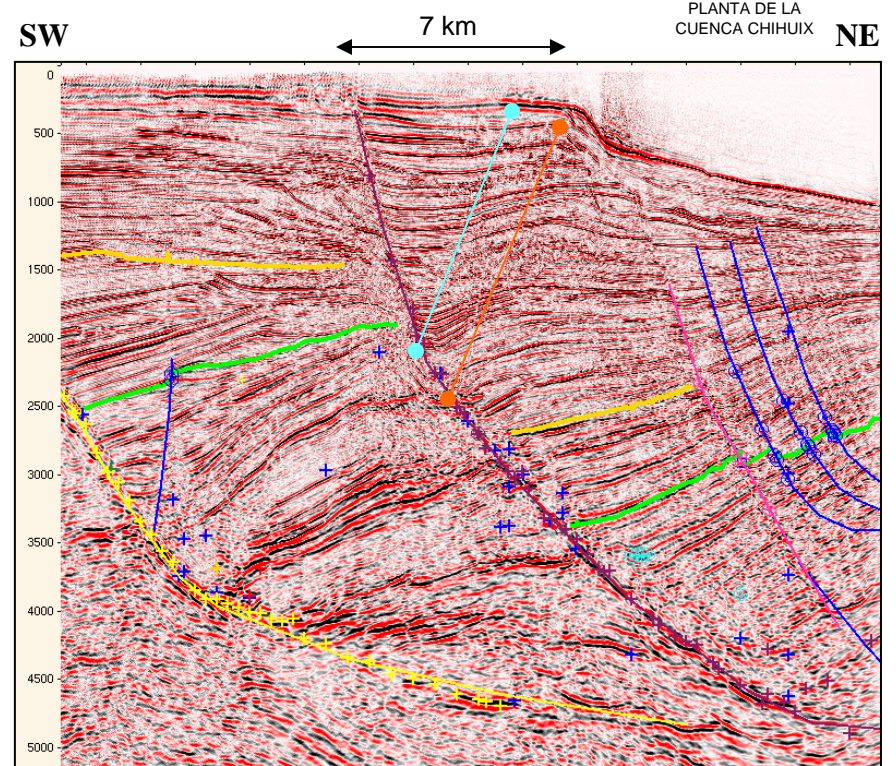
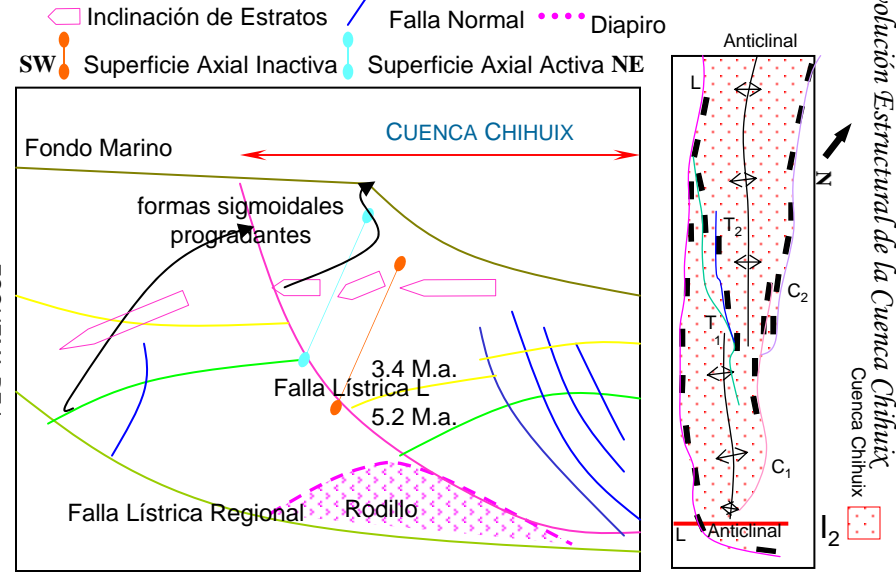


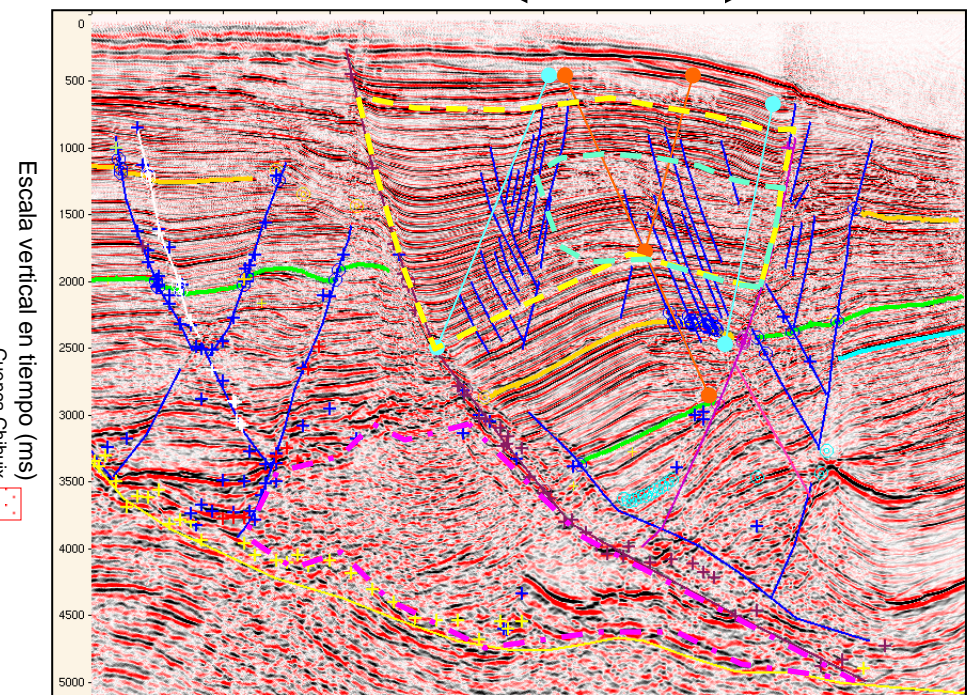
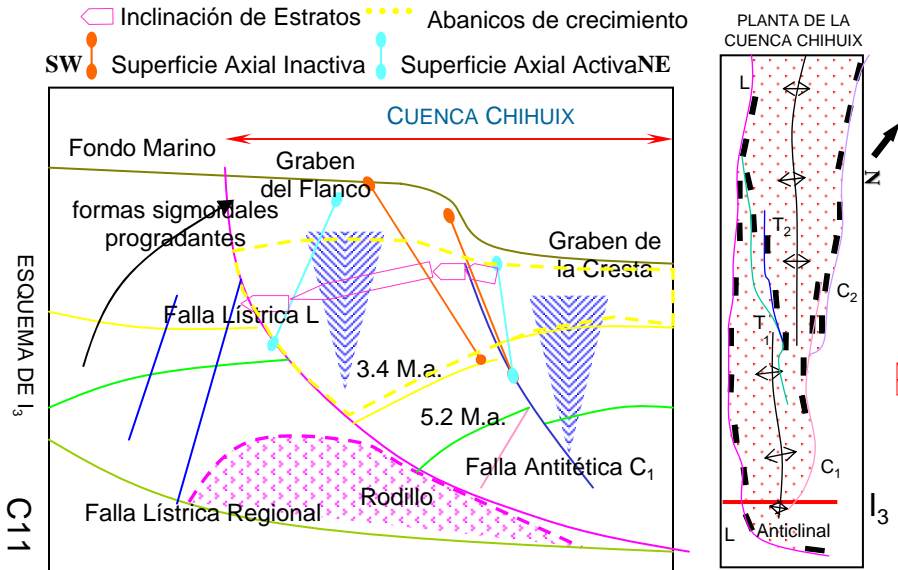
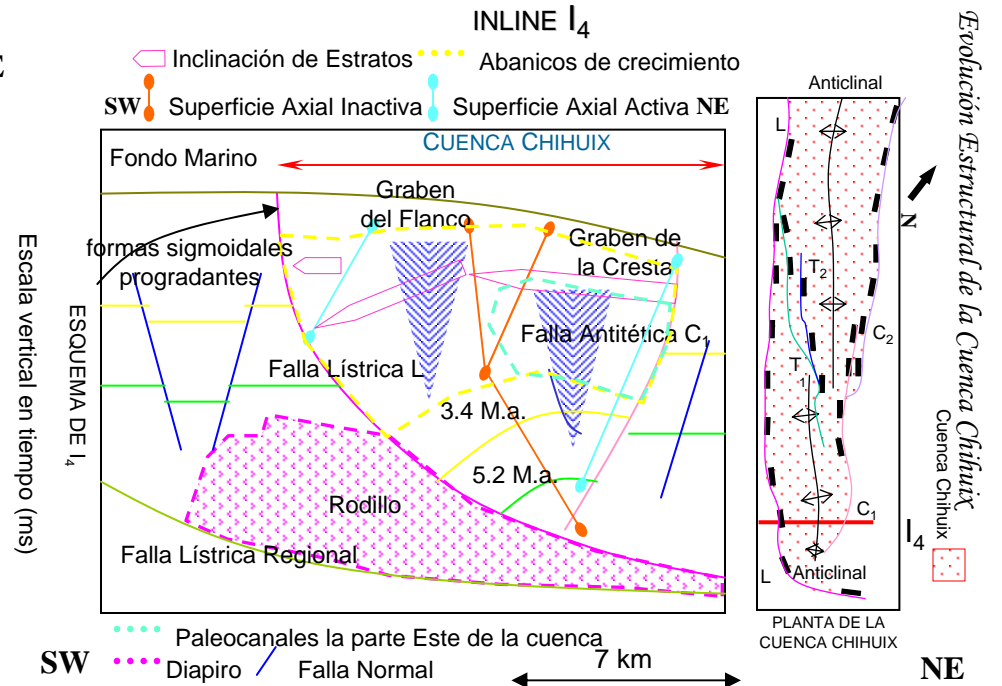
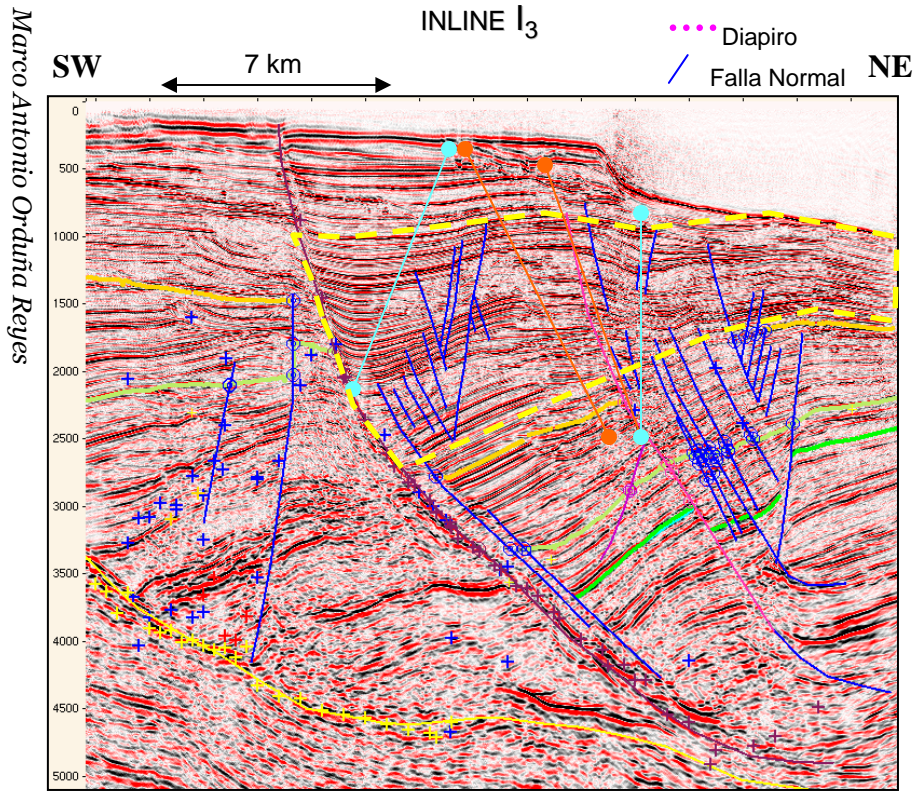
- Inclinación de Estratos
- Falla Normal
- Diapiro
- Superficie Axial Inactiva
- Superficie Axial Activa



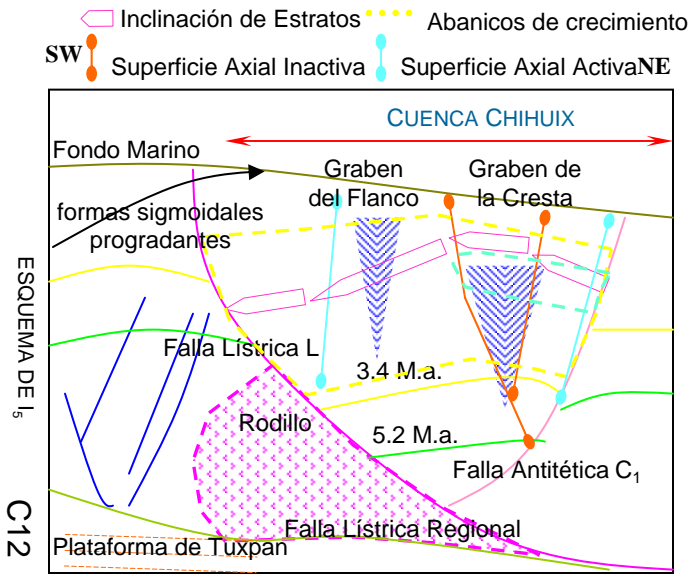
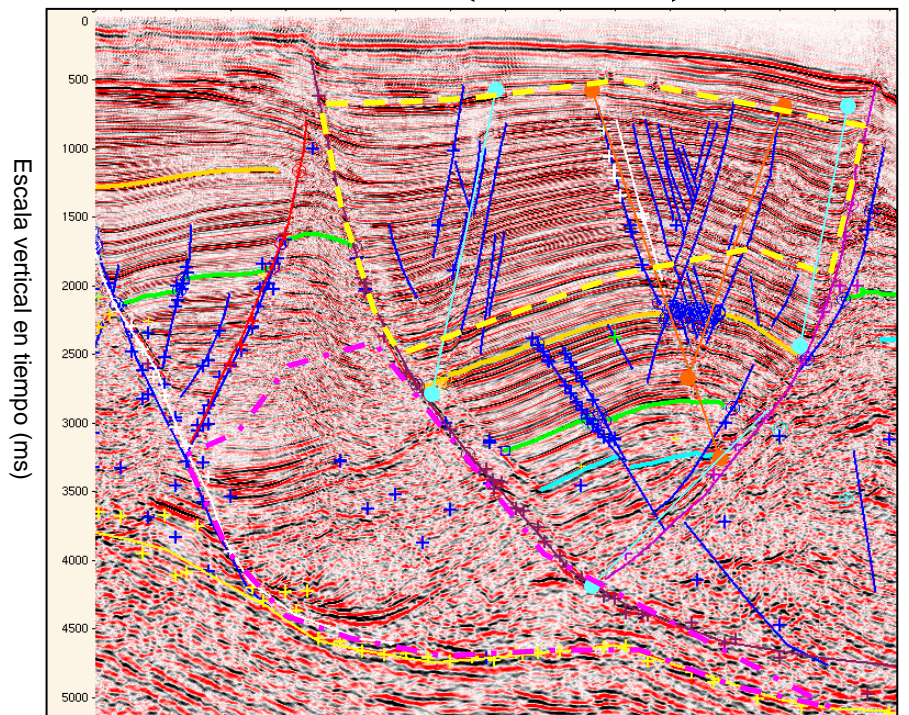
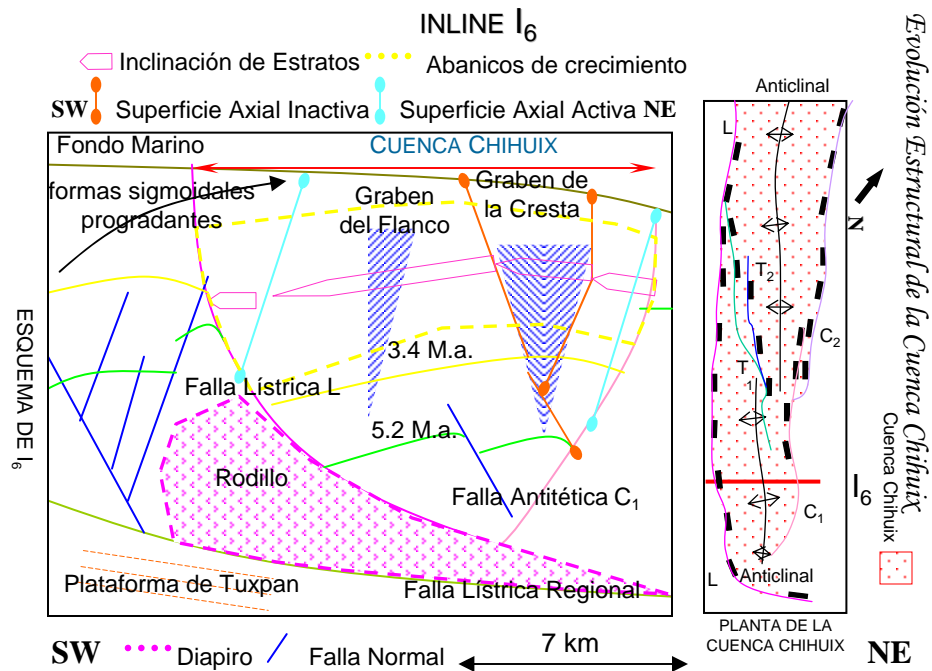
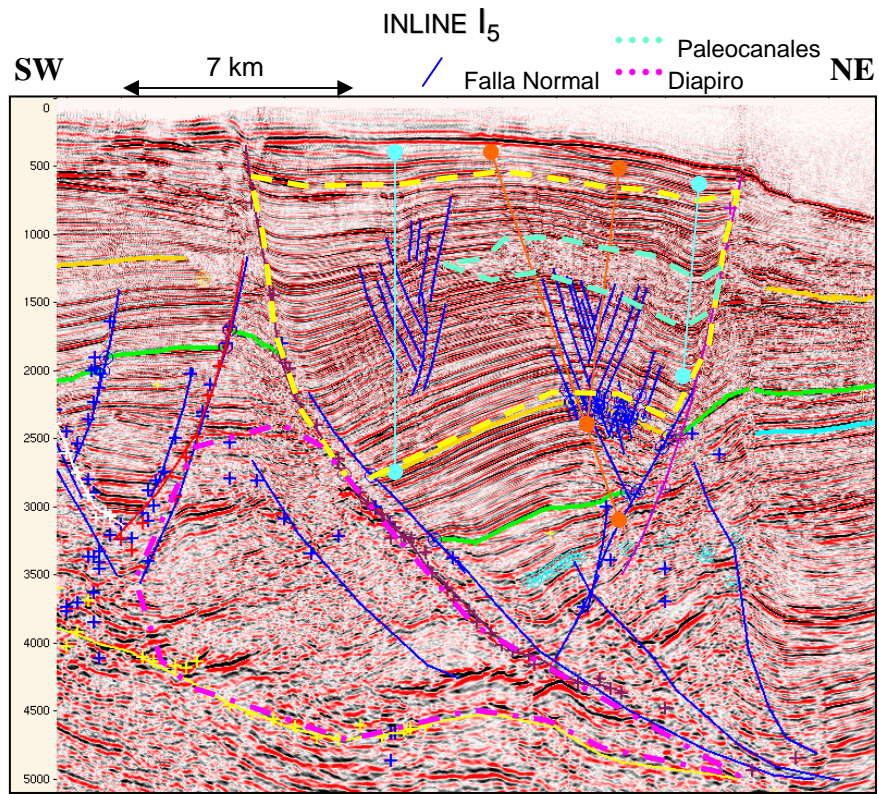
C10

INLINE I₂

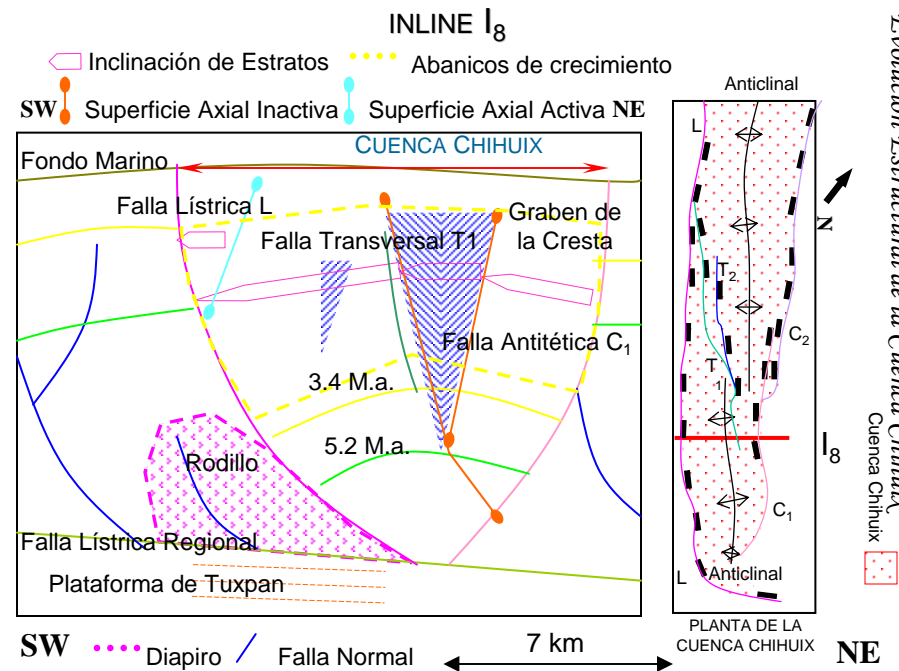
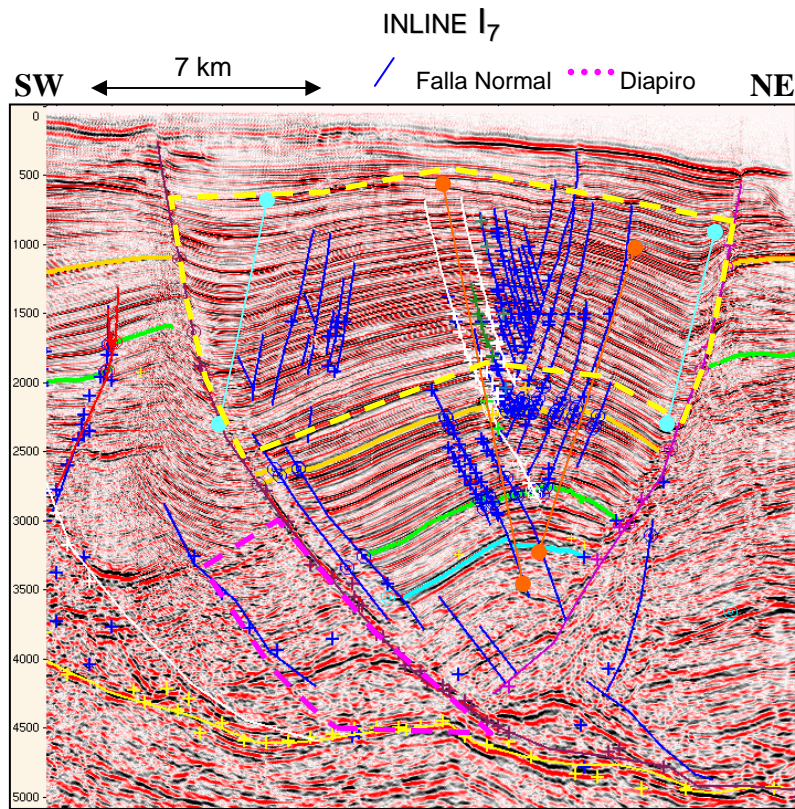




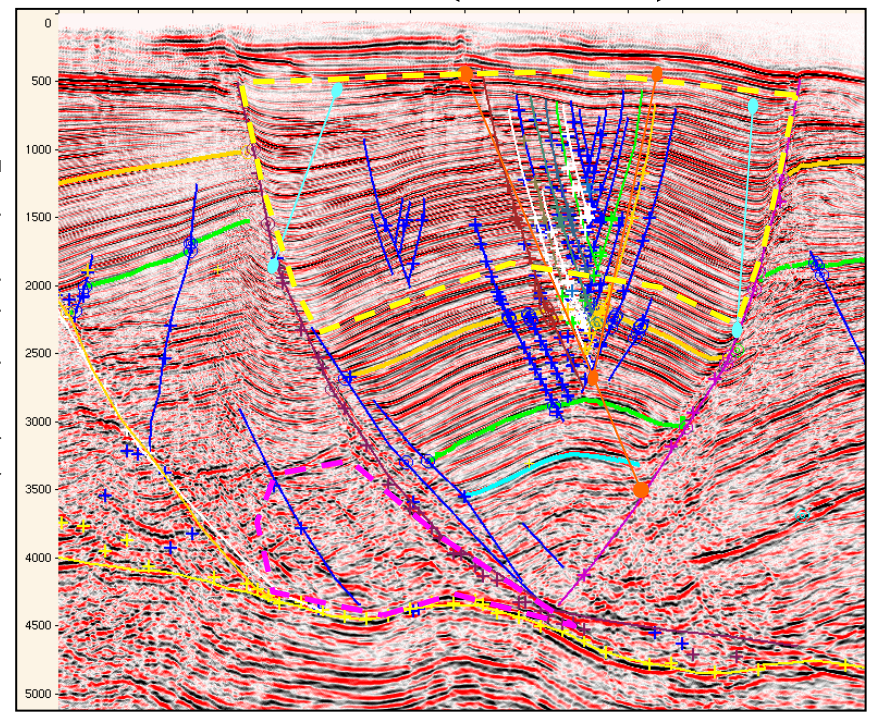
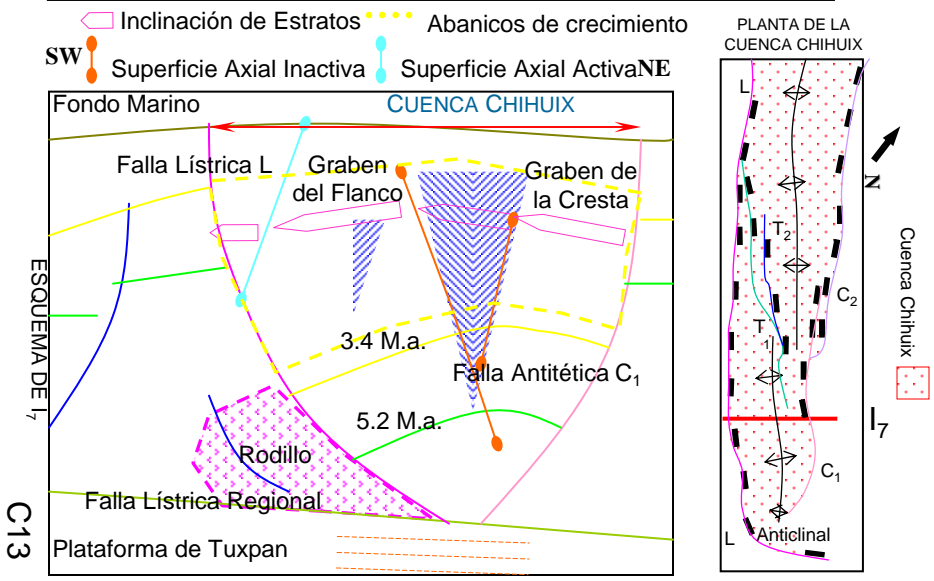
Marco Antonio Orduña Reyes

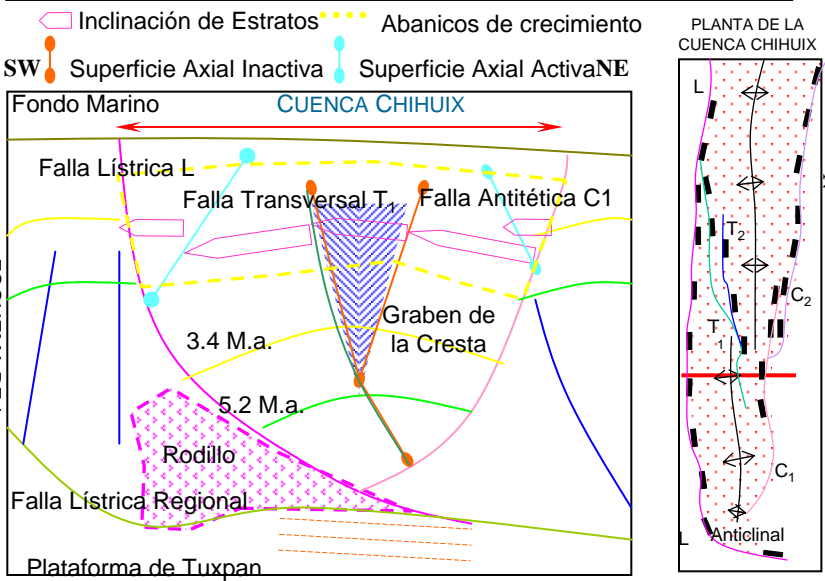
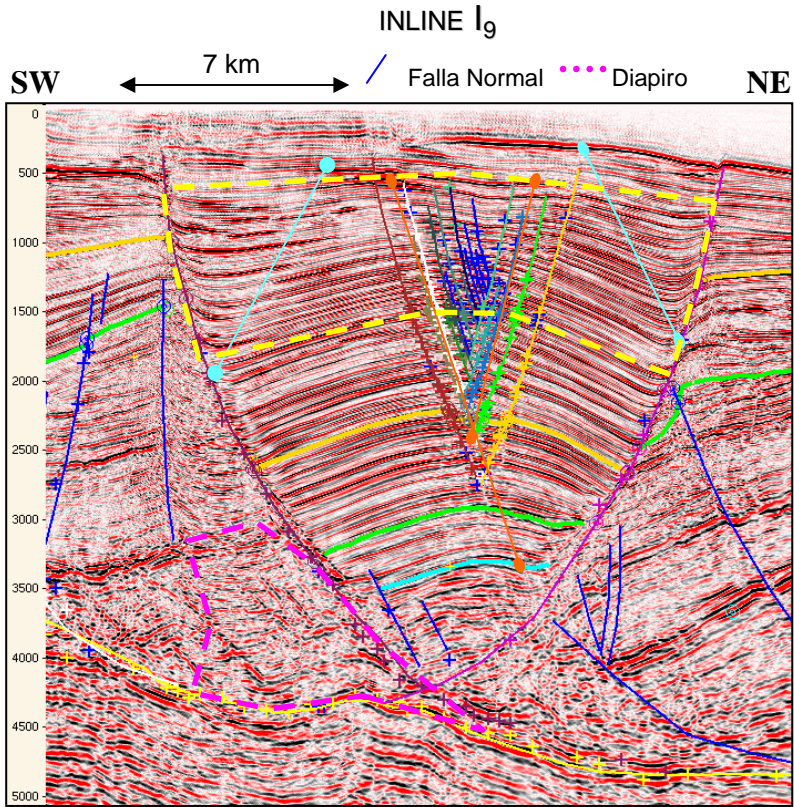


Marco Antonio Orduña Reyes

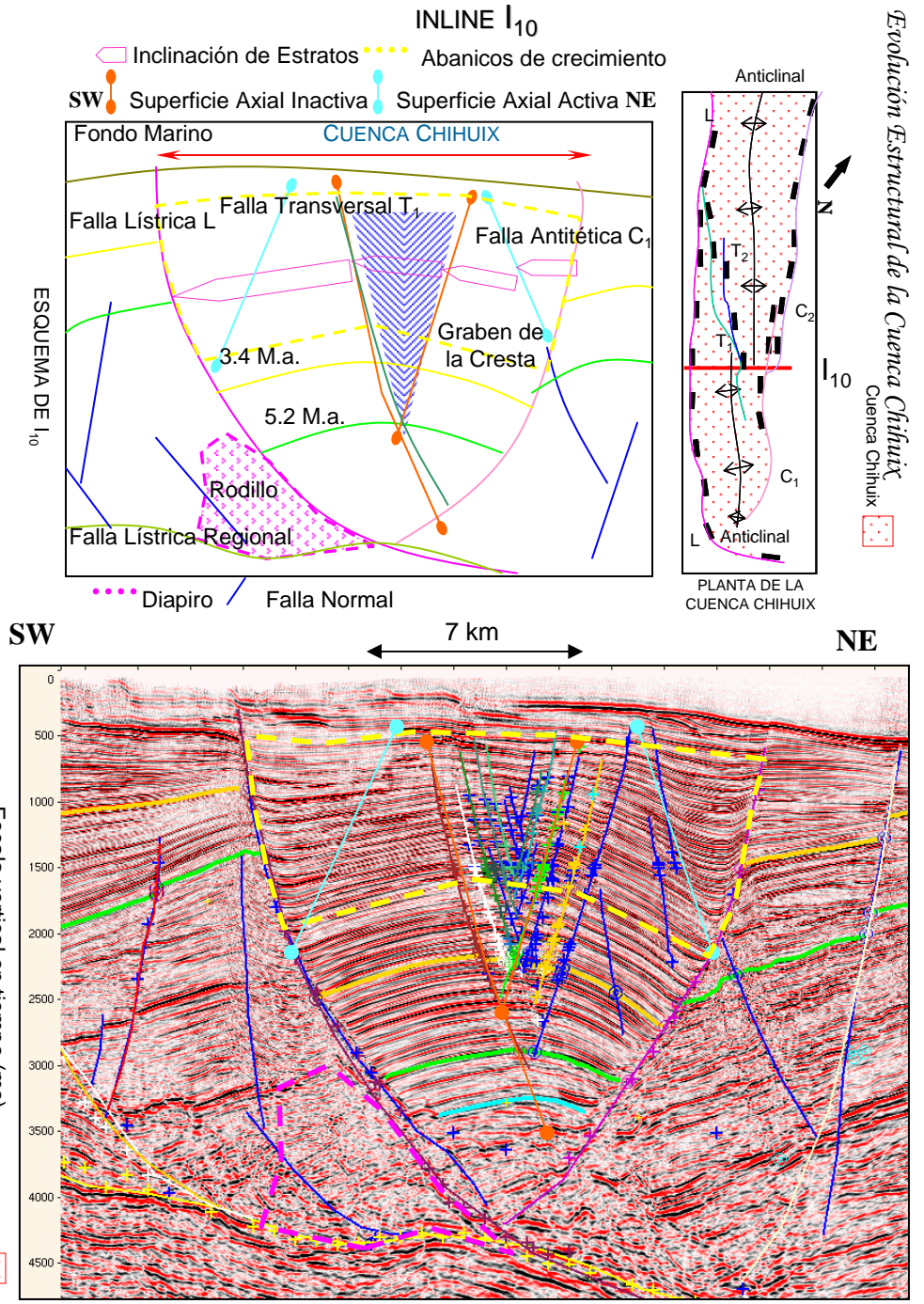


Evolución Estructural de la Cuenca ChihuiX





Escala vertical en tiempo (ms)

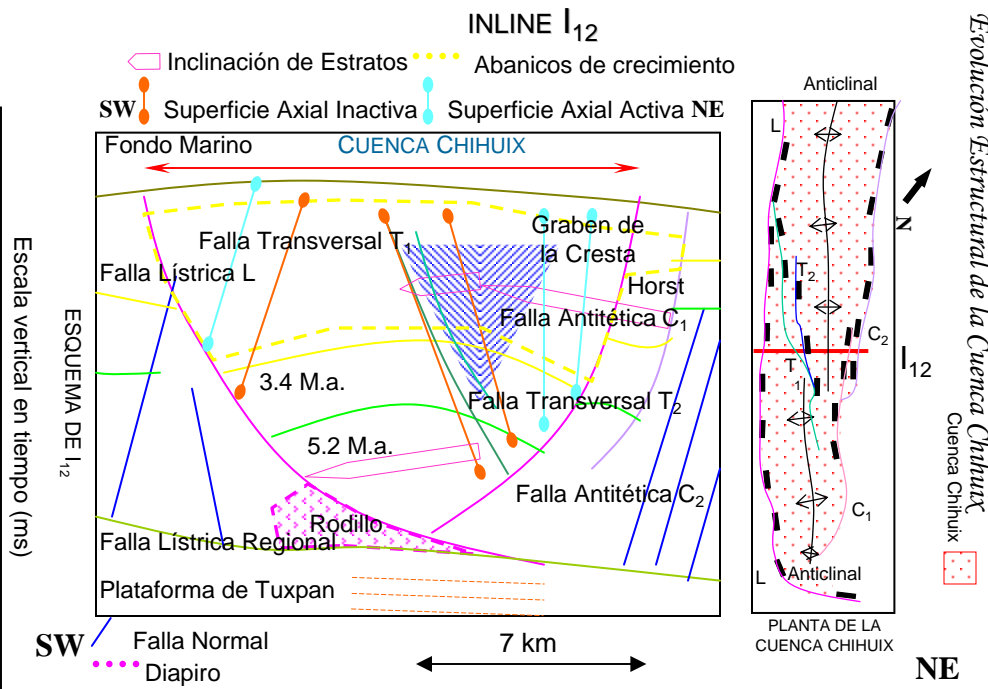
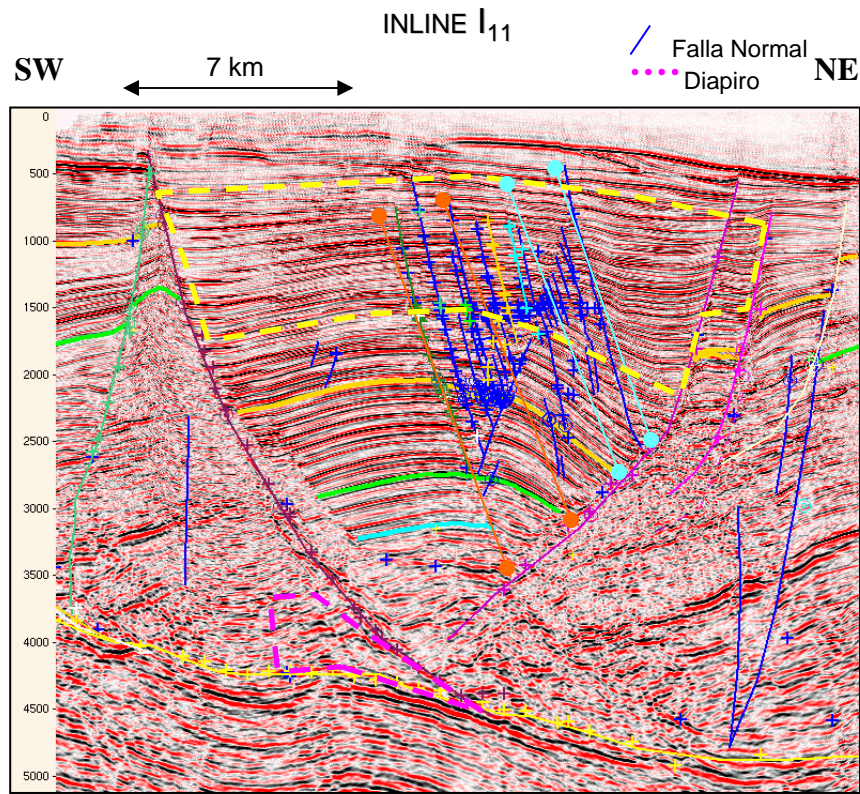


Cuenca Chihuix

I₁₀

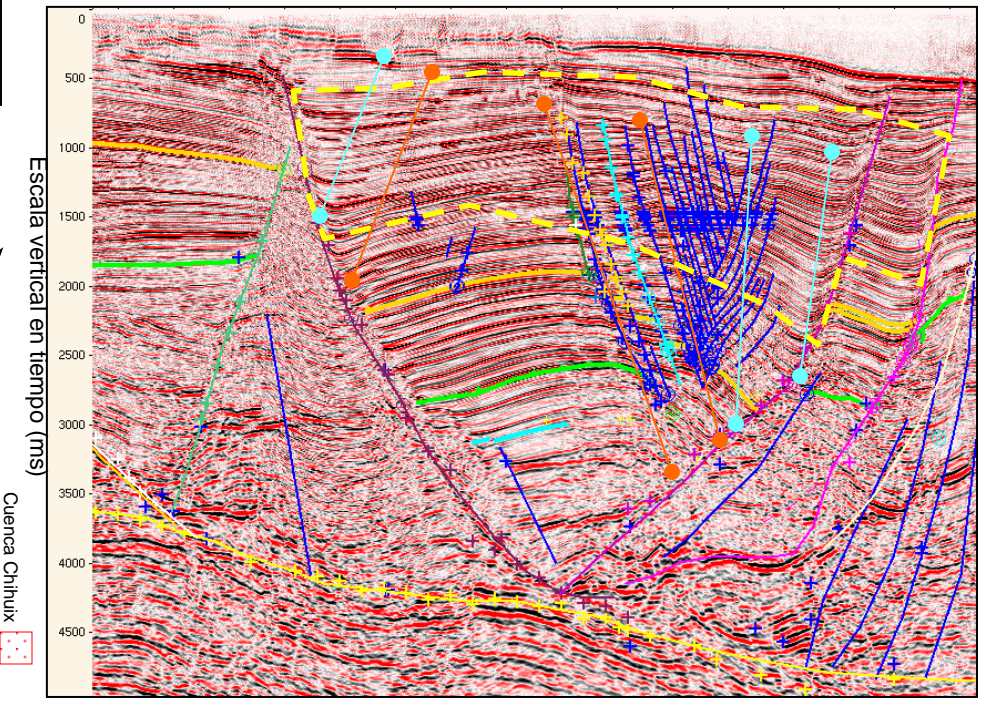
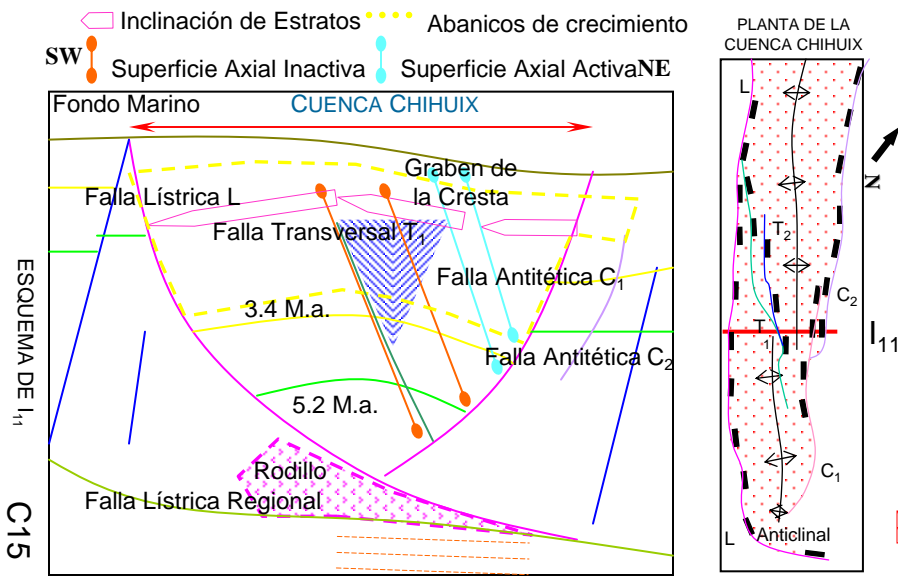
PLANTA DE LA CUENCA CHIHUIX

Marco Antonio Orduña Reyes



Evolución Estructural de la Cuenca ChihuiX

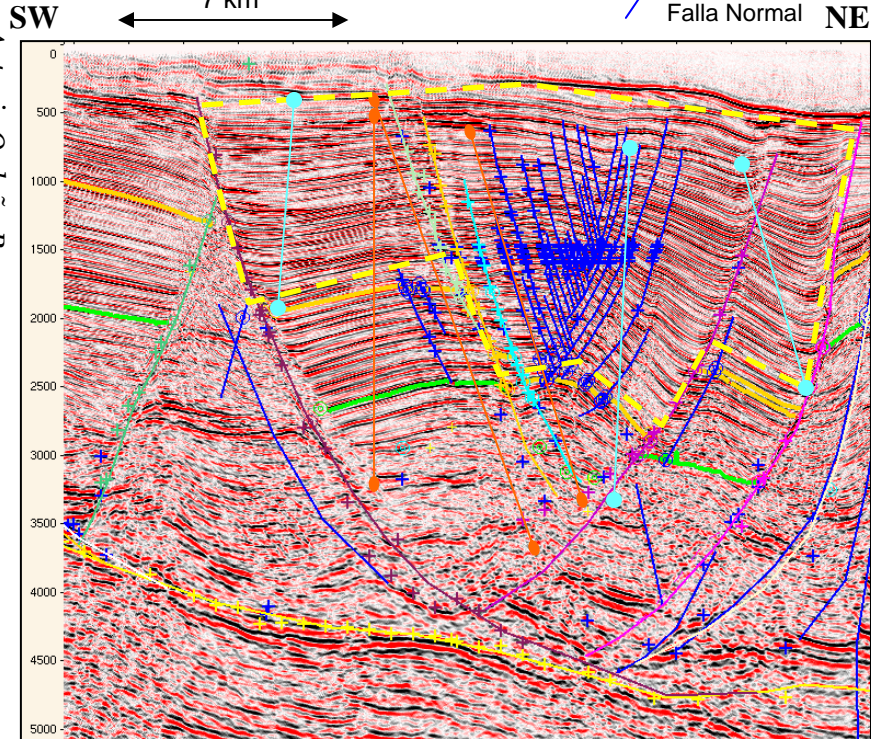
Cuenca ChihuiX



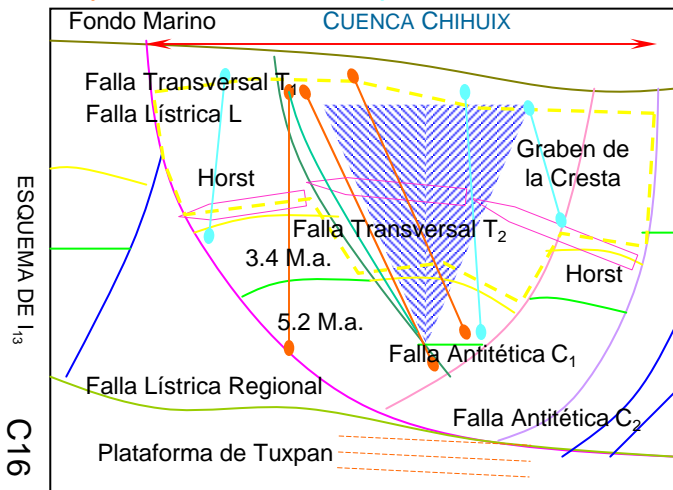
C15

Marco Antonio Orduña Reyes

INLINE I₁₃



□ Inclinación de Estratos ●●● Abanicos de crecimiento
○ Superficie Axial Inactiva ● Superficie Axial Activa

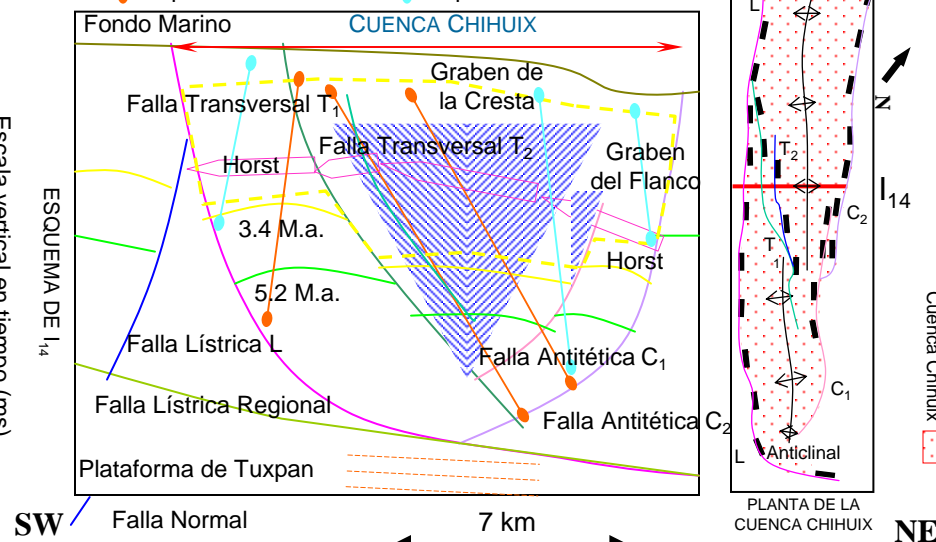


C16

INLINE I₁₄

□ Inclinación de Estratos ●●● Abanicos de crecimiento
○ Superficie Axial Inactiva ● Superficie Axial Activa

Escala vertical en tiempo (ms)



SW

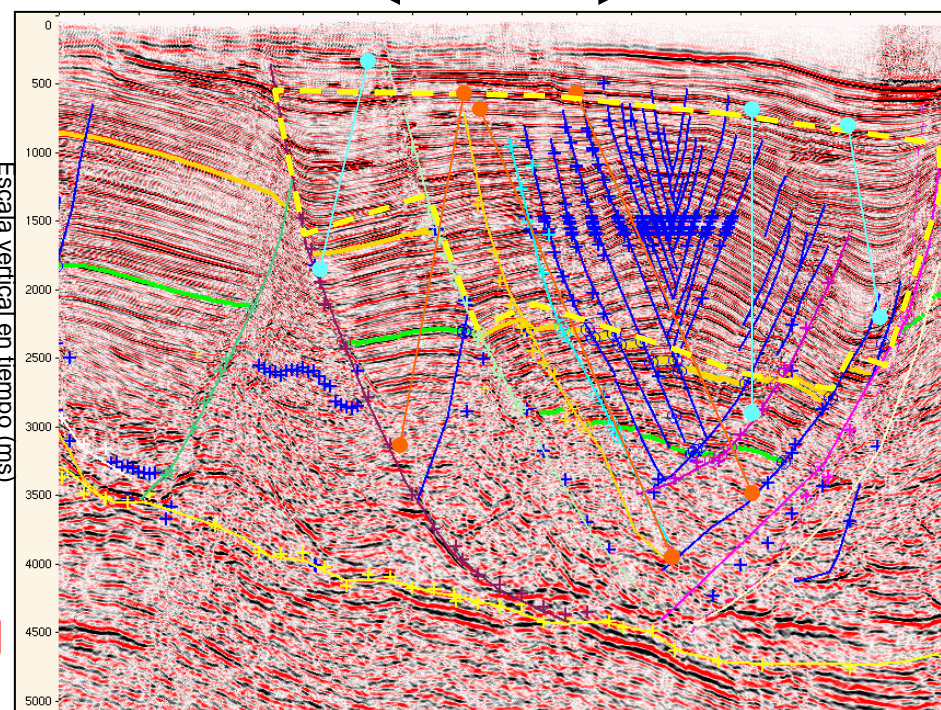
Falla Normal

7 km

NE

Escala vertical en tiempo (ms)

Cuenca ChihuiX

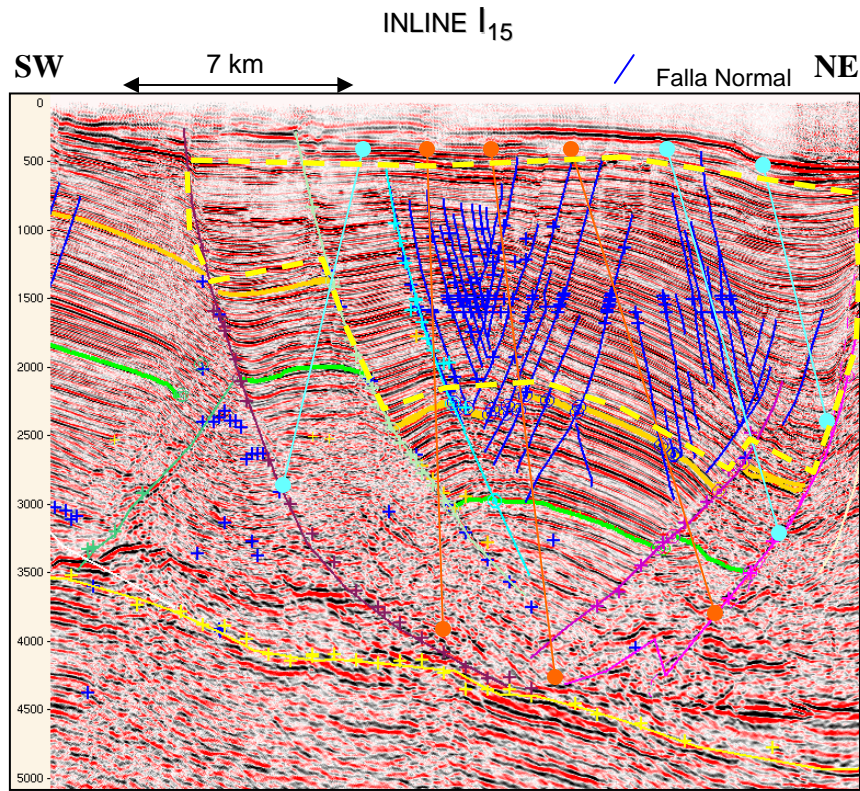


Evolución Estructural de la Cuenca ChihuiX

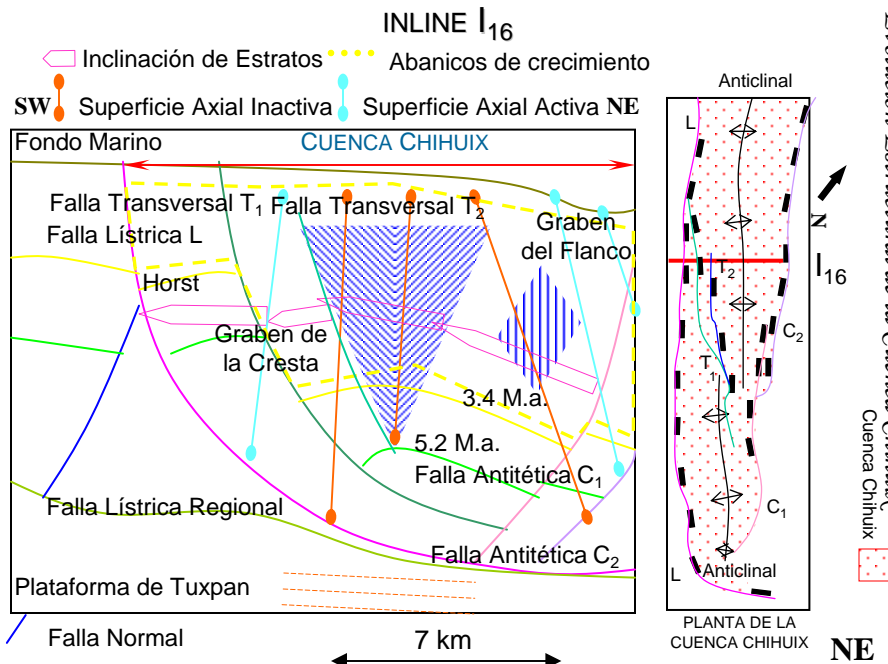
Cuenca ChihuiX



Marco Antonio Orduña Reyes

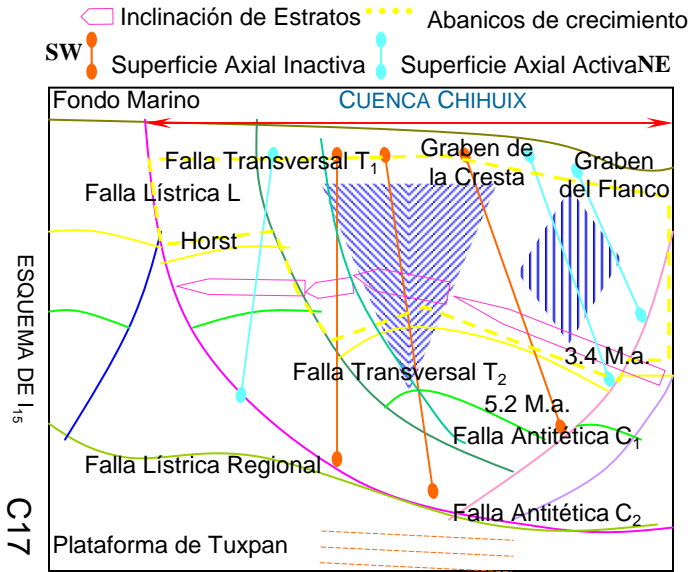


Escala vertical en tiempo (ms)

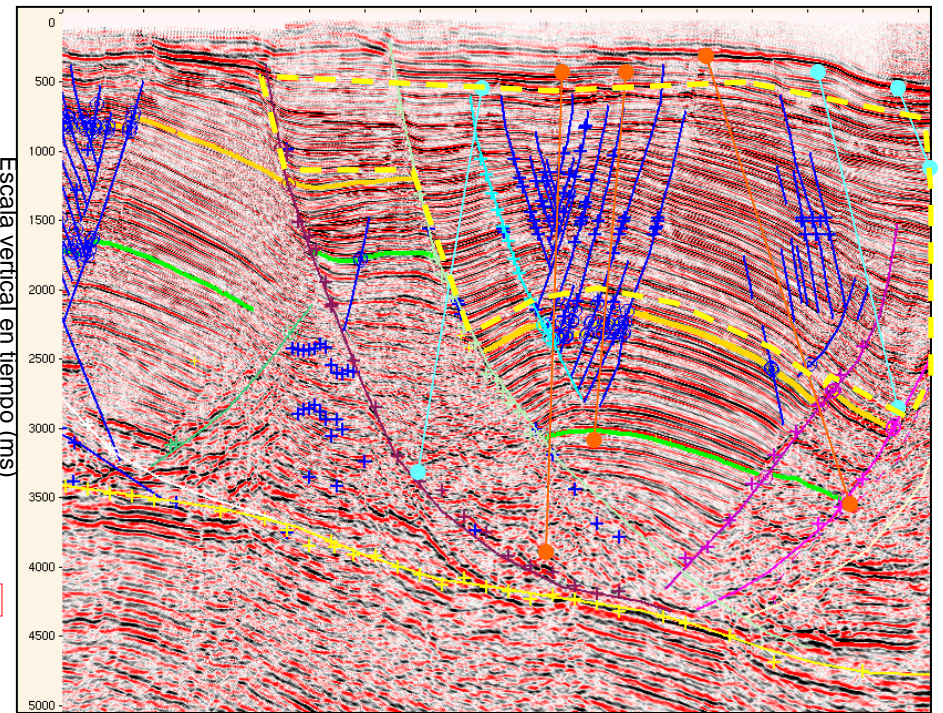


Evolución Estructural de la Cuenca ChihuiX

Cuenca ChihuiX

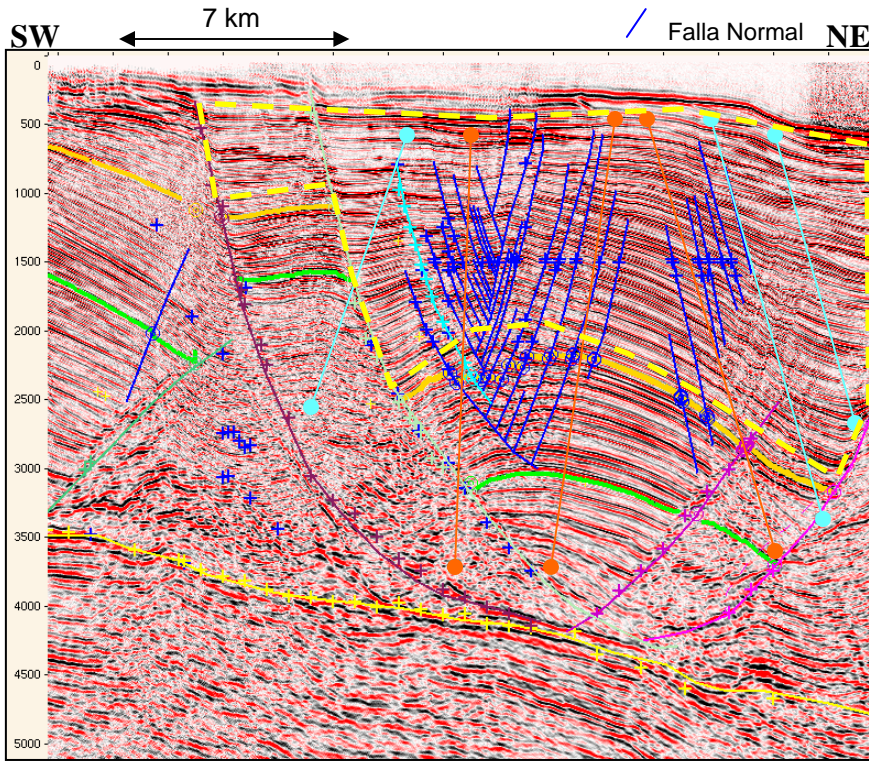


Escala vertical en tiempo (ms)



Marco Antonio Orduña Reyes

INLINE I₁₇

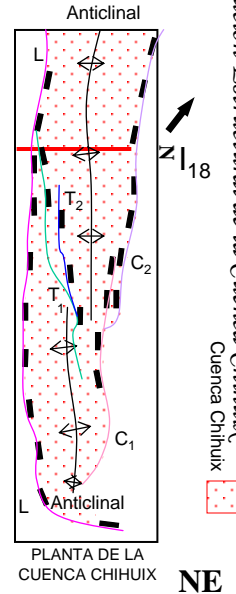
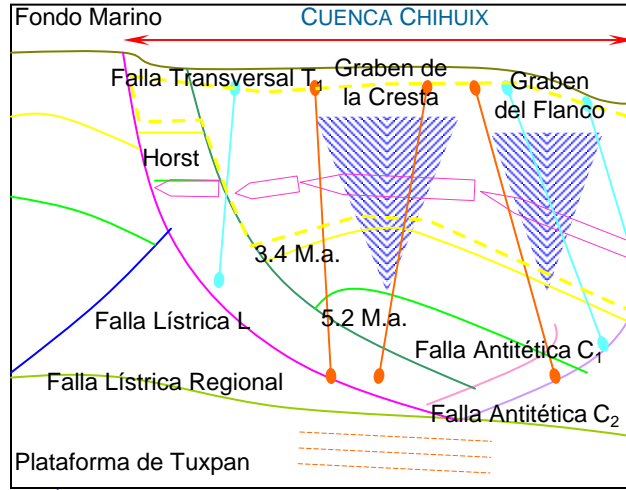


INLINE I₁₈

SW NE

Inclinación de Estratos Abanicos de crecimiento

Superficie Axial Inactiva Superficie Axial Activa



Evolución Estructural de la Cuenca ChihuiX

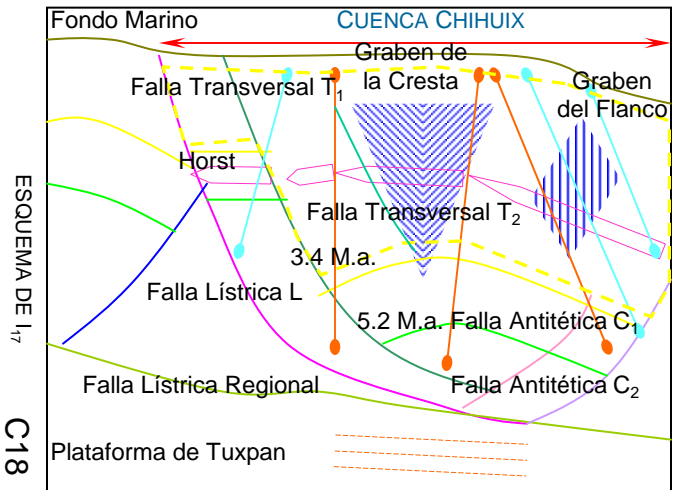
Cuenca ChihuiX

■

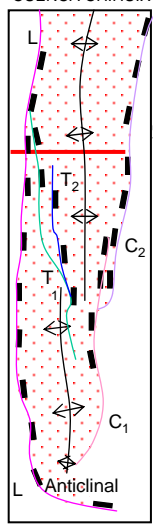
Inclinación de Estratos Abanicos de crecimiento

SW NE

Superficie Axial Inactiva Superficie Axial Activa

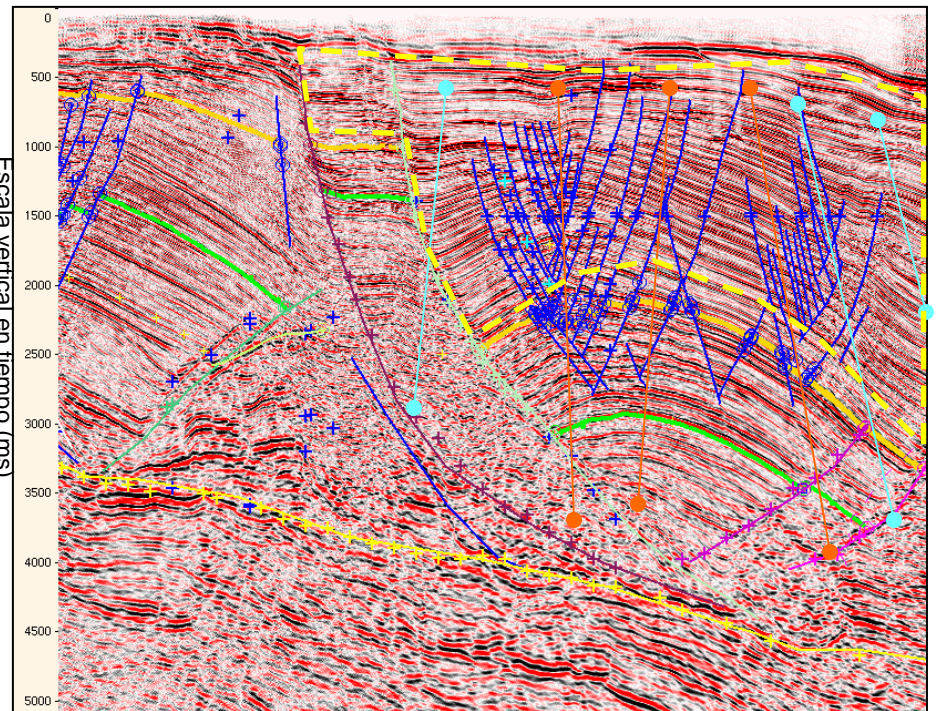


PLANTA DE LA CUENCA CHIHUIX



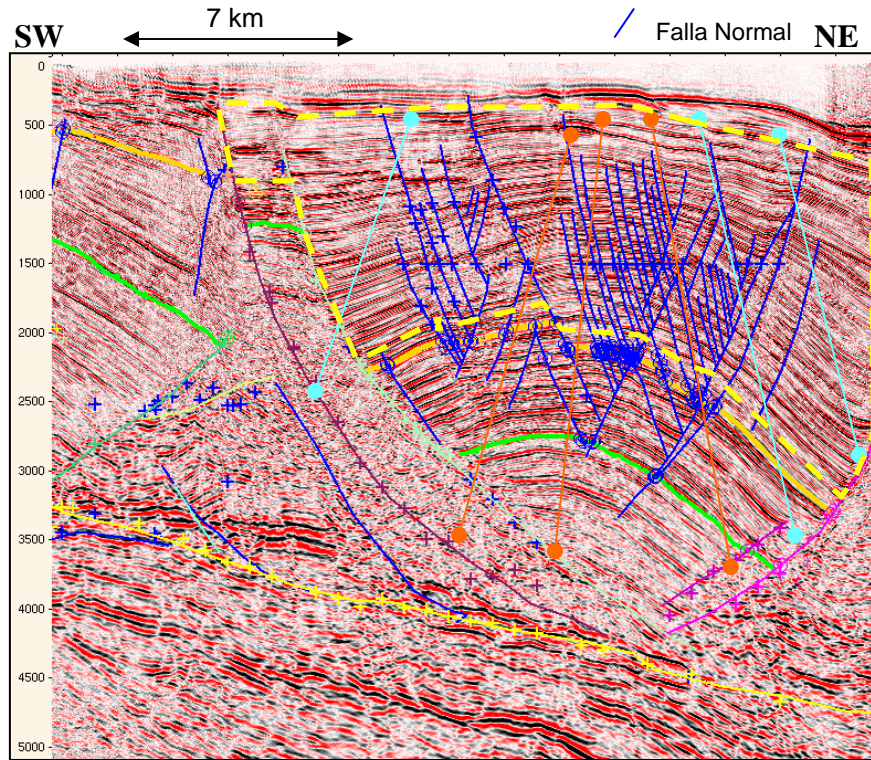
ESCALA vertical en tiempo (ms)

ESCALA vertical en tiempo (ms)

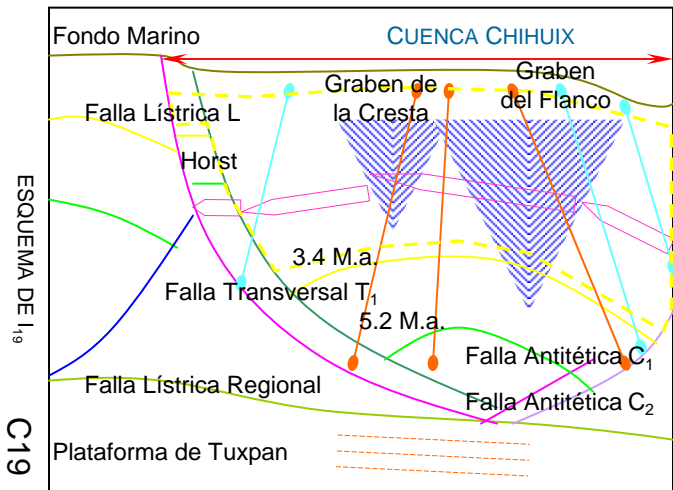


Marco Antonio Orduña Reyes

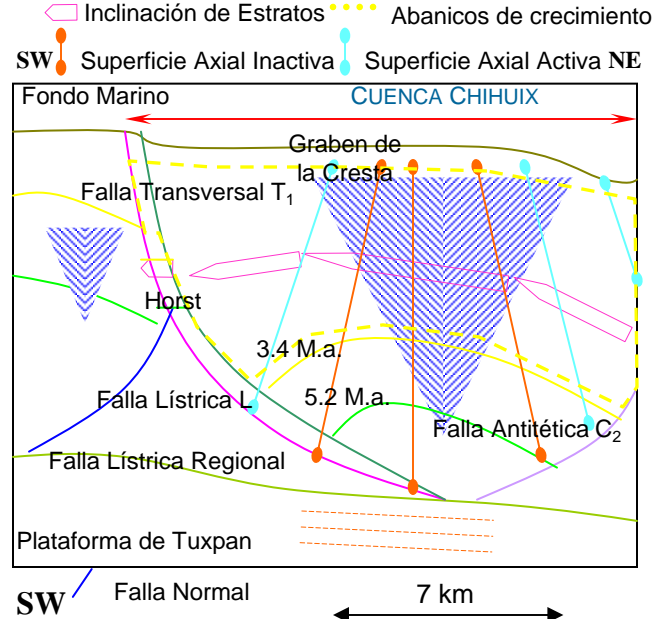
INLINE I₁₉



▭ Inclinación de Estratos - - - Abanicos de crecimiento
● Superficie Axial Inactiva ● Superficie Axial Activa



INLINE I₂₀



Escala vertical en tiempo (ms)

Escala vertical en tiempo (ms)

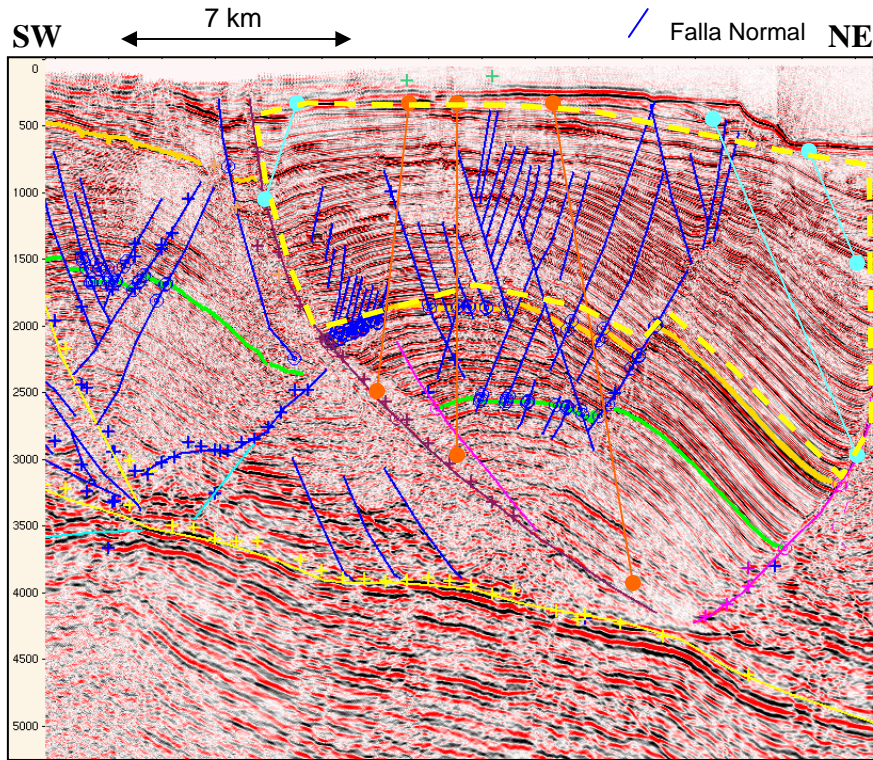
Evolución Estructural de la Cuenca Chihuix

Cuenca Chihuix

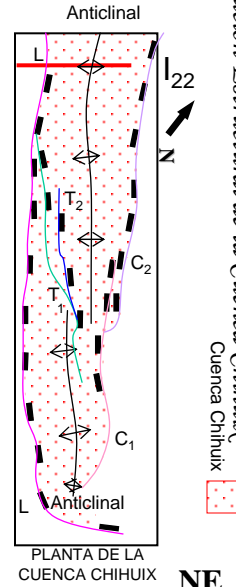
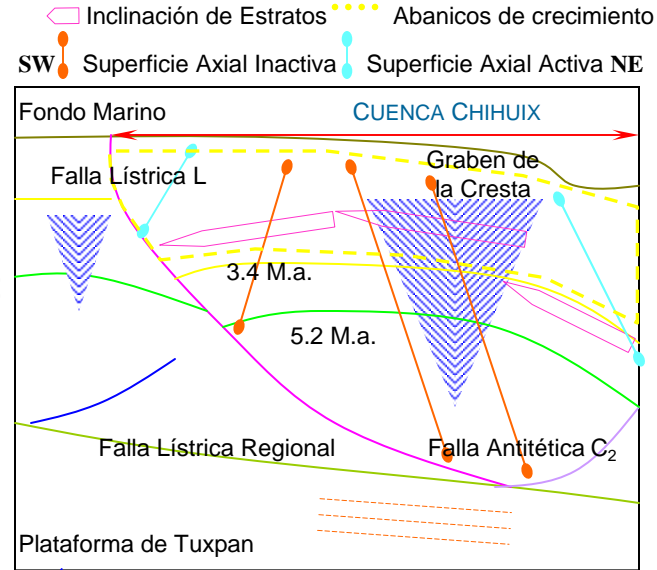


Cuenca Chihuix

INLINE I₂₁



INLINE I₂₂



Escala vertical en tiempo (ms)

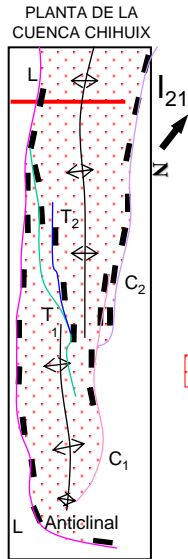
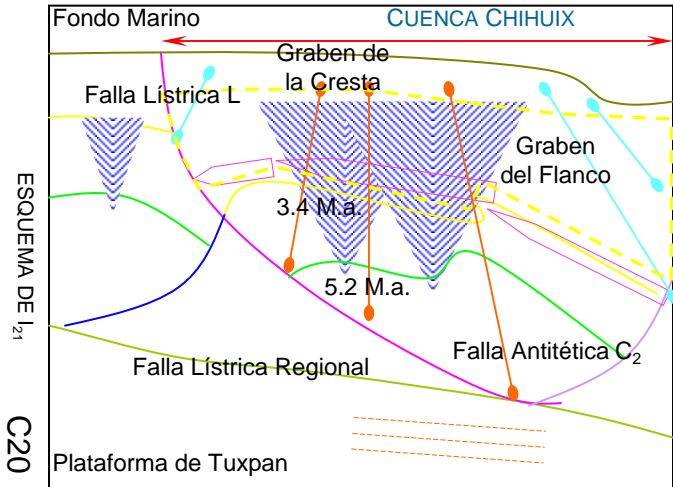
SW / Falla Normal

7 km

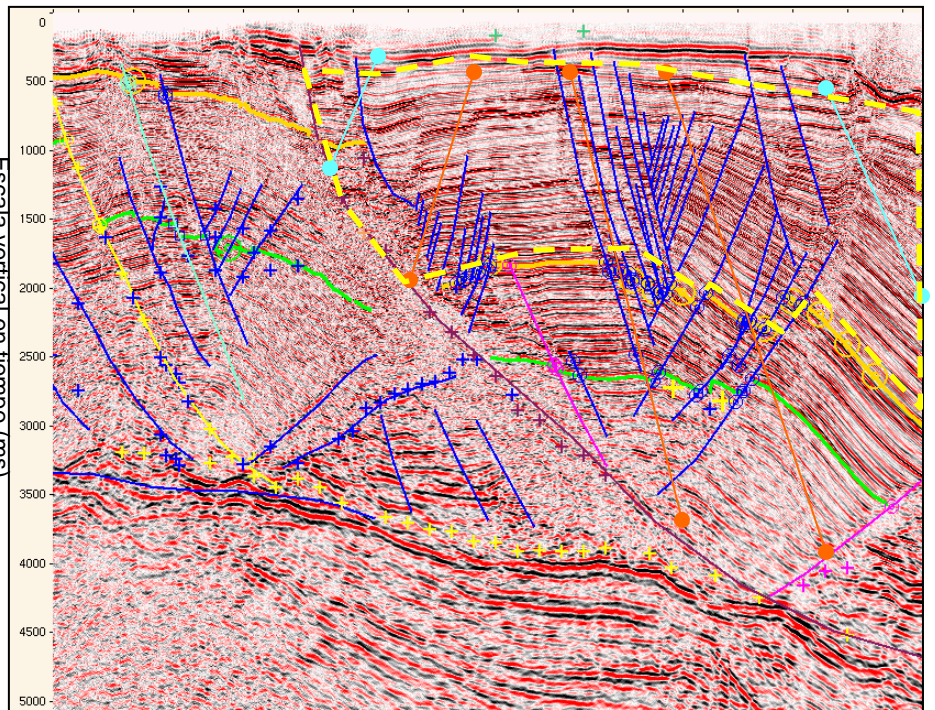
NE

Inclinación de Estratos Abanicos de crecimiento

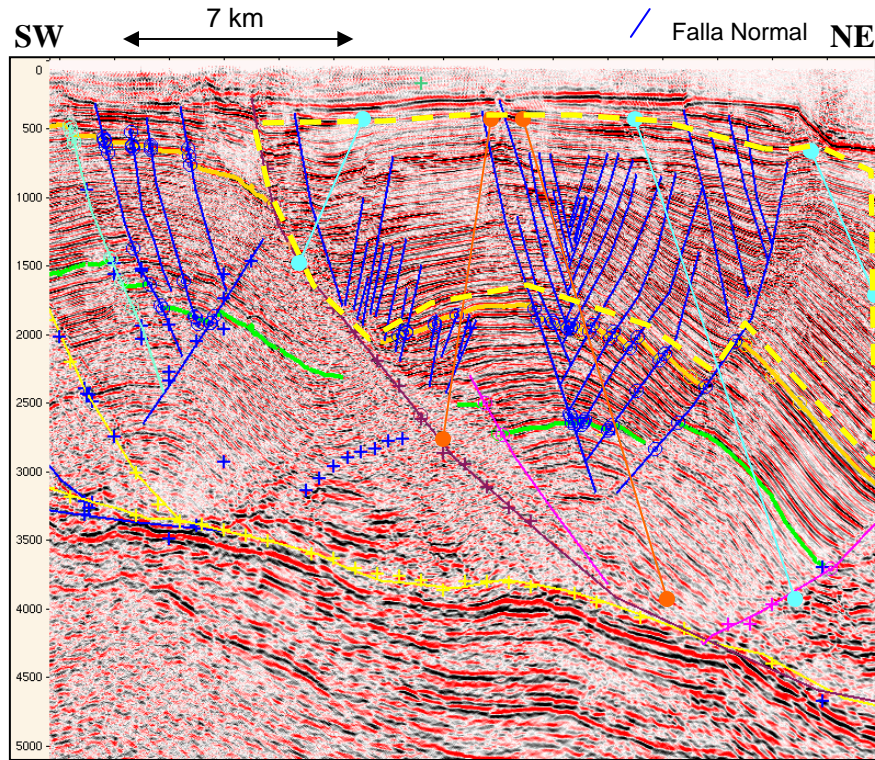
Superficie Axial Inactiva Superficie Axial Activa



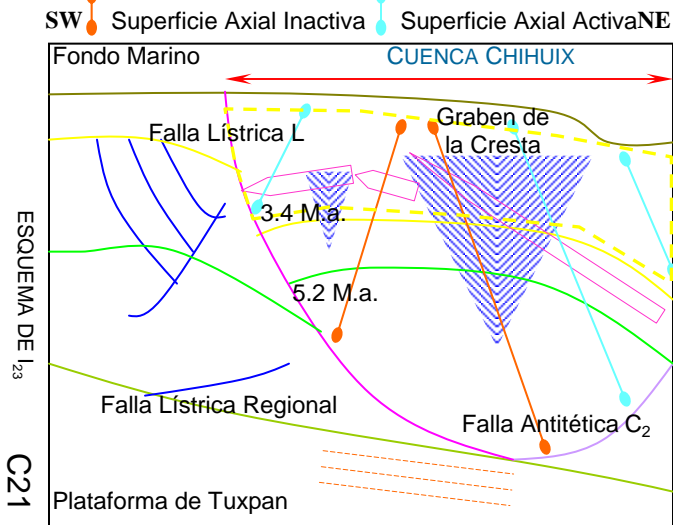
Escala vertical en tiempo (ms)



INLINE I₂₃

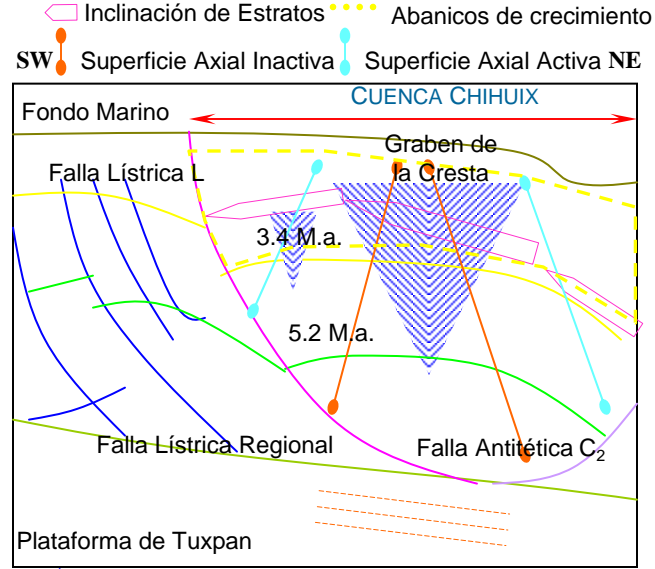


◊ Inclutación de Estratos ● Abanicos de crecimiento
● Superficie Axial Inactiva ● Superficie Axial Activa



C21

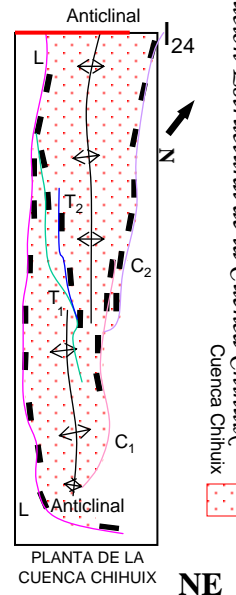
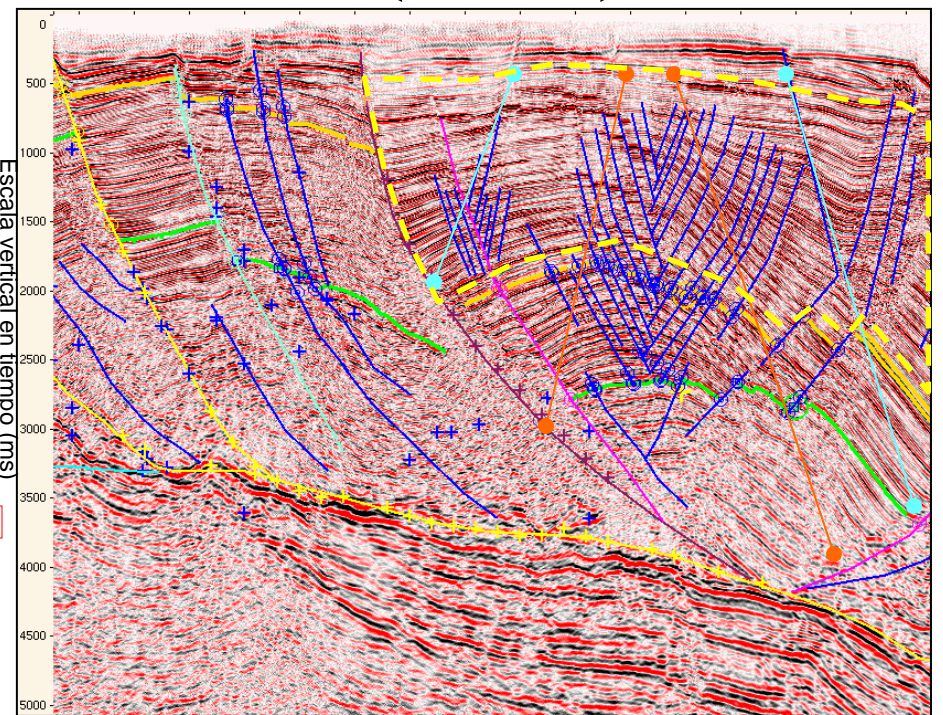
INLINE I₂₄



ESCALA vertical en tiempo (ms)

SW / Falla Normal

7 km / NE



ANEXO D

DESCRIPCIÓN DE LAS CROSSLINES

Hay que hacer notar que en toda el área Lankahuasa y con mayor énfasis en la Cuenca Chihuix se trató de correlacionar los reflectores que representan el Plioceno Temprano (en verde), 5.2 M.a., y el Plioceno Tardío (en amarillo), 3.4 M.a., por lo que en todos los perfiles van a estar presentes estos reflectores en todas las Crosslines. Su presencia en el bloque de techo y en el bloque de piso nos dan un indicio de la velocidad de sedimentación en ese punto de la cuenca, del tamaño del desplazamiento de la Falla LÍstrica y Antitética en la Cuenca Chihuix y poder dar la edad de los sucesos en ella; además nos van a indicar el grado de basculamiento en cada uno de los bloques que circundan a la cuenca y el grado de fallamiento dentro de ella. Por lo que al hablar de características ya sean de tipo cronológicas, sedimentarias o estructurales, muchas de esas conclusiones se obtuvieron a partir de un análisis de esos reflectores.

Crossline C1. La Falla LÍstrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie irregular, con fuerte echado en la parte más somera y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con un pliegue (pliegue de arrastre o drag fold) a los 2800 ms y hasta llegar a un nivel máximo de 3400 ms, donde su echado se vuelve cero y luego se invierte, entonces tiene una orientación hacia arriba con lo que la falla se hace más somera conforme avanza al Noroeste, hasta llegar a los 1500 ms. La Falla LÍstrica Regional ahora se ve que tiene un echado constante hacia el Sur, con una superficie lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 3500 ms y al Sur de 4200 ms. Debajo de la Falla LÍstrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla LÍstrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos. La Falla Transversal (T1) que se encuentra en el centro del *rollover* tiene la función de una pequeña Falla LÍstrica, ya que corta al *rollover* en dos secciones y al mismo ella posee un abanico de crecimiento. Debajo de la Falla LÍstrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera. Hay cuatro superficies axiales activas y cuatro superficies axiales inactivas. Aquí el bloque de piso no se observa basculado, debido a que la sección está perpendicular a la dirección de basculamiento. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos, en la parte inferior de la columna tienen una fuerte amplitud y hacia la cima va disminuyendo esa amplitud, por lo que se infiere que en la parte basal es un ambiente más próximo al borde de plataforma y en la cima es un ambiente de depósito más cercano a la parte media de la plataforma.

Crossline C2. La Falla LÍstrica tiene una superficie irregular, con fuerte echado en la parte más somera (al Sur de la Cuenca Chihuix) y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con un pliegue (pliegue de arrastre o drag fold) a los 3200 ms y hasta llegar a un nivel máximo de 3700 ms, donde su echado se vuelve cero y luego se invierte, entonces tiene una orientación hacia arriba con lo que la falla se hace más somera conforme avanza al Noroeste, pero a los 2300 ms de nuevo empieza a disminuir el echado hasta que se vuelve horizontal. La Falla LÍstrica Regional tiene un echado constante hacia el Sur, con una superficie lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 3600 ms y al Sur de

4300 ms. Debajo de la Falla Lútrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lútrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es menor comparado con el echado del Crossline anterior. La Falla Transversal (T1) que se encuentra en el centro del *rollover* tiene la función de una pequeña Falla Lútrica, ya que corta al *rollover* en dos secciones (la sección en la parte Sur tiene un echado mayor que la sección de la parte Norte, que están casi horizontales los reflectores) y al mismo ella posee un abanico de crecimiento; además tiene un fuerte echado en la parte más somera y sufre un cambio de posición a los 2300 ms y se vuelve casi horizontal. Debajo de la Falla Lútrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera. Hay cuatro superficies axiales activas y cuatro superficies axiales inactivas. Aquí el bloque de piso tiene reflectores paralelos ondulados y no se observa basculado debido a que la sección está perpendicular a la dirección de basculamiento. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos, en la parte inferior de la columna tienen una fuerte amplitud y hacia la cima va disminuyendo esa amplitud, por lo que se infiere que en la parte basal es un ambiente más próximo al borde de plataforma y en la cima es un ambiente de depósito más cercano a la parte media de la plataforma.

Crossline C3. La Falla Lútrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie irregular, con fuerte echado en la parte más somera y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con dos pliegues (pliegues de arrastre o drag folds) a los 3200 ms y a los 3300 ms, hasta llegar a un nivel máximo de 4000 ms, donde su echado se vuelve cero y luego se invierte, entonces tiene una orientación hacia arriba con lo que la falla se hace más somera conforme avanza al Noroeste, pero a los 2900 ms de nuevo empieza a disminuir el echado hasta que se vuelve horizontal. La Falla Lútrica Regional tiene un echado constante casi horizontal hacia el Sur, con una superficie casi lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 3700 ms y al Sur de 4500 ms. Aquí se muestra la falla conjugada (C2) en la parte Norte de la cuenca, con una forma irregular. Debajo de la Falla Lútrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lútrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es menor comparado con el echado del Crossline anterior. La Falla Transversal (T1) que se encuentra en el centro del *rollover* tiene la función de una pequeña Falla Lútrica, ya que corta al *rollover* en dos secciones (la sección en la parte Sur tiene un echado un poco mayor que la sección de la parte Norte, pero ambas secciones tienen reflectores casi horizontales) y al mismo ella posee un abanico de crecimiento (que podría ser casi una continuación del abanico de la parte Sur); además tiene un fuerte echado en la parte más somera y sufre un cambio de posición a los 2900 ms y se vuelve casi horizontal. Aquí se muestra por primera vez la Falla Transversal (T2) que tiene una traza curva y es pequeña. El Graben de la Cresta en la parte Sur de la cuenca se muestra como un conjunto de trazas de fallas que forman parábolas. Debajo de la Falla Lútrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la

presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera, aunque es de menor tamaño que en el Crossline anterior. Hay tres superficies axiales activas y tres superficies axiales inactivas. Aquí el bloque de piso tiene reflectores paralelos ondulados y no se observa basculado debido a que la sección está perpendicular a la dirección de basculamiento. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos en la mayor parte de la columna tienen una fuerte amplitud, por lo que se infiere que en la parte basal es un ambiente de borde de plataforma y en la cima es un ambiente de depósito más cercano al borde de la plataforma.

Crossline C4. La Falla Lítrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie más regular, con fuerte echado y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con dos pliegues (pliegues de arrastre o drag folds) a los 3500 ms y a los 3600 ms, hasta llegar a un nivel máximo de 4100 ms, donde su echado se vuelve cero y luego se invierte, entonces tiene una orientación hacia arriba con lo que la falla se hace más somera lentamente conforme avanza al Noroeste, pero a los 3100 ms de nuevo empieza a disminuir el echado hasta que se vuelve horizontal. La Falla Lítrica Regional tiene un echado constante casi horizontal hacia el Sur, con una superficie casi lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 3700 ms y al Sur de 4600 ms. La falla conjugada (C2) en la parte Norte de la cuenca tiene una forma irregular pero es menos irregular que en el Crossline anterior; además aquí aparece por primera vez la traza de la falla conjugada (C1) que está horizontal. Debajo de la Falla Lítrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lítrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es menor comparado con el echado del Crossline anterior. La Falla Transversal (T1) que se encuentra en el centro del *rollover* es pequeña y tiene una orientación horizontal. La Falla Transversal (T2) tiene un fuerte echado y se curva en la parte inferior, tiene un pequeño abanico de crecimiento asociado (que podría ser casi una continuación del abanico de la parte Sur de la cuenca). El Graben de la Cresta se muestra como un conjunto de trazas de fallas que forman parábolas. Debajo de la Falla Lítrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera, aunque es de menor tamaño que en el Crossline anterior. Hay cinco superficies axiales activas y cinco superficies axiales inactivas. Aquí el bloque de piso tiene reflectores paralelos y no se observa basculado debido a que la sección está perpendicular a la dirección de basculamiento. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos en la mayor parte de la columna tienen una fuerte amplitud, por lo que se infiere que en la parte basal es un ambiente de borde de plataforma y en la cima es un ambiente de depósito más cercano al borde de la plataforma.

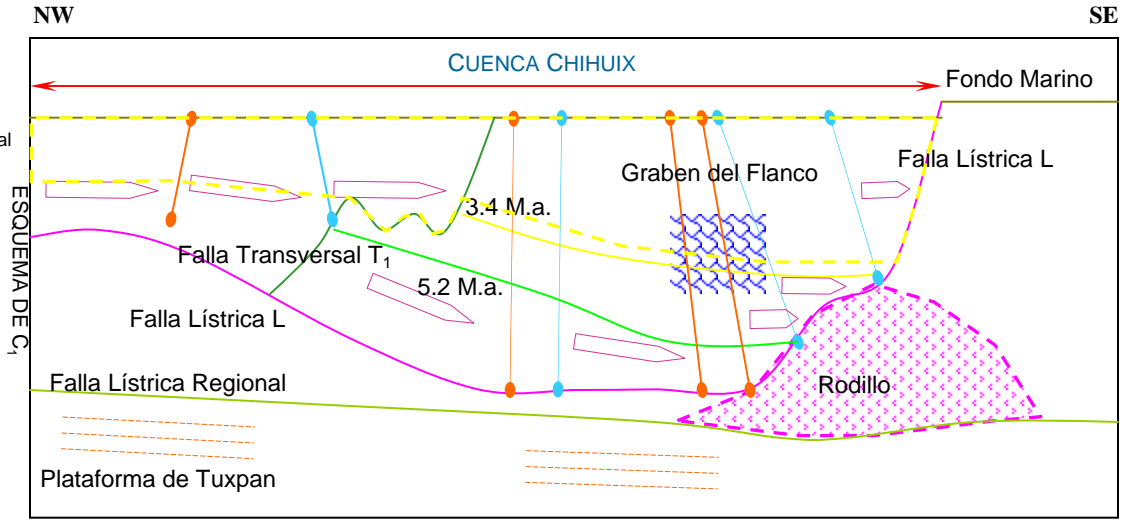
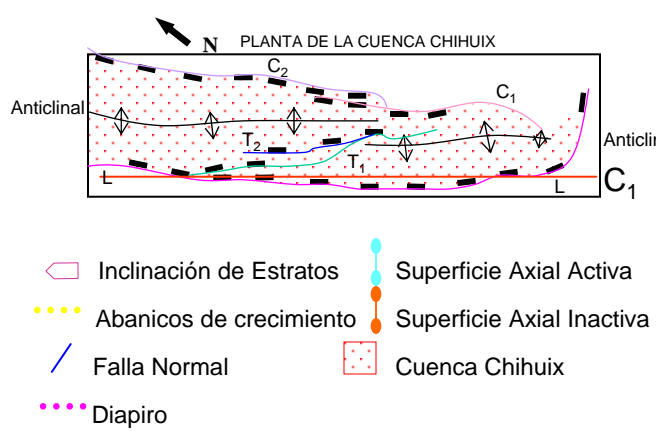
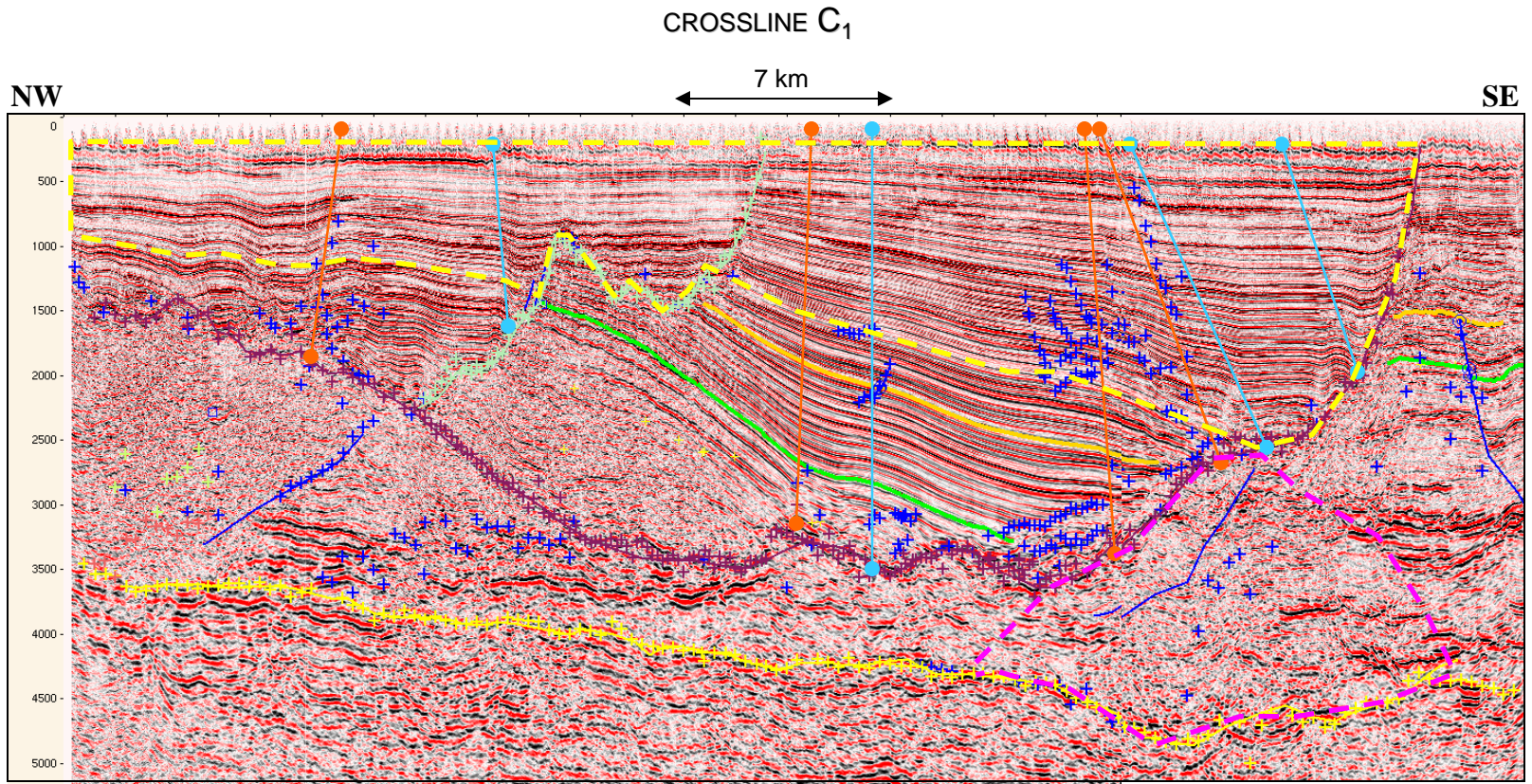
Crossline C5. La Falla Lítrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie regular, con fuerte echado y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con un pliegue (pliegue de arrastre o drag fold) a los 3750 ms, hasta llegar a un nivel máximo de 4200 ms, donde su echado se vuelve cero y luego se invierte, entonces tiene una orientación hacia arriba con lo que la falla se hace más somera lentamente conforme avanza al

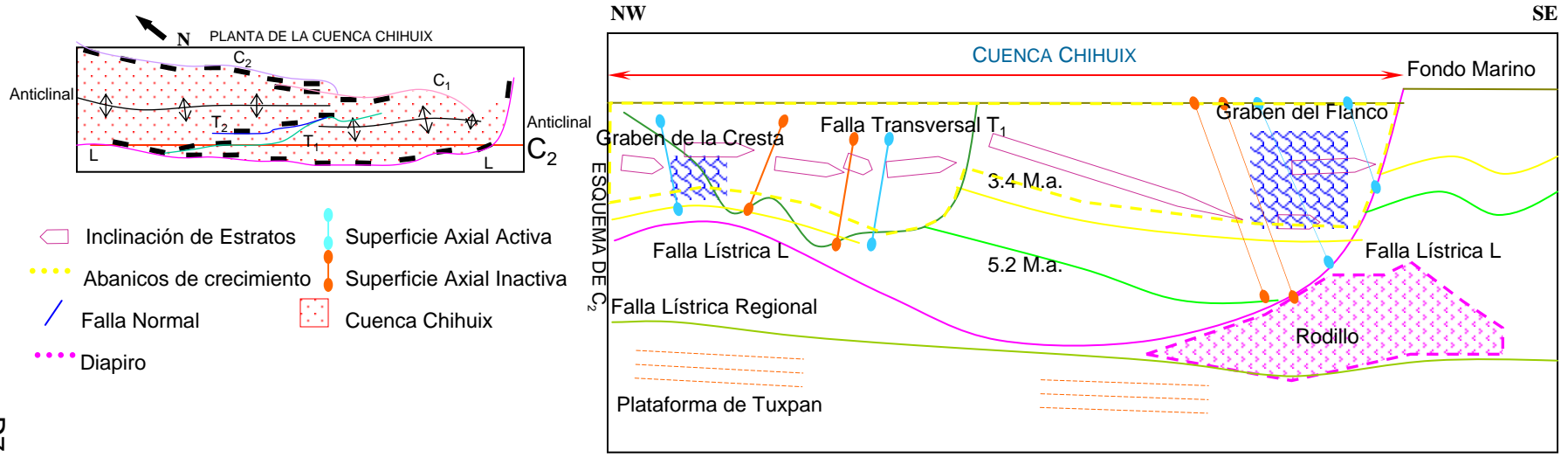
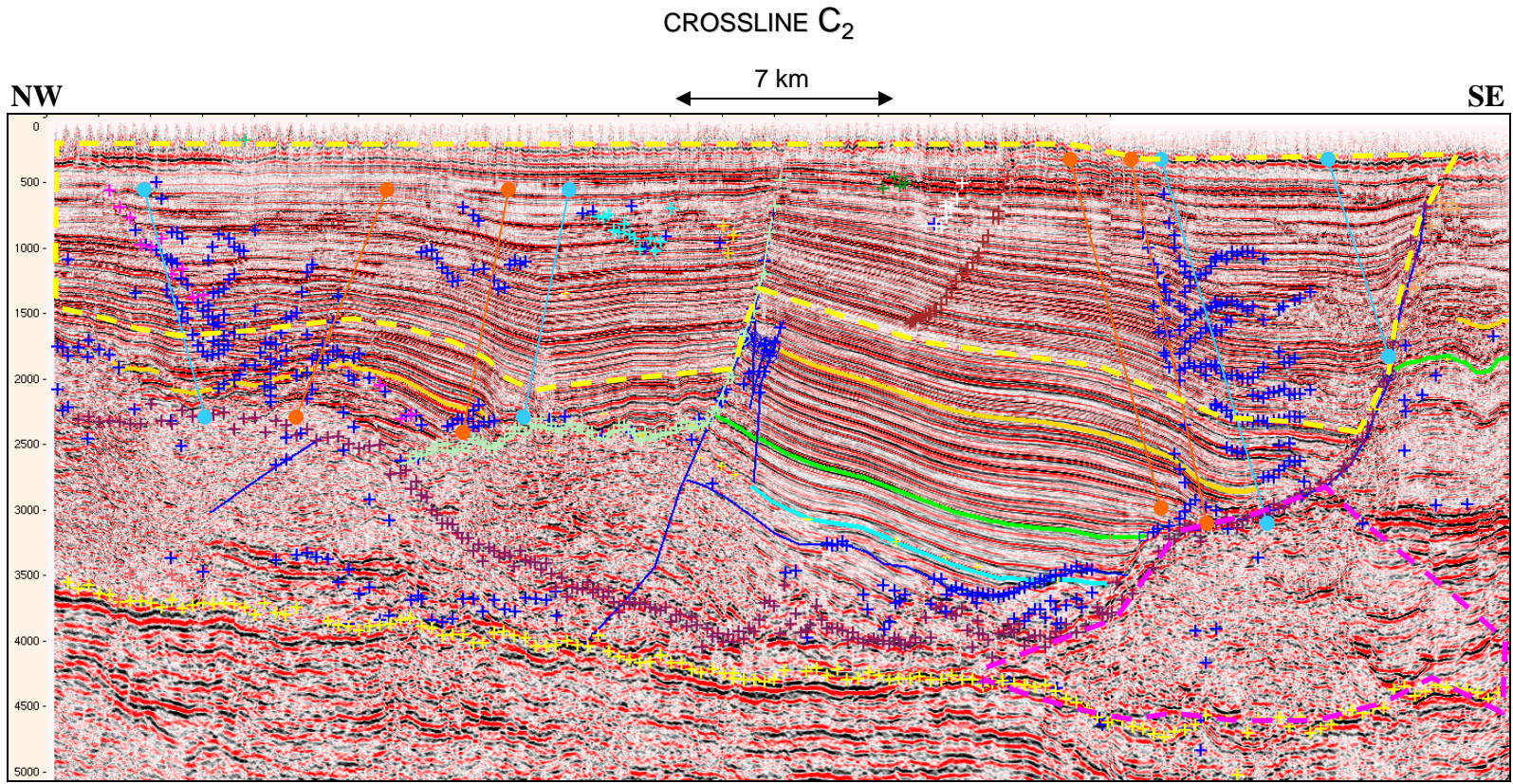
Noroeste y es colineal con la Falla Lútrica Regional. La Falla Lútrica Regional tiene un echado constante casi horizontal hacia el Sur y una superficie casi lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 3800 ms y al Sur de 4700 ms. La traza de la falla conjugada (C2) en la parte Norte de la cuenca es colineal con la Falla Lútrica Regional. La traza de la falla conjugada (C1) tiene una concavidad hacia abajo y solamente está en la parte central de la cuenca. Debajo de la Falla Lútrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lútrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es casi horizontal. Las dos fallas Transversales (T1 y T2) que se encuentran en el centro del *rollover* son pequeñas. La Falla Transversal (T1) tiene una orientación horizontal y la Falla Transversal (T2) tiene un echado no muy pronunciado. El abanico de crecimiento es continuo en toda la cuenca. Los grabens de la cresta se muestran como un conjunto de trazas de fallas que forman parábolas y el Graben del Flanco forma un conjunto de trazas semirrectas. Debajo de la Falla Lútrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera, aunque es de menor tamaño que en el perfil anterior. Debajo de la Falla Antitética (C1) hay otro rodillo debajo de otra cuña de material dúctil. Hay seis superficies axiales activas y seis superficies axiales inactivas. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos en toda la columna y tienen una fuerte amplitud, por lo que se infiere que están asociados a un ambiente de borde de plataforma.

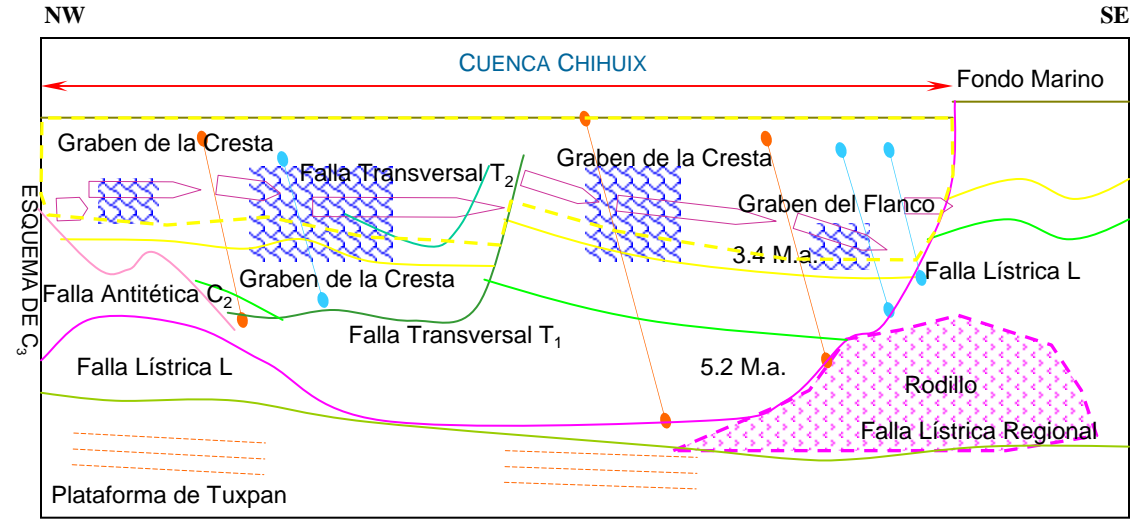
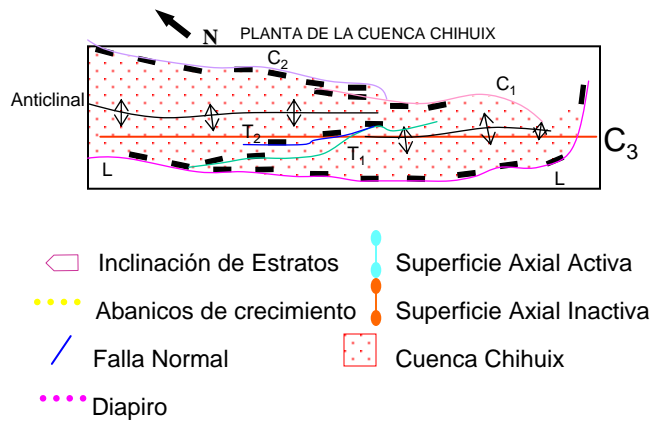
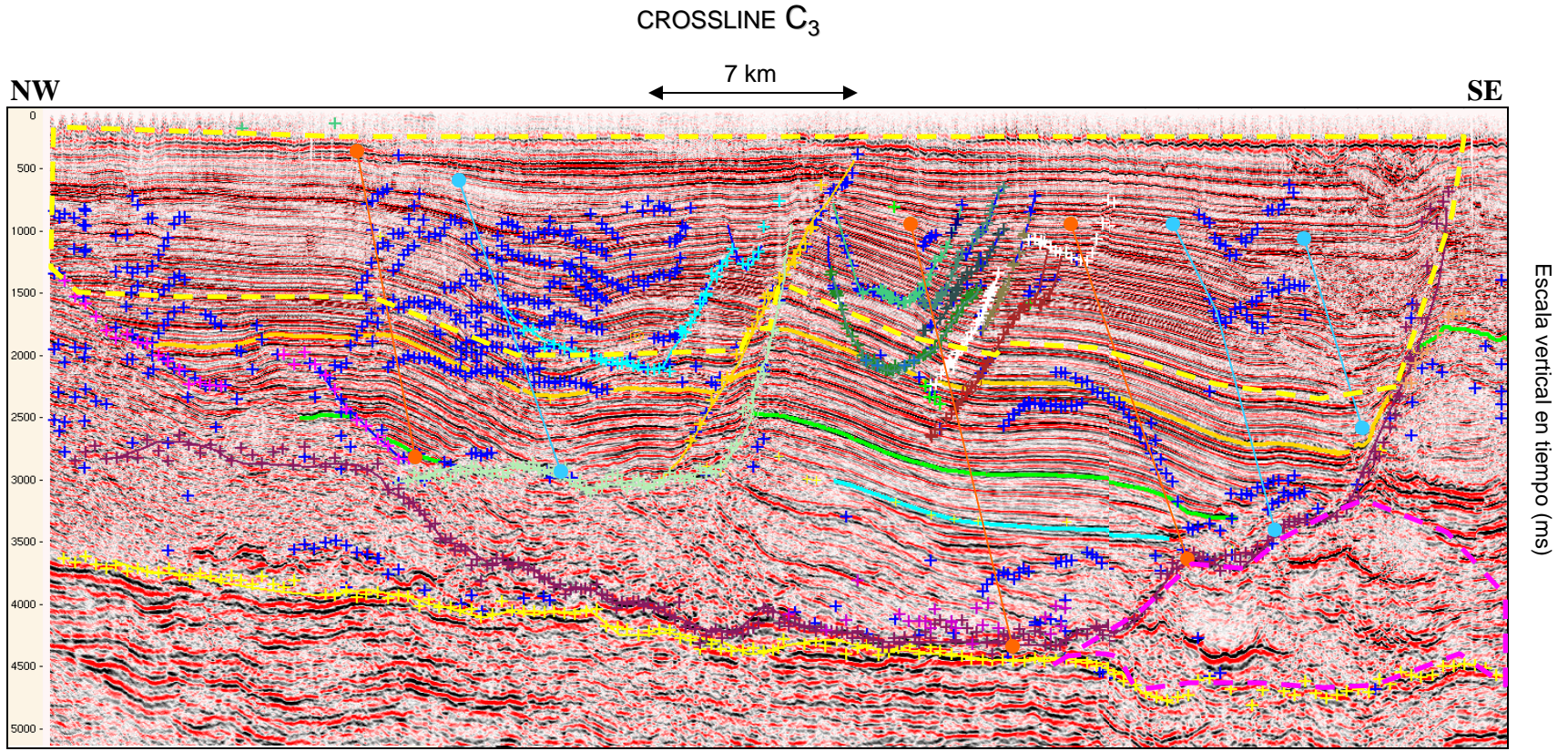
Crossline C6. La Falla Lútrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie regular, con fuerte echado y va disminuyendo conforme se profundiza (formando una concavidad hacia arriba), con un pliegue (pliegue de arrastre o drag fold) a los 4200 ms, hasta llegar a un nivel máximo de 4100 ms, donde su echado se invierte y se vuelve colineal con la Falla Lútrica Regional. La Falla Lútrica Regional tiene un echado constante casi horizontal hacia el Sur y una superficie casi lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 4000 ms y al Sur de 4800 ms. La traza de la falla conjugada (C2) en la parte Norte de la cuenca es colineal con la Falla Lútrica Regional y en la parte Sur está somera y tiene un echado medio. La traza de la falla conjugada (C1) tiene una concavidad hacia abajo y solamente va de la parte Sur a la parte central de la cuenca. Debajo de la Falla Lútrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lútrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es horizontal y en el centro de la cuenca se pliegan ligeramente hacia abajo. La Falla Transversal T2 ya desapareció y la Falla Transversal T1 es pequeña y es casi colineal con la Falla Lútrica Regional. El abanico de crecimiento es continuo en toda la cuenca. Los grabens de la cresta se muestran como un conjunto de trazas de fallas que forman parábolas y el Graben del Flanco forma un conjunto de trazas semirrectas. Debajo de la Falla Lútrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera, aunque es de

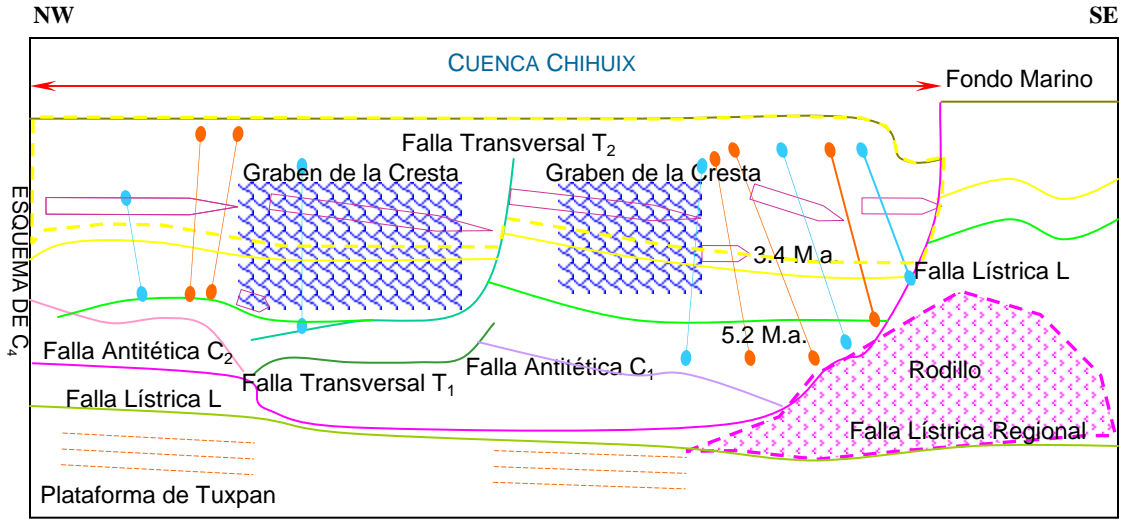
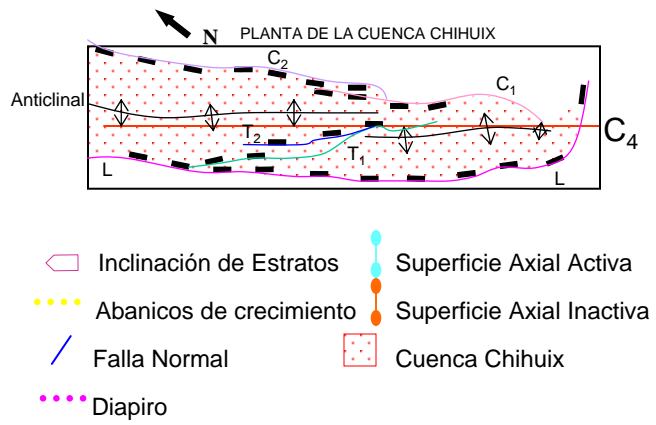
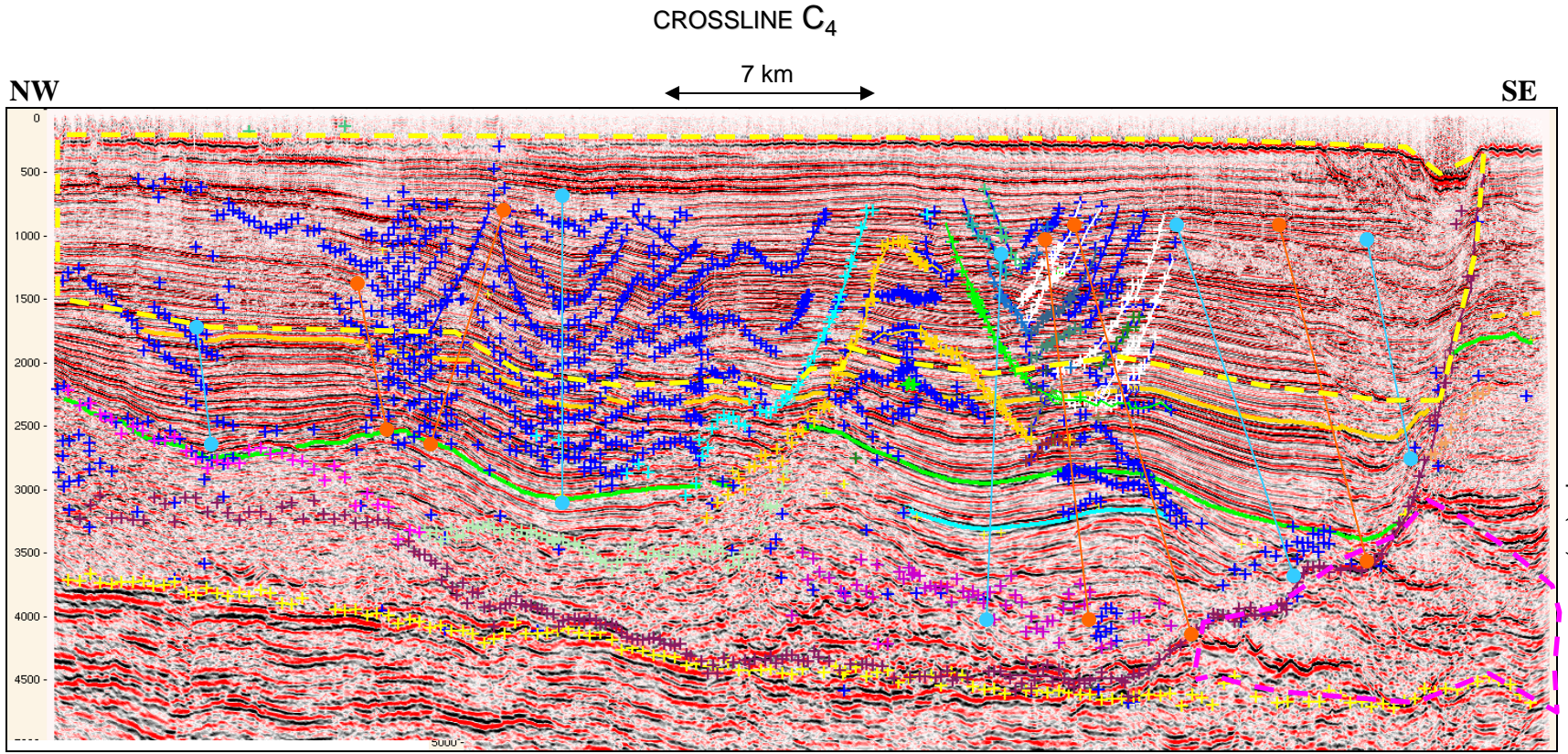
menor tamaño que en el perfil anterior. Debajo de la Falla Antitética (C1) hay otro rodillo debajo de otra cuña de material dúctil y es más grande en comparación con el perfil anterior. Hay cuatro superficies axiales activas y cuatro superficies axiales inactivas. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos en toda la columna y tienen una fuerte amplitud, por lo que se infiere que están asociados a un ambiente de borde de plataforma.

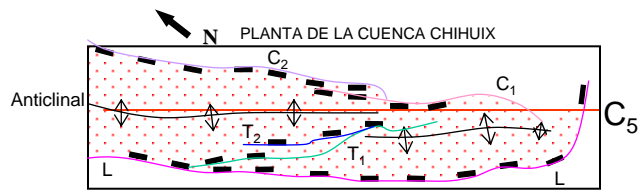
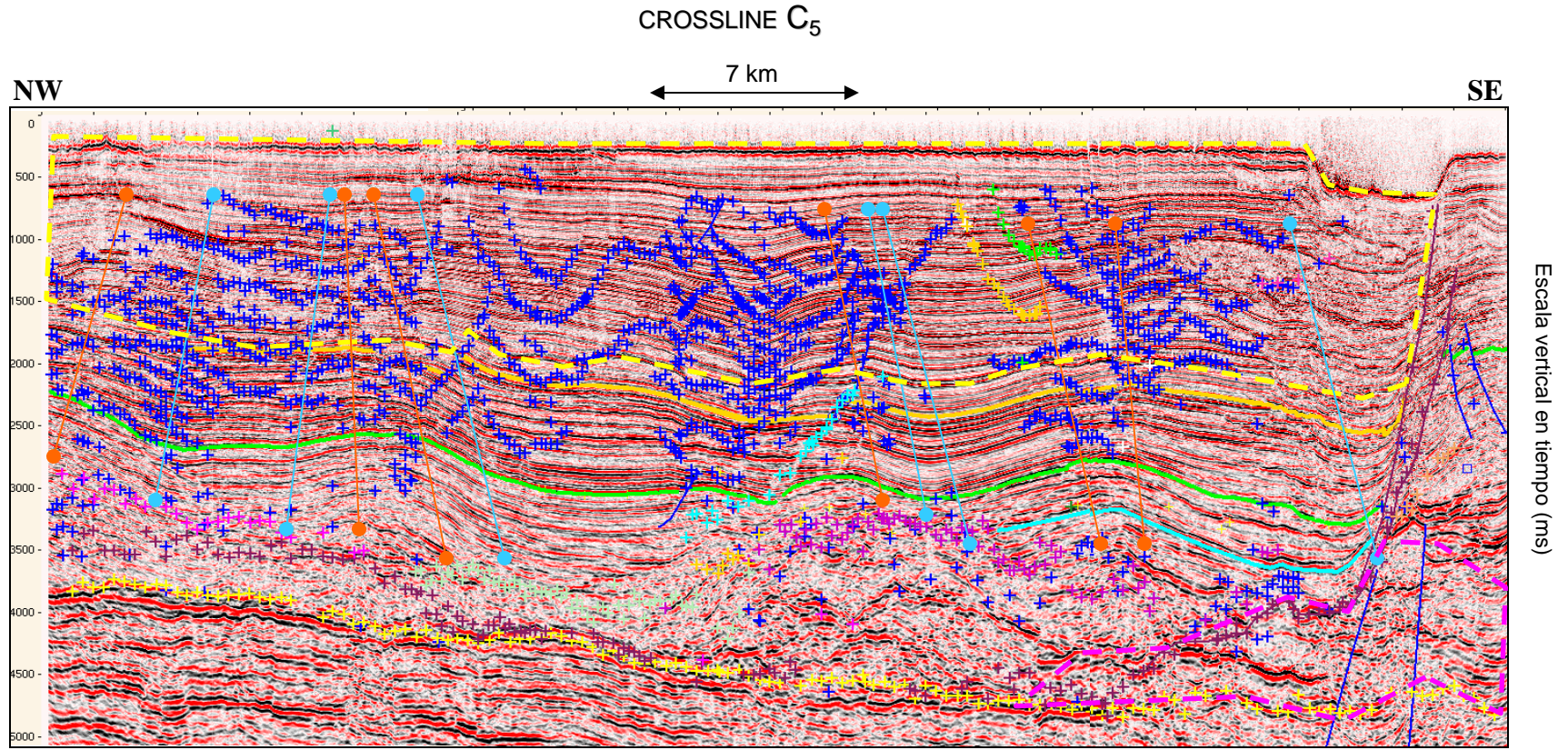
Crossline C7. La Falla Lítrica (al Sur de la Cuenca Chihuix) tiene una superficie regular, con un echado casi vertical y va disminuyendo conforme se profundiza, tiene un pliegue (pliegue de arrastre o drag fold) a los 4300 ms y se inflexiona hasta llegar a un nivel máximo de 4500 ms, donde su echado se invierte y se vuelve colineal con la Falla Lítrica Regional. La Falla Lítrica Regional tiene un echado constante casi horizontal hacia el Sur y una superficie casi lisa, por lo que en el Norte de la cuenca tiene una profundidad de 4000 ms y al Sur de 5000 ms. La traza de la falla conjugada (C2) en la parte central de la cuenca tiene una concavidad hacia arriba y está dentro del rodillo debajo de la falla conjugada (C1) y en la parte Sur está más somera y tiene un echado horizontal. La traza de la falla conjugada (C1) tiene una concavidad hacia abajo y solamente va de la parte Sur a la parte central de la cuenca, pero llega a ocupar la mitad del área de la cuenca. Debajo de la Falla Lítrica Regional hay un conjunto de reflectores paralelos medianamente continuos, con una amplitud variable; lo cual está asociado a los depósitos carbonatados de la Plataforma de Tuxpan. La Falla Lítrica forma un *rollover*, dentro del cual se observan los sedimentos precinemáticos (donde están los marcadores que representan el Plioceno Temprano (5.2 M.a.) y el Plioceno Tardío (3.4 M.a.) y los abanicos de crecimiento que corresponden a los sedimentos sincinemáticos; además el echado de estos reflectores es horizontal y en el centro de la cuenca se pliegan ligeramente hacia abajo. La Falla Transversal T1 ya desapareció. El abanico de crecimiento es continuo en toda la cuenca. Los grabens se muestran como un conjunto de trazas semirrectas. Debajo de la Falla Lítrica se observa un conjunto de reflectores con un arreglo caótico lo cual nos indica la presencia de un conjunto arcilloso, el cual no tiene una forma tabular, sino de cuña y su vértice está en la parte más somera, es muy pequeño. Debajo de la Falla Antitética (C1) hay otro rodillo debajo de otra cuña de material dúctil y es más grande en comparación con el perfil anterior. Hay cuatro superficies axiales activas y cuatro superficies axiales inactivas. Los reflectores dentro de la Cuenca Chihuix son continuos en toda la columna y tienen una fuerte amplitud, por lo que se infiere que están asociados a un ambiente de borde de plataforma.



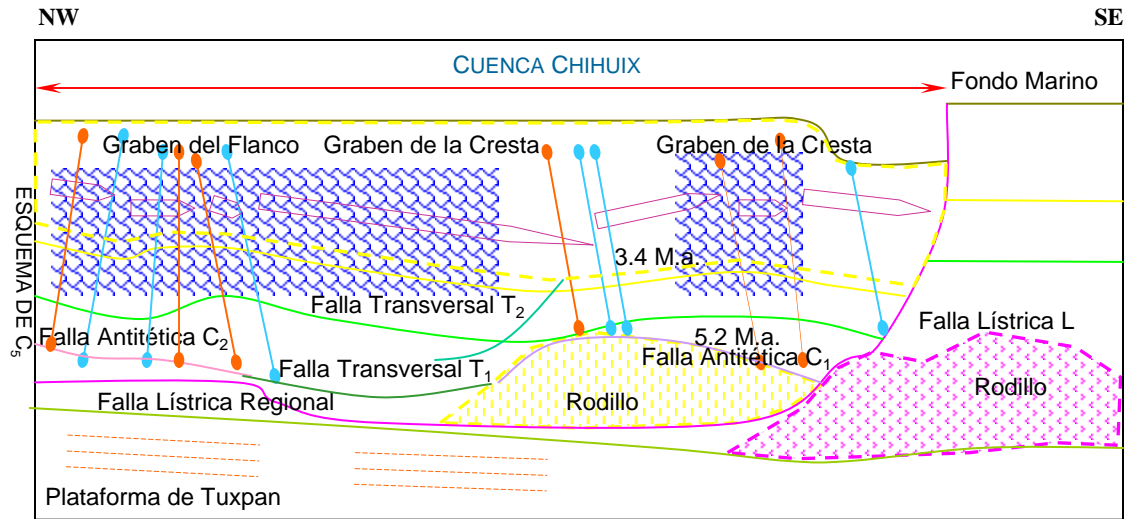


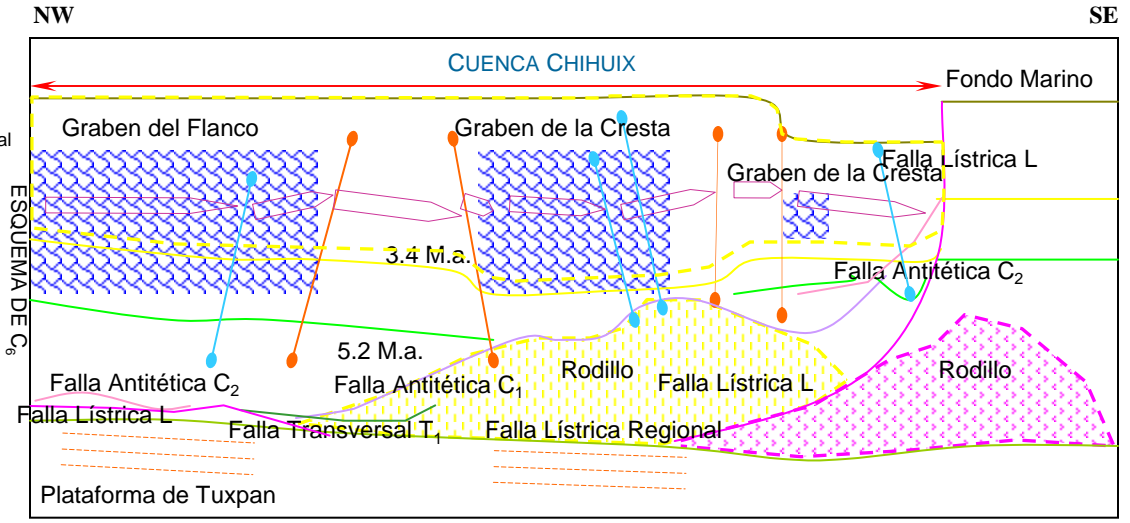
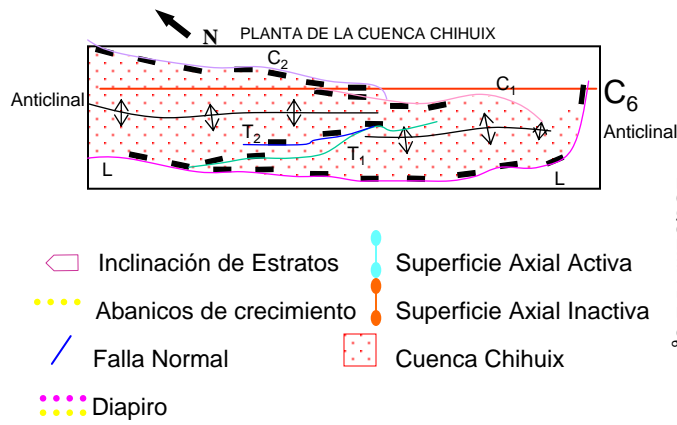
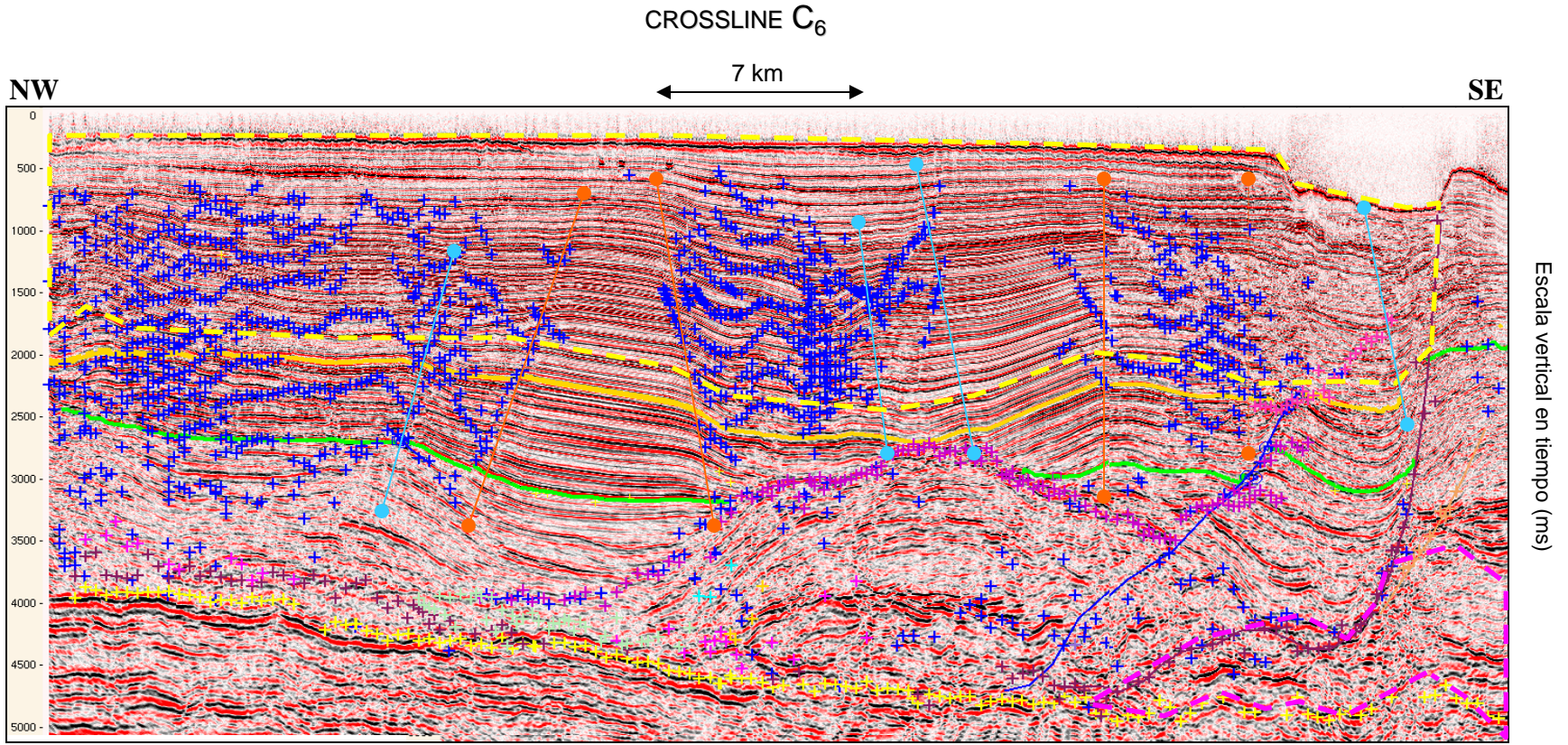


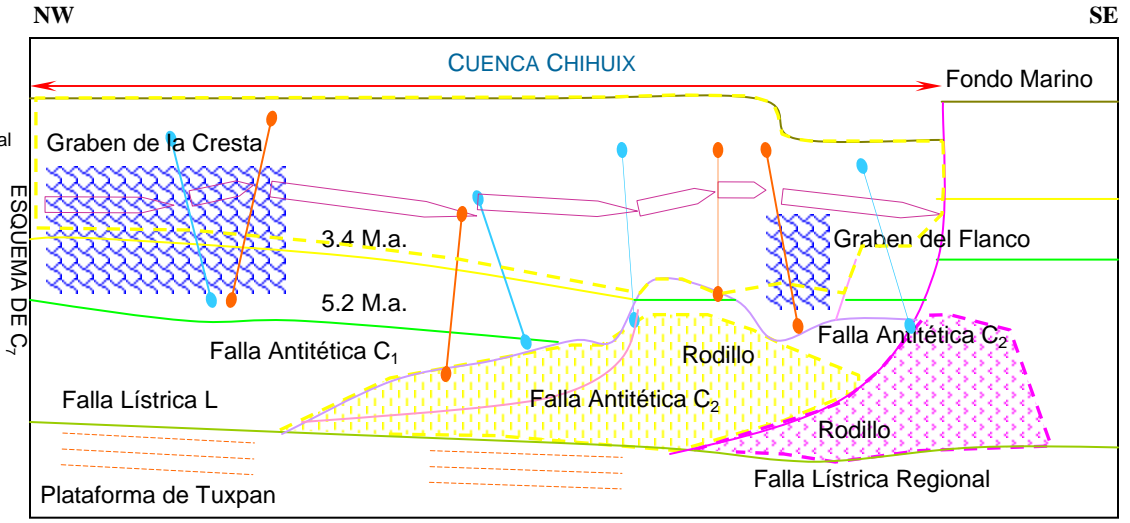
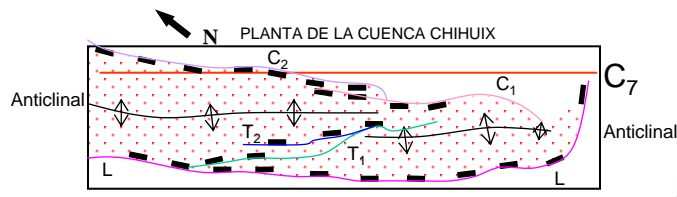
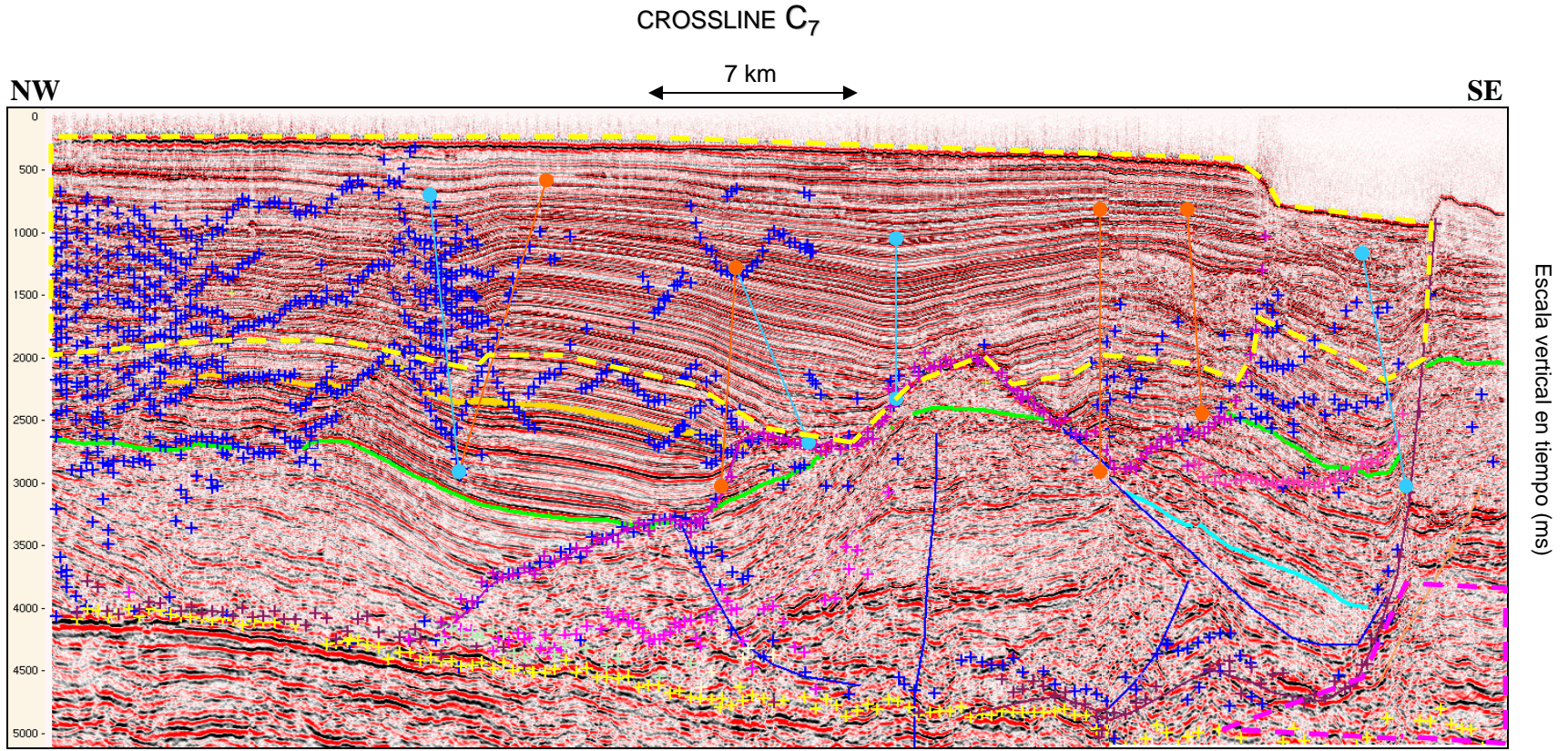




- Inclínación de Estratos
- Superficie Axial Activa
- Abanicos de crecimiento
- Superficie Axial Inactiva
- Falla Normal
- Cuenca Chihuix
- Diapiro







- ◊ Inclínación de Estratos
- Abanicos de crecimiento
- Falla Normal
- Diapiro
- Superficie Axial Activa
- Superficie Axial Inactiva
- ◻ Cuenca Chihuix

ANEXO E

DESCRIPCIÓN DE LAS TIMESLICES

Timeslice T1000. En planta se ve que tanto la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia en NE en la parte Sur de la cuenca, de esta forma se ve más claro como las fallas de crecimiento no son superficies rectas sino superficies curvas. La Falla Antitética (C2) se separa más de la Falla Lítrica, por lo que es más ancha la Cuenca Chihuix en la parte Norte. Las Fallas Transversales (T1 y T2) atraviesan la cuenca en una forma diagonal y tienen una geometría semirrecta. Aunque en el perfil no es claro, el conjunto de trazas de las fallas normales del Graben de la Cresta tienen una forma ojival, siendo el eje de la ojiva paralelo al eje del pliegue que forman las Fallas Lítrica (L) y Antitéticas (C1 y C2). La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas de los Grabens de los Flancos son semirrectas y paralelas.

Timeslice T1500. En planta la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia en NE en la parte Sur de la cuenca. Las Fallas Antitéticas (C1 y C2) son más grandes que en el perfil anterior, pero su separación con la Falla Lítrica es menor. Las Fallas Transversales (T1 y T2) atraviesan la cuenca en una forma diagonal y tienen una geometría semirrecta. El conjunto de trazas de las fallas normales del Graben de la Cresta tienen una forma ojival, siendo el eje de la ojiva paralelo al eje del pliegue que forman las Fallas Lítrica (L) y Antitéticas (C1 y C2). La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas de los Grabens de los Flancos son semirrectas y paralelas.

Timeslice T2000. En planta la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia en NE en la parte Sur de la cuenca. Las Fallas Antitéticas (C1 y C2) son más grandes que en el perfil anterior, pero su separación con la Falla Lítrica es menor. Las Fallas Transversales (T1 y T2) atraviesan la cuenca en una forma diagonal y tienen una geometría semirrecta y son más pequeñas que en el perfil anterior. El conjunto de trazas de las fallas normales del Graben de la Cresta tienen una forma ojival, siendo el eje de la ojiva paralelo al eje del pliegue que forman las Fallas Lítrica (L) y Antitéticas (C1 y C2). La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas de los Grabens de los Flancos son semirrectas y paralelas.

Timeslice T2500. En planta la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia en NE en la parte Sur de la cuenca. Las Fallas Antitéticas (C1 y C2) son más grandes que en el perfil anterior, pero su separación con la Falla Lítrica es menor. La Falla Transversal (T1) atraviesa la cuenca en una forma diagonal y la Falla Transversal (T2) es muy pequeña, ambas tienen una geometría semirrecta. El conjunto de trazas de las fallas normales del Graben de la Cresta tienen una forma ojival, siendo el eje de la ojiva paralelo al eje del pliegue que forman las Fallas Lítrica (L) y Antitéticas (C1 y C2). La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas de los Grabens de los Flancos son semirrectas y paralelas.

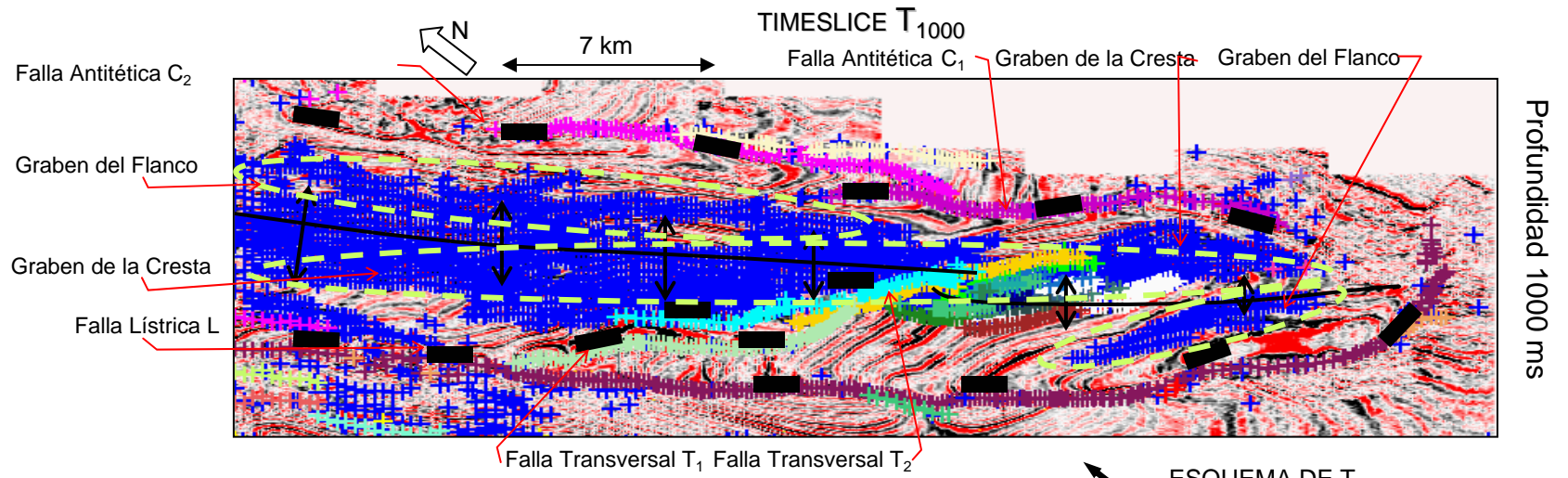
Timeslice T3000. En planta la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia en NE en la parte Sur de la cuenca. La Falla Antitética (C2) es más grande que en el perfil anterior, pero está seccionada;

en cambio, la Falla Antitética (C1) es más pequeña, pero su separación con respecto a la Falla Lítrica es menor, en cambio la separación entre ellas es mayor. La Falla Transversal (T1) atraviesa la cuenca en una forma diagonal y la Falla Transversal (T2) casi desaparece, ambas tienen una geometría semirrecta. El Graben de la Cresta es muy pequeño y su eje es paralelo al eje del pliegue que forman las Fallas Lítrica (L) y Antitéticas (C1 y C2). El Graben del Flanco es pequeño en la parte Sur de la cuenca. La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas del Graben del Flanco son semirrectas y paralelas.

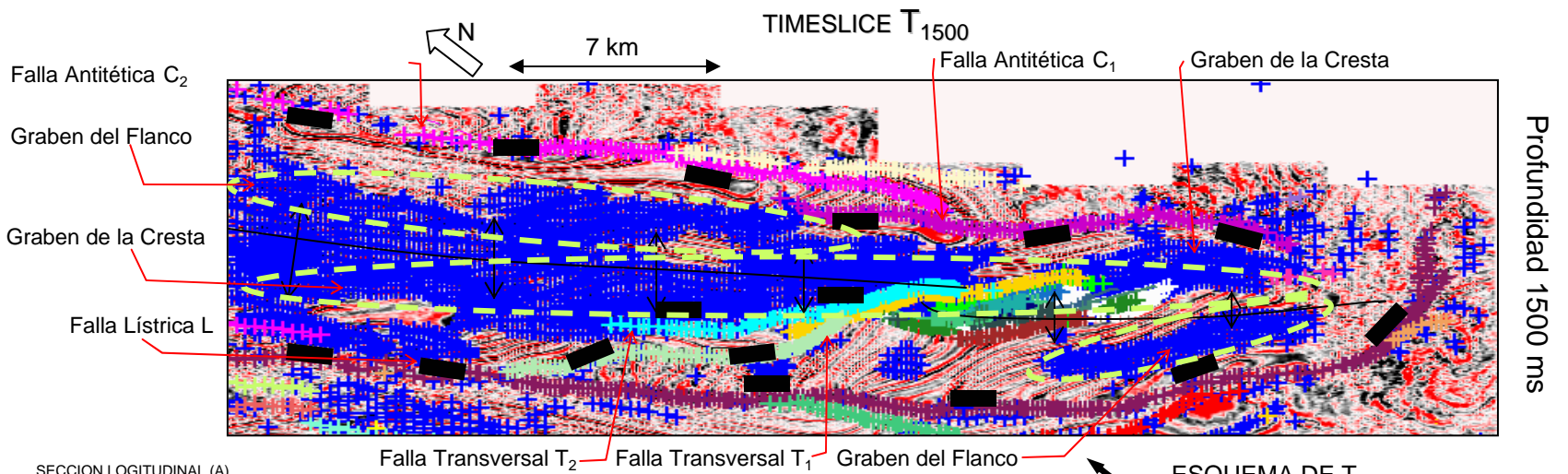
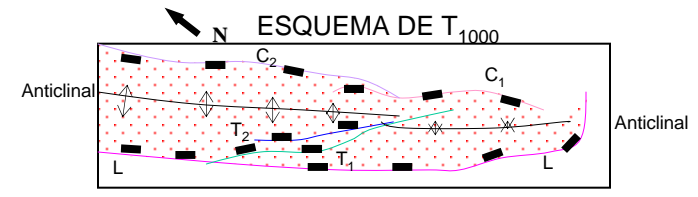
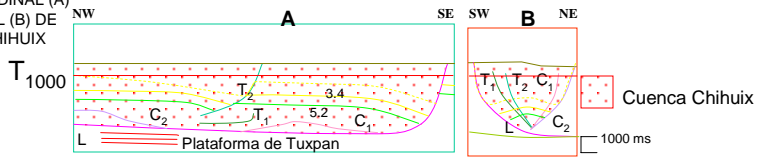
Timeslice T3500. En planta la Falla Lítrica como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia el NE en la parte Sur de la cuenca. La Falla Antitética (C2) es menor que en el perfil anterior y está seccionada; además la Falla Antitética (C1) es muy pequeña y está muy próxima a la Falla Lítrica. La separación de las fallas Antitéticas (C1 y C2) con respecto a la Falla Lítrica es menor que en el perfil anterior. La Falla Transversal (T1) atraviesa la cuenca en una forma diagonal y la Falla Transversal (T2) casi desaparece, ambas tienen una geometría semirrecta. El Graben de la Cresta casi desaparece y el Graben del Flanco es pequeño en la parte Sur de la cuenca. La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas del Graben del Flanco son semirrectas y paralelas.

Timeslice T4000. En planta la Falla Lítrica (de forma curva) como las Fallas Antitéticas (C1 y C2) tienen una orientación NW-SE y son casi paralelas. La Falla Lítrica se curva hacia el NE en la parte Sur de la cuenca. La Falla Antitética (C2) es más menor que en el perfil anterior y está seccionada; además la Falla Antitética (C1) desapareció porque se traslapa con la Falla Lítrica. La separación de la Falla Antitética (C2) con respecto a la Falla Lítrica es menor que en el perfil anterior. La Falla Transversal (T1) atraviesa la cuenca en una forma diagonal y la Falla Transversal (geometría recta) (T2) desapareció. El Graben de la Cresta desapareció y el Graben del Flanco es pequeño en la parte Sur de la cuenca. La orientación del eje del pliegue es diagonal con respecto a la cuenca. Las trazas del Graben del Flanco son semirrectas y paralelas.

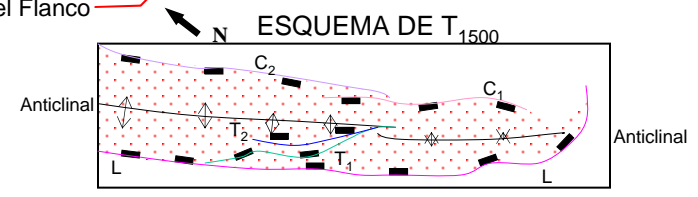
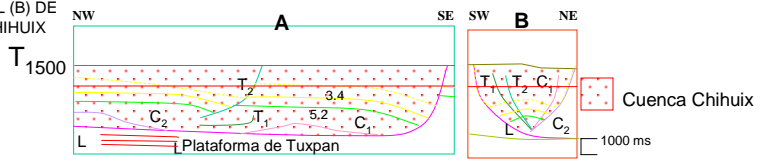
Timeslice T4500. Todas las estructuras internas de la Cuenca Chihuix ya no existen porque en esta profundidad las fallas que la forman se traslapan y sólo permanece la traza de la Falla Lítrica que tiene una orientación NW-SE y se curva en la parte Sur.

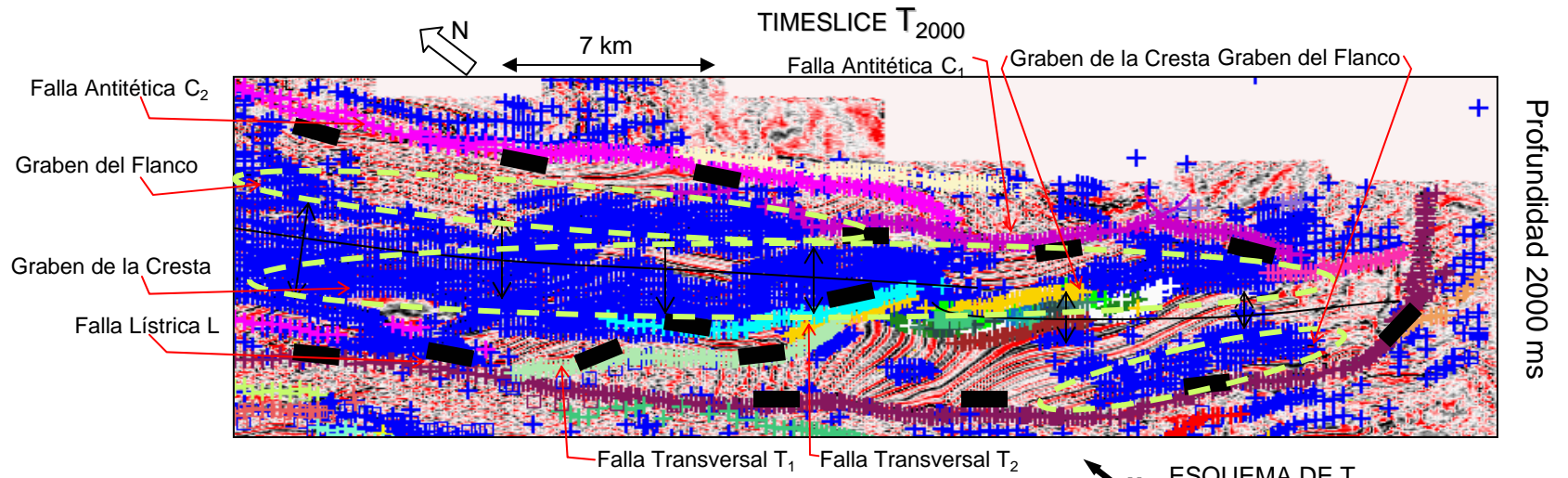


SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX

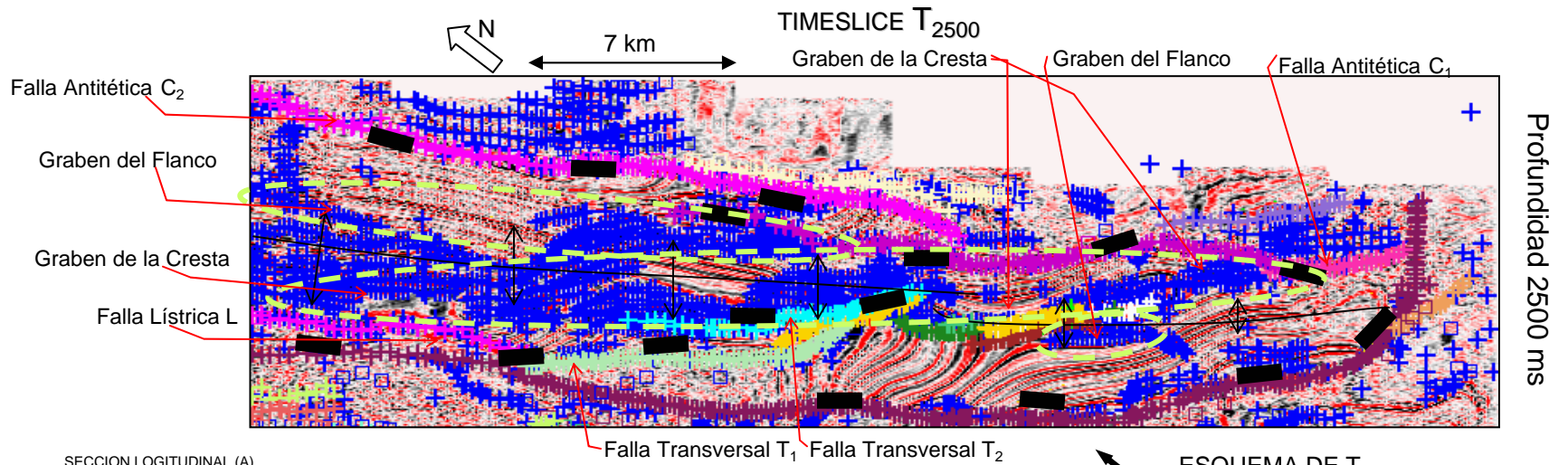
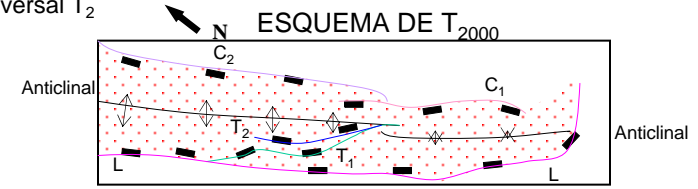
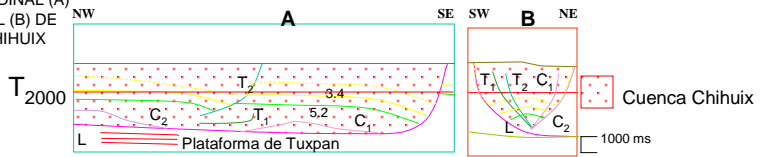


SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX

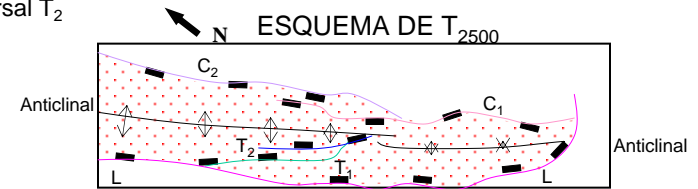
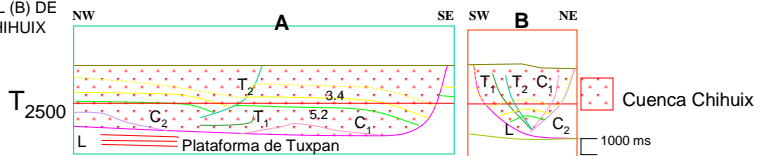


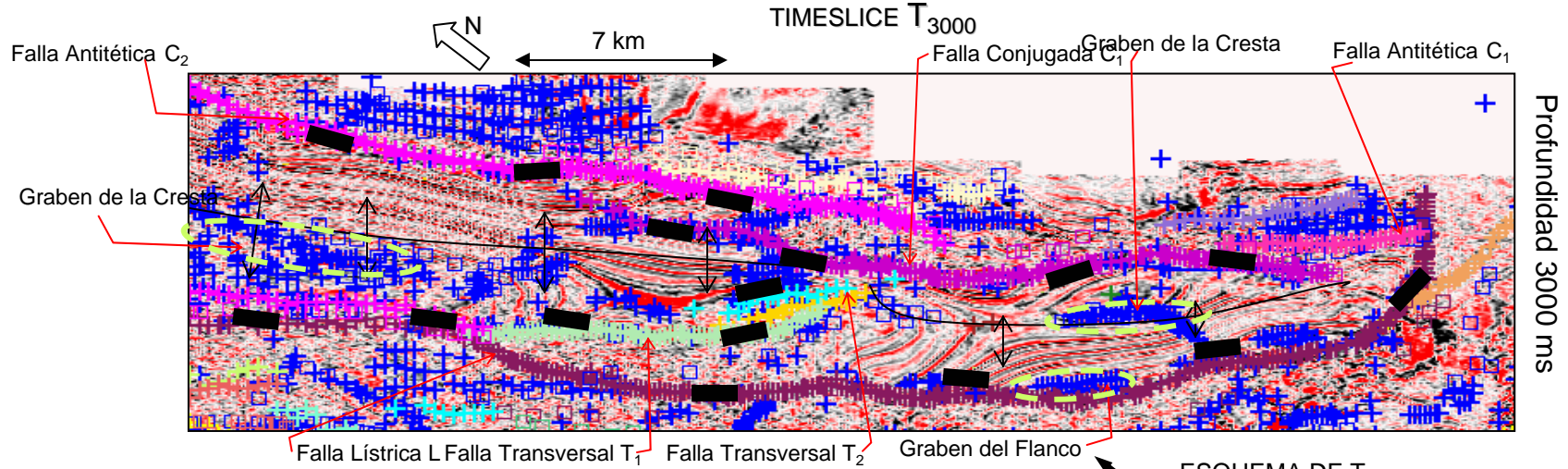


SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX

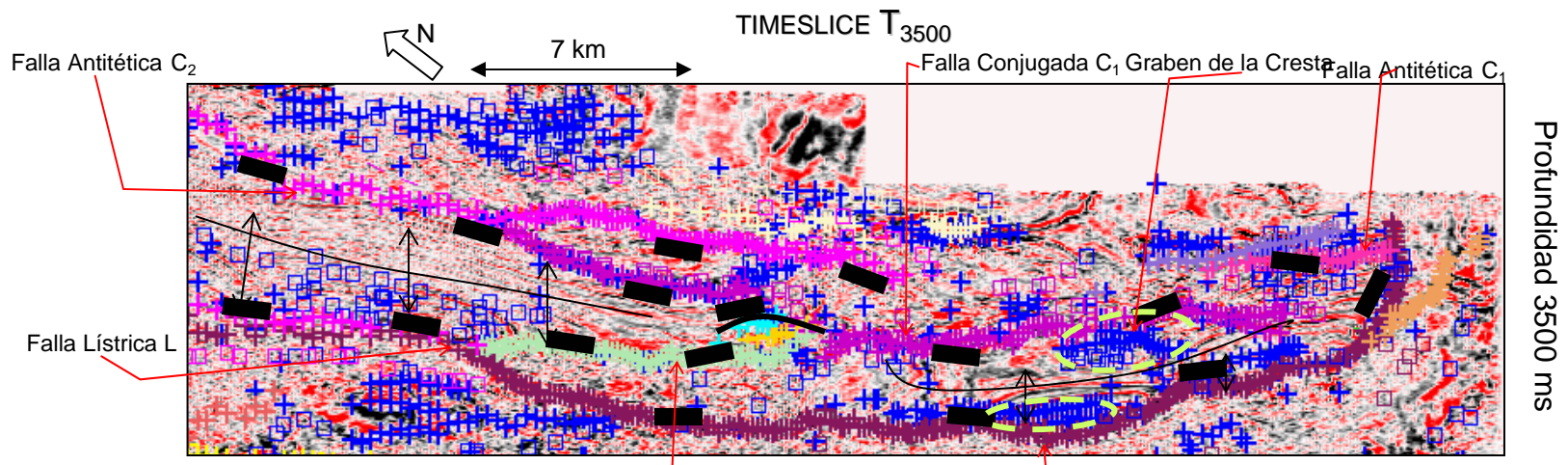
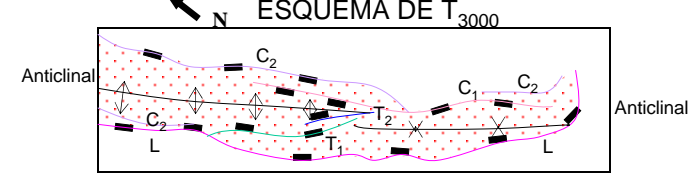
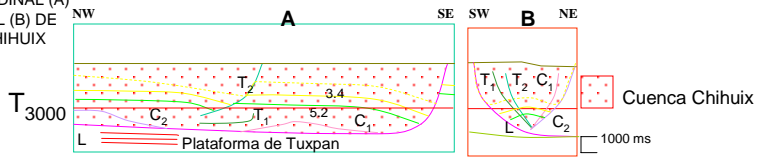


SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX

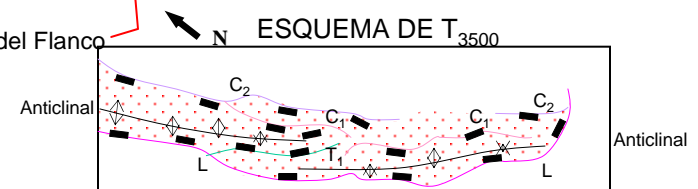
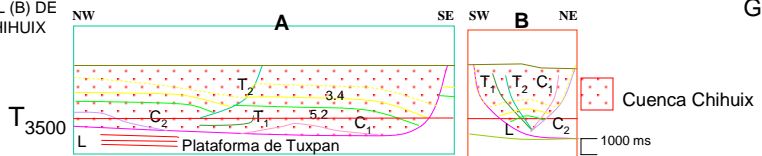


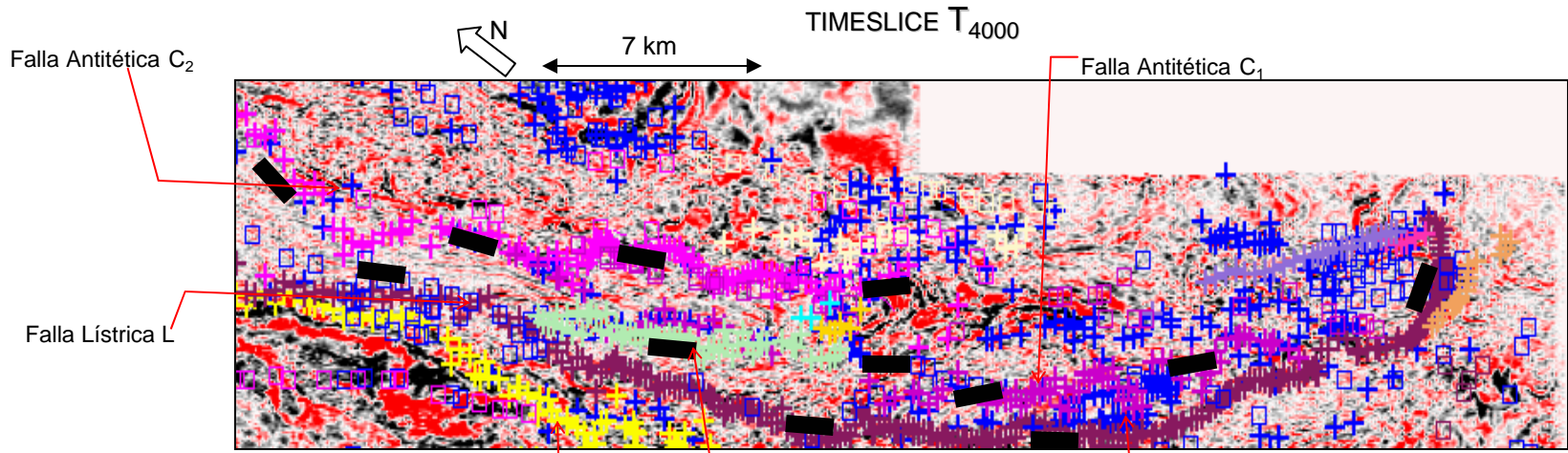


SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX



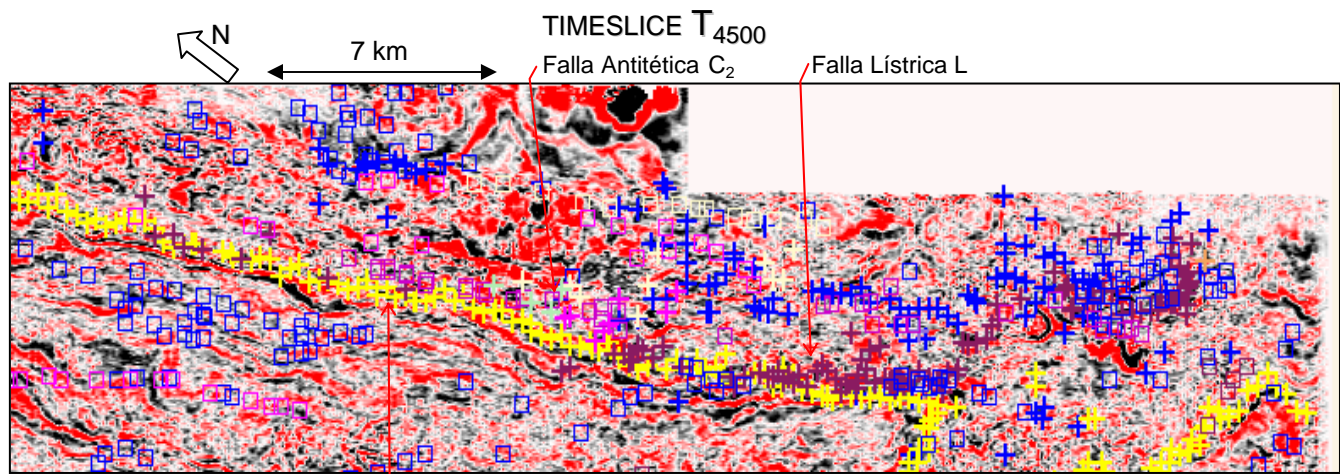
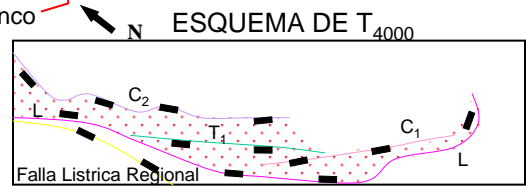
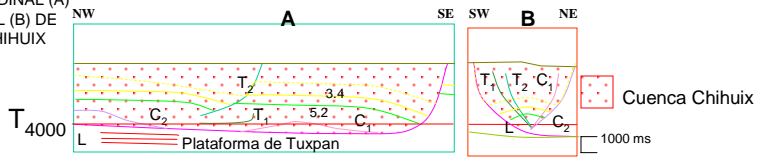
SECCION LOGITUDINAL (A) Y TRANSVERSAL (B) DE LA CUENCA CHIHUIX





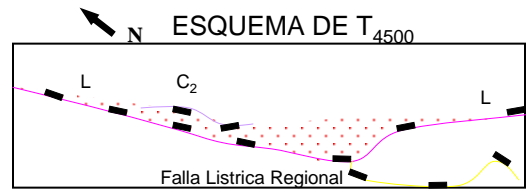
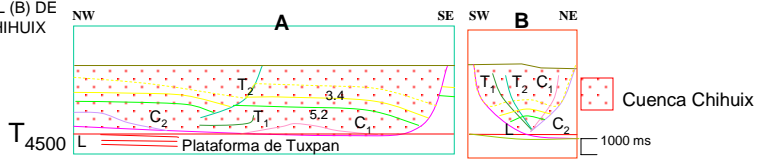
Profundidad 4000 ms

SECCION LOGITUDINAL (A)
Y TRANSVERSAL (B) DE
LA CUENCA CHIHUIX



Profundidad 4500 ms

SECCION LOGITUDINAL (A)
Y TRANSVERSAL (B) DE
LA CUENCA CHIHUIX



ANEXO F

EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX

PASO 1. La primera etapa de evolución de la Cuenca Chihuix se da en un tiempo anterior al Plioceno Inferior, donde un gran aporte de sedimentos se combina con la gravedad generando esfuerzos que se propagan en toda la columna sedimentaria. Estos esfuerzos van a generar discontinuidades en las rocas y van a aprovechar las ya existentes. En el esquema se muestra en perspectiva la posición de un semiplano que representa el fondo marino al cual empieza recibir sedimentos más gruesos conforme la plataforma se va progradando hacia el Este hacia mar adentro. Las líneas punteadas representan el potencial plano de la falla lístrica.

PASO 2. En la segunda etapa de evolución de la Cuenca Chihuix se origina la Falla Lístrica que la delimita en la parte occidental y el *rollover* (el eje paralelo al plano de falla) asociado a la Falla. La Falla se desarrolló en la parte más somera de los sedimentos miocénicos y ésta se fue propagando a profundidad conforme aumentaba la carga sedimentaria hasta el punto que esta llega a unirse a la Falla Lístrica Regional; los nuevos sedimentos que se acumulaban progradaban a texturas más gruesas (de lutitas y arcillas en la base a areniscas en la cima, ver columna litológica en Anexo A1), crearon una diferencia de peso en la columna litológica que hizo que la falla incrementara su velocidad de desplazamiento y a la vez se creara el espacio para la captación de más sedimentos. En el esquema se muestran flechas que representan la magnitud y sentido del desplazamiento en la falla. Esta magnitud sin embargo no era la misma en todo el plano de la falla, por ejemplo en las partes centrales de ésta era mayor respecto a los extremos; así la potencia de las cuñas sedimentarias para un mismo tiempo son mucho más grande en el centro que en los extremos. Se muestra también con líneas punteadas que en la cresta del pliegue de falla se generaron esfuerzos que, de la misma forma como en la Falla Lístrica, aprovecharían las discontinuidades de las rocas para generar una Falla Antitética. La explicación para decir que la Falla Lístrica se desarrollo primero es porque en lo más profundo de la Cuenca Chihuix las primeras cuñas de crecimiento solamente se encuentran pegadas a la falla lístrica. Los triángulos anaranjados llamados puntos de control hacen más fácil la visualización del salto de la falla lístrica.

PASO 3. En la tercera etapa de evolución de la Cuenca Chihuix, inmediatamente después de la Falla Lístrica se produce la Falla Antitética. Posiblemente el origen de la Falla Antitética fue poco tiempo después del desarrollo de la Falla Lístrica, aunque no he podido determinar con facilidad la edad a la que esta se pudo desarrollar. Aunque creo que el crecimiento de la Falla Antitética en comparación con el crecimiento de la Falla Lístrica es significativamente mayor en este tiempo, por lo que solamente represente flechas de desplazamiento en ésta. Los estratos de crecimiento que están junto a la falla antitética son casi simétricos con la Falla Lístrica. Ahora el pliegue asimétrico asociado a la falla lístrica sufría una nueva deformación en su parte oriental, ya que se generaba el pliegue asimétrico (el eje paralelo al plano de falla) asociado a la Falla Antitética. La combinación de ambos pliegues asimétricos genera un pliegue simétrico a todo lo largo de la Cuenca Chihuix, aunque éste perdía concavidad en los extremos de la cuenca. Un rasgo también dentro del pliegue es que éste aumenta su amplitud conforme ambas fallas siguen creciendo, por lo que se debió generar una zona de tensión en la parte media de la cuenca con fracturas y separaciones de las rocas; así que las líneas punteadas representan el área donde se generaría un plano de Falla Transversal. Los triángulos azules llamados puntos de control hacen más fácil la visualización del salto de la falla antitética.

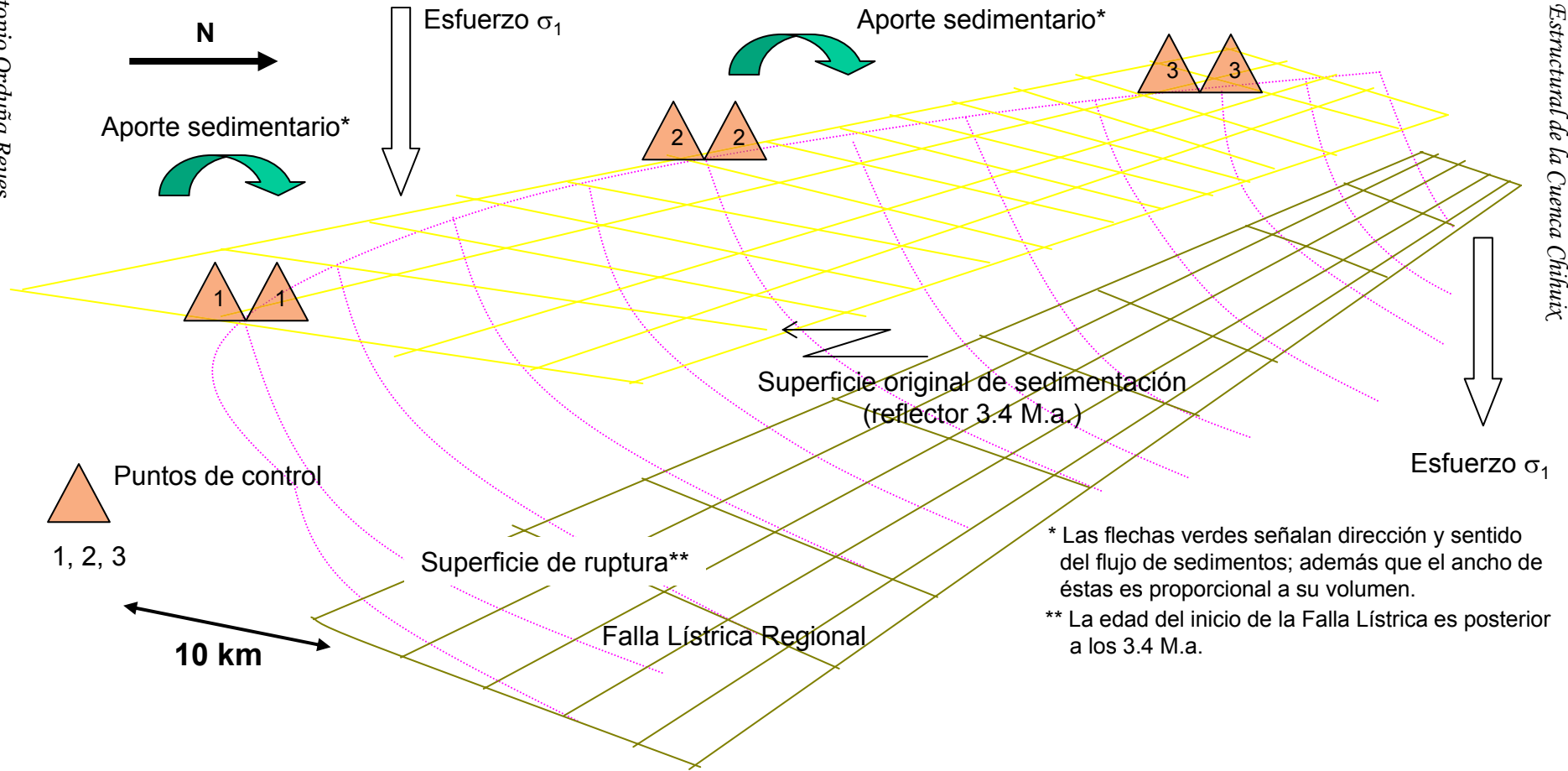
PASO 4. En la cuarta etapa de evolución de la Cuenca Chihuix se ilustra el desarrollo de las Fallas Normales Transversales, aquí observamos que la relación de crecimiento entre ambas fallas es continuo y simultáneo, ya que difícilmente se observan grandes cuñas de crecimiento a un lado de ambas fallas, por lo que interpreto esto como una evolución continua conforma la sedimentación prosigue. Lo que caracteriza a esta etapa es que hay un incipiente desarrollo asimétrico del pliegue en ambos extremos de la cuenca, debido a que empieza a desarrollarse en cada extremo una de las Fallas de una forma más rápida. Además el eje del pliegue comienza a bascularse hacia el Sur, ya que ambas fallas se desarrollan de una manera más rápida con relación a como se desarrollan en la parte Norte.

PASO 5. La quinta etapa de evolución de la Cuenca Chihuix contempla el desarrollo del pliegue en una forma asimétrica en ambos extremos de la cuenca, porque se incrementa el diferencial de velocidad de cada una de las Fallas. En el extremo Sur la Falla Lítrica incrementa su velocidad respecto a la Falla Antitética, y en algunos puntos finales su desplazamiento se vuelve casi nulo, por lo que la geometría del pliegue cambia de simétrica a asimétrica con su cresta cercana a la Falla Antitética y los reflectores de menor pendiente son antitéticos a la falla lítrica. En el extremo opuesto, en el Norte, sucede el caso inverso ya que la Falla Antitética tiene un crecimiento marcado y la Falla Lítrica tiene un crecimiento menor; así la geometría del pliegue pasa también de una forma simétrica a una forma asimétrica, pero ahora la cresta del pliegue se encuentra cercana a la Falla Lítrica y los reflectores con menor pendiente son sintéticos con respecto a la Falla Antitética. Hay que resaltar que las Fallas Transversales son resultado de ese contraste en velocidades en ambos extremos; además se ven afectadas porque la velocidad de crecimiento de la cuenca en el Sur es mayor que en el Norte, por lo que prácticamente se da un rompimiento del prisma sedimentario de la cuenca en dos bloques con dos bloques que empiezan a evolucionar de una manera casi independiente, exceptuando la parte central donde ambos bloques se contrarrestan y preservan el pliegue simétrico de la etapa anterior.

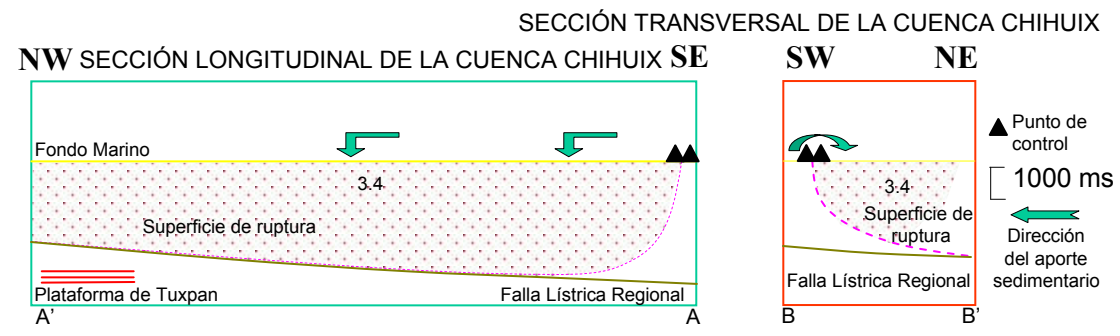
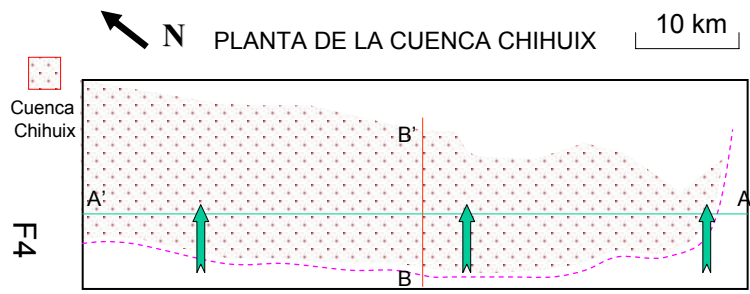
PASO 6. La sexta etapa de evolución de la Cuenca Chihuix contempla el desarrollo de los Grabens en la Cresta de cada uno de los pliegues. Dado que se mantiene el desarrollo de la amplitud de los pliegues por el continuo desplazamiento dado por las Fallas, en las crestas de los pliegues se desarrollan lo que he dado en llamar Grabens, pero este enrejado de fallas normales (*keystone graben*) atraviesa en una buena parte de los pliegues en sí mismos, por lo que su desarrollo afecta la forma del pliegue, creando desplazamientos de una manera muy compleja dentro de éste y las raíces de cada una de las fallas se detiene usualmente en un nivel estratigráfico determinado, aunque no se conoce de que litología exactamente está compuesto este nivel, una hipótesis que planteo es que este nivel está compuesto de lutitas y arcillas las cuales absorben una parte del desplazamiento de la falla y en algunos casos las fallas pasan a ser fallas interestratificadas. Dado que los grabens están asociados con las crestas de los pliegues, existen tres zonas de grabens que corren paralelas a los ejes de pliegues y que solamente en la parte central de la cuenca coexisten estas tres. Otra característica de esta etapa es que hay un aumento mucho mayor del crecimiento de ambas Fallas sobre todo en la parte Sur, provocando que esta porción del prisma sedimentario se bascule de una manera abrupta y por lo tanto aumentando el desplazamiento de las Fallas Transversales; esto queda evidenciado en los perfiles transversales donde los prismas de crecimiento en la parte que están en contacto con la Falla Lítrica son muy claros.

La última etapa de desarrollo no está esquematizada ya que es la actual, donde los sedimentos recientes han cubierto buena parte de los Grabens, aunque los sedimentos si se han visto afectado por el continuo crecimiento de las fallas antitética y lístrica y de la amplitud de los pliegues. En toda la cuenca continua el basculamiento hacia el Sur de toda la secuencia, aunque en la parte Sur es claramente mayor dado que se observan en los perfiles sísmicos grandes espacios creados por la rotación y fallamiento de los sedimentos.

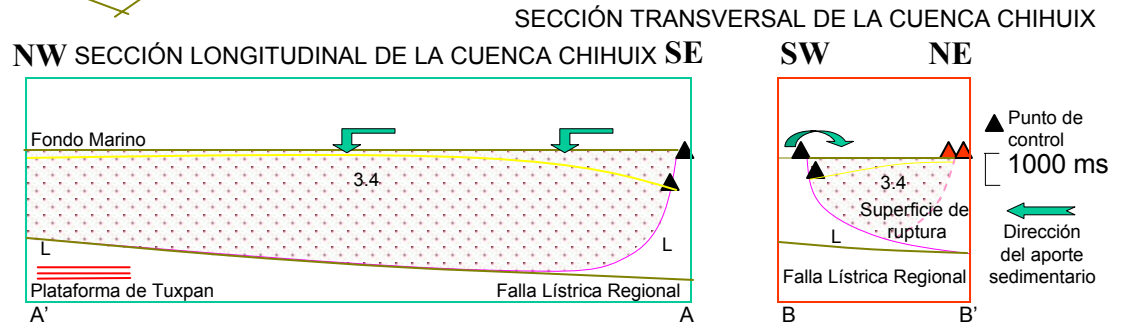
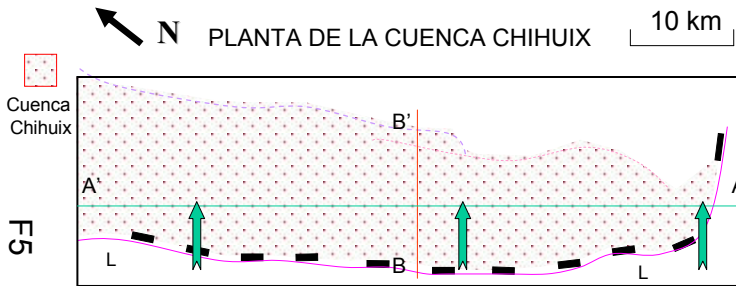
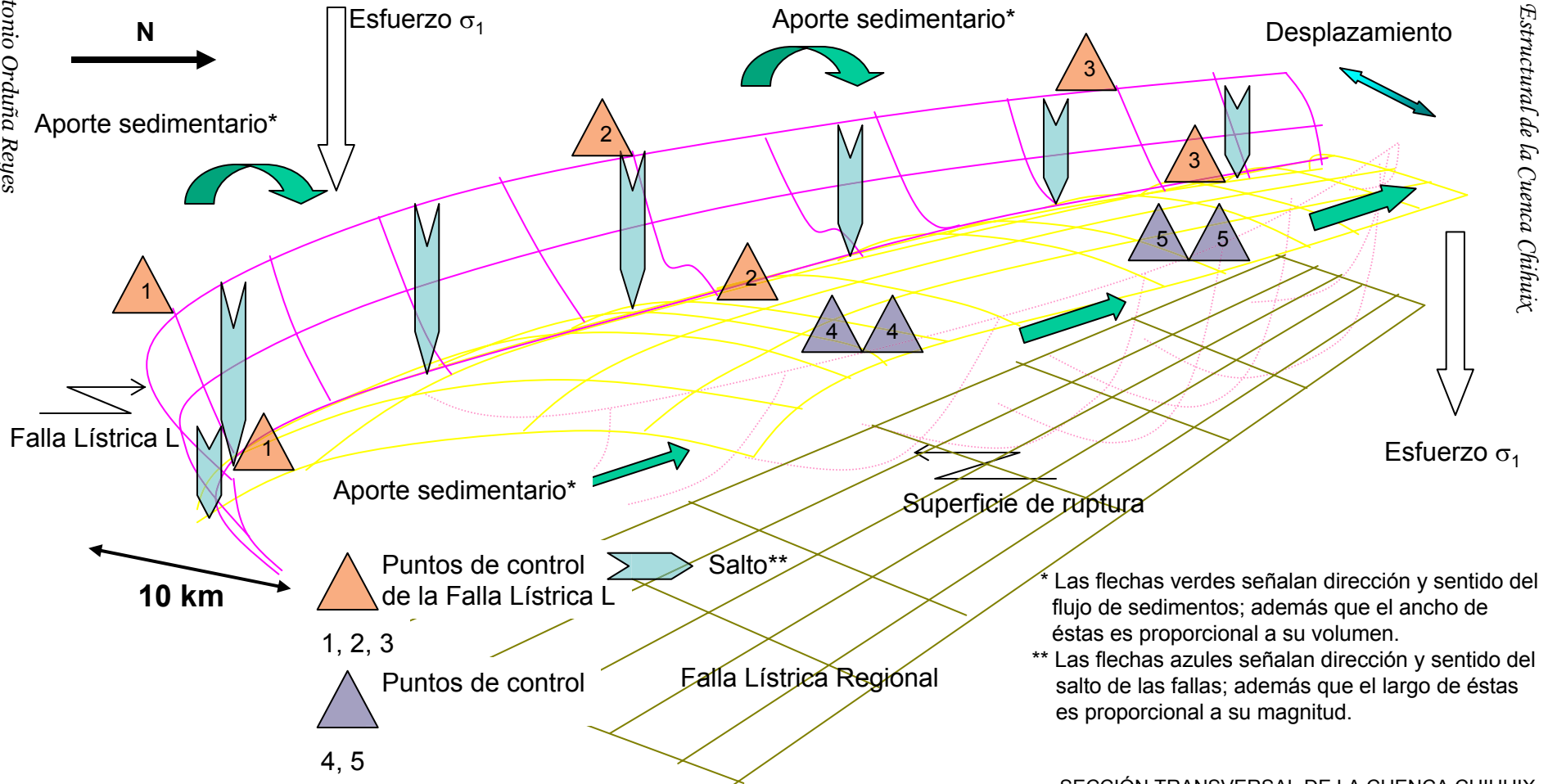
EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 1



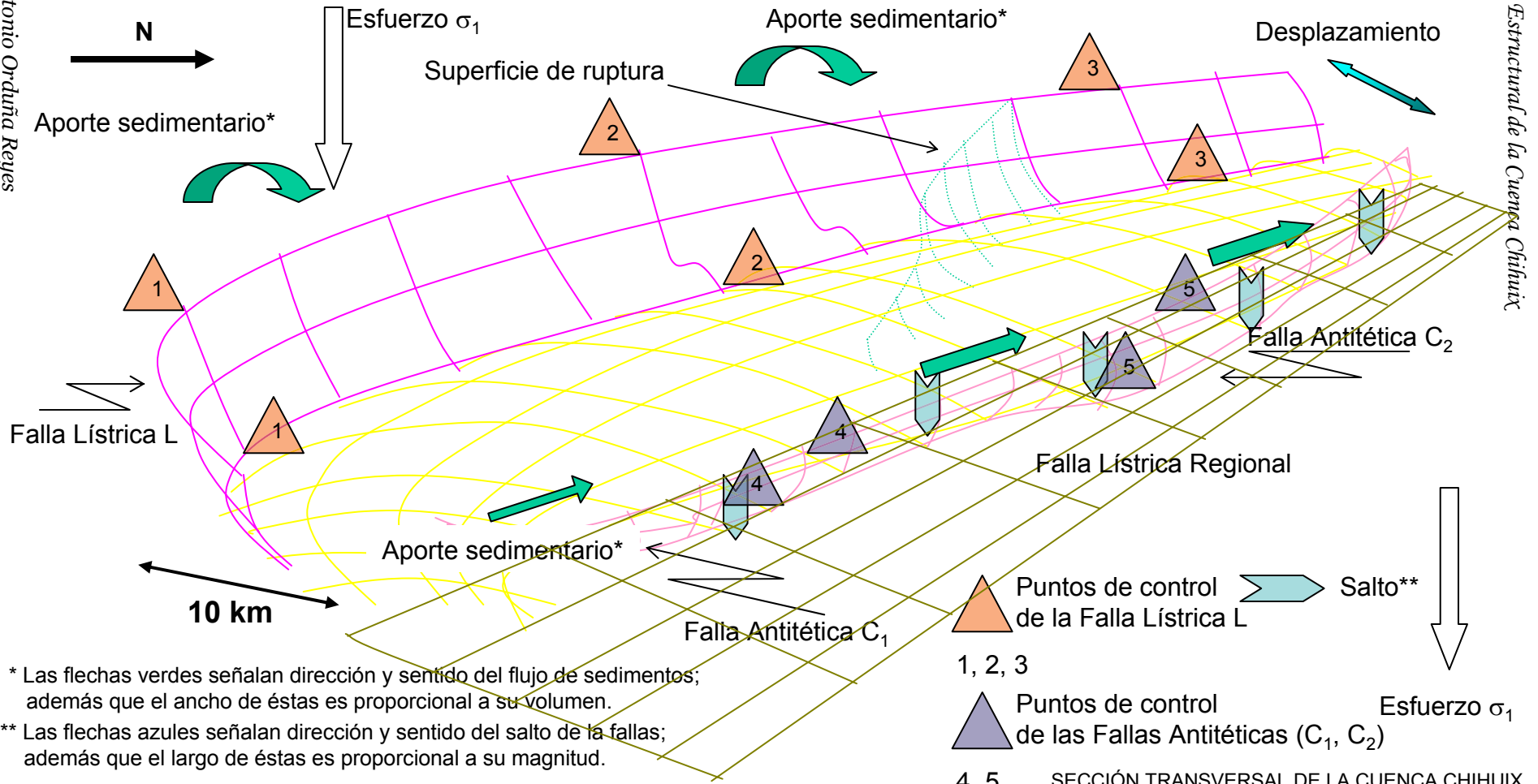
* Las flechas verdes señalan dirección y sentido del flujo de sedimentos; además que el ancho de éstas es proporcional a su volumen.
 ** La edad del inicio de la Falla Lítrica es posterior a los 3.4 M.a.



EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 2



EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 3



* Las flechas verdes señalan dirección y sentido del flujo de sedimentos; además que el ancho de éstas es proporcional a su volumen.

** Las flechas azules señalan dirección y sentido del salto de las fallas; además que el largo de éstas es proporcional a su magnitud.

▲ Puntos de control de la Falla Lútrica L

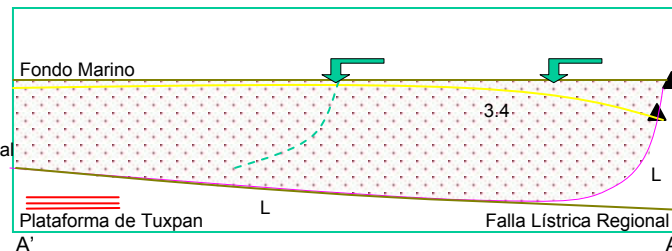
1, 2, 3

▲ Puntos de control de las Fallas Antitéticas (C₁, C₂)

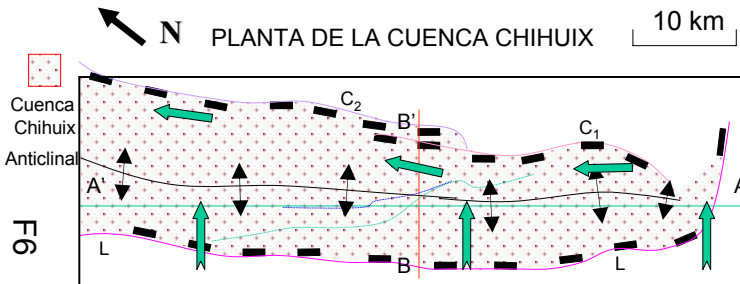
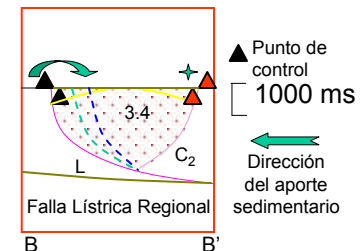
4, 5

SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CUENCA CHIHUIX

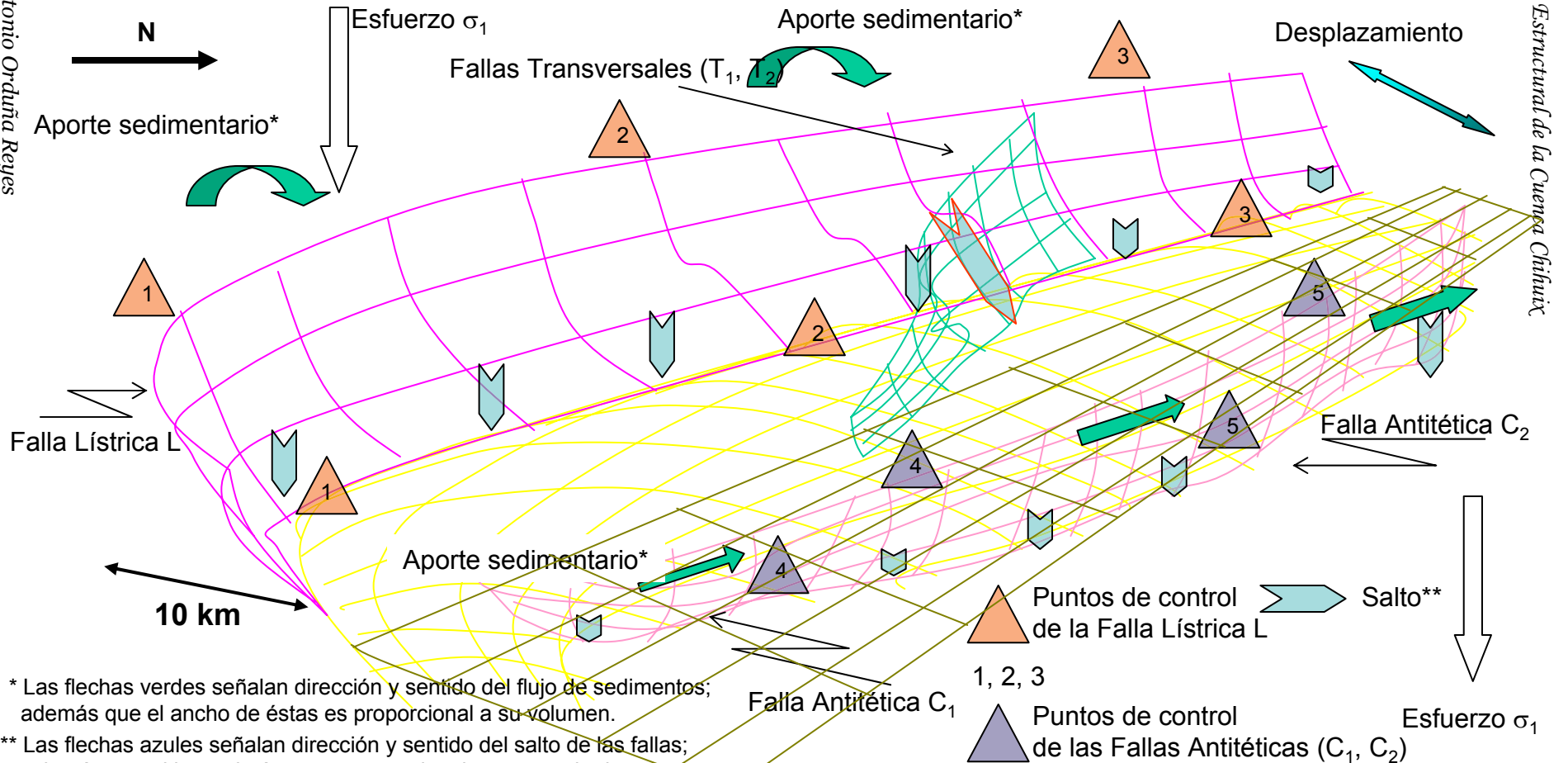
NW SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA CUENCA CHIHUIX SE



SW NE

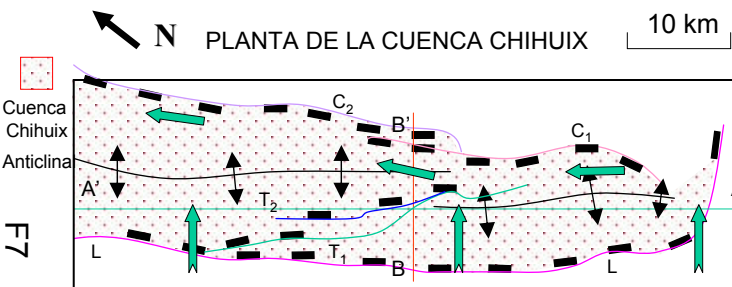


EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 4

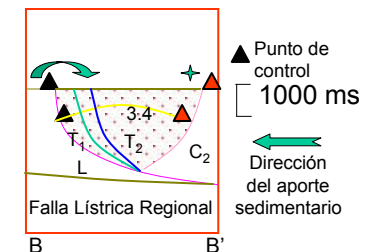
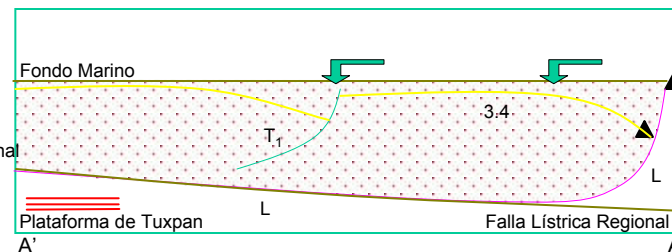


* Las flechas verdes señalan dirección y sentido del flujo de sedimentos; además que el ancho de éstas es proporcional a su volumen.

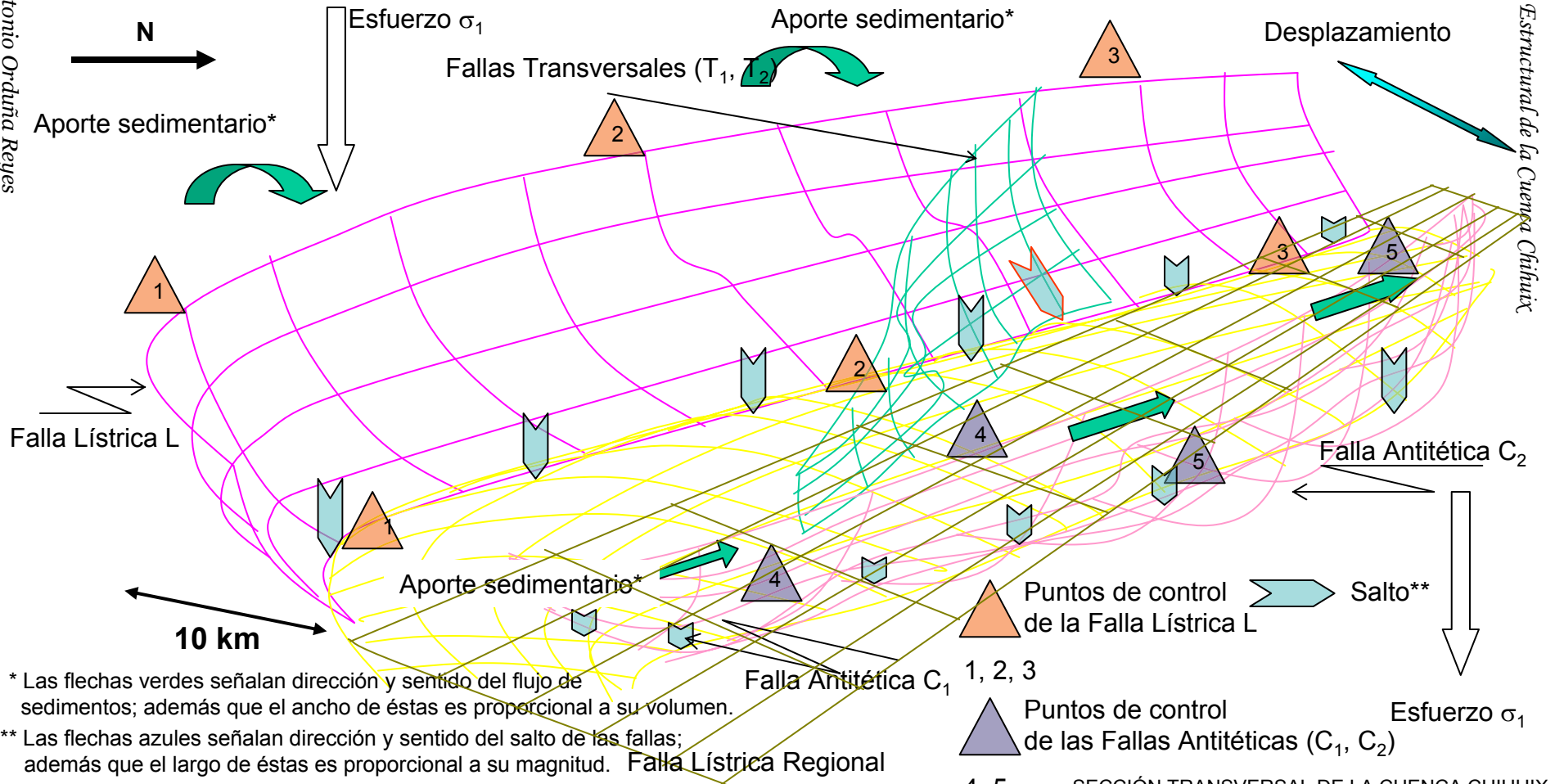
** Las flechas azules señalan dirección y sentido del salto de las fallas; además que el largo de éstas es proporcional a su magnitud.



SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CUENCA CHIHUIX
 NW SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA CUENCA CHIHUIX SE

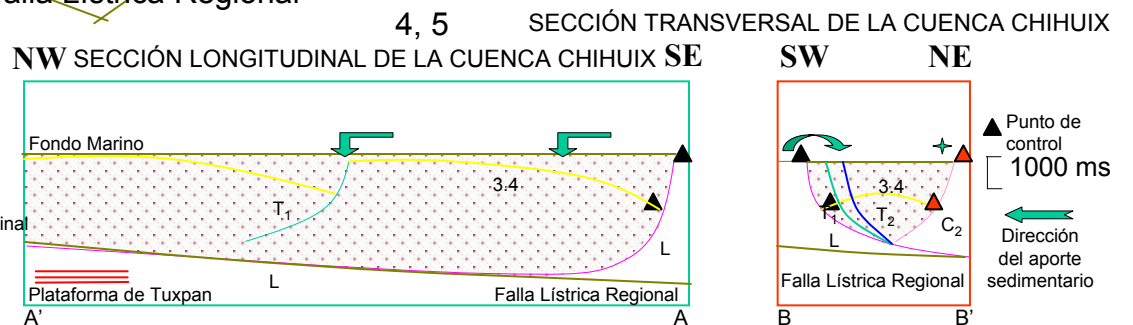
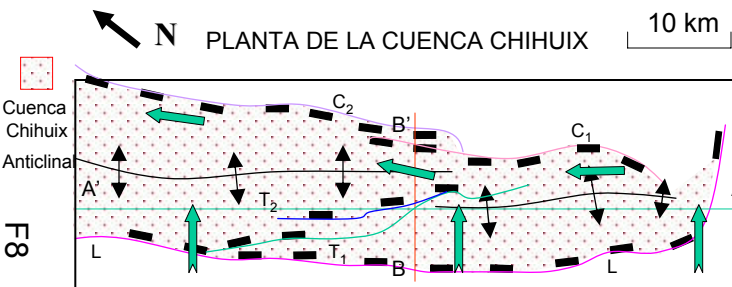


EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 5

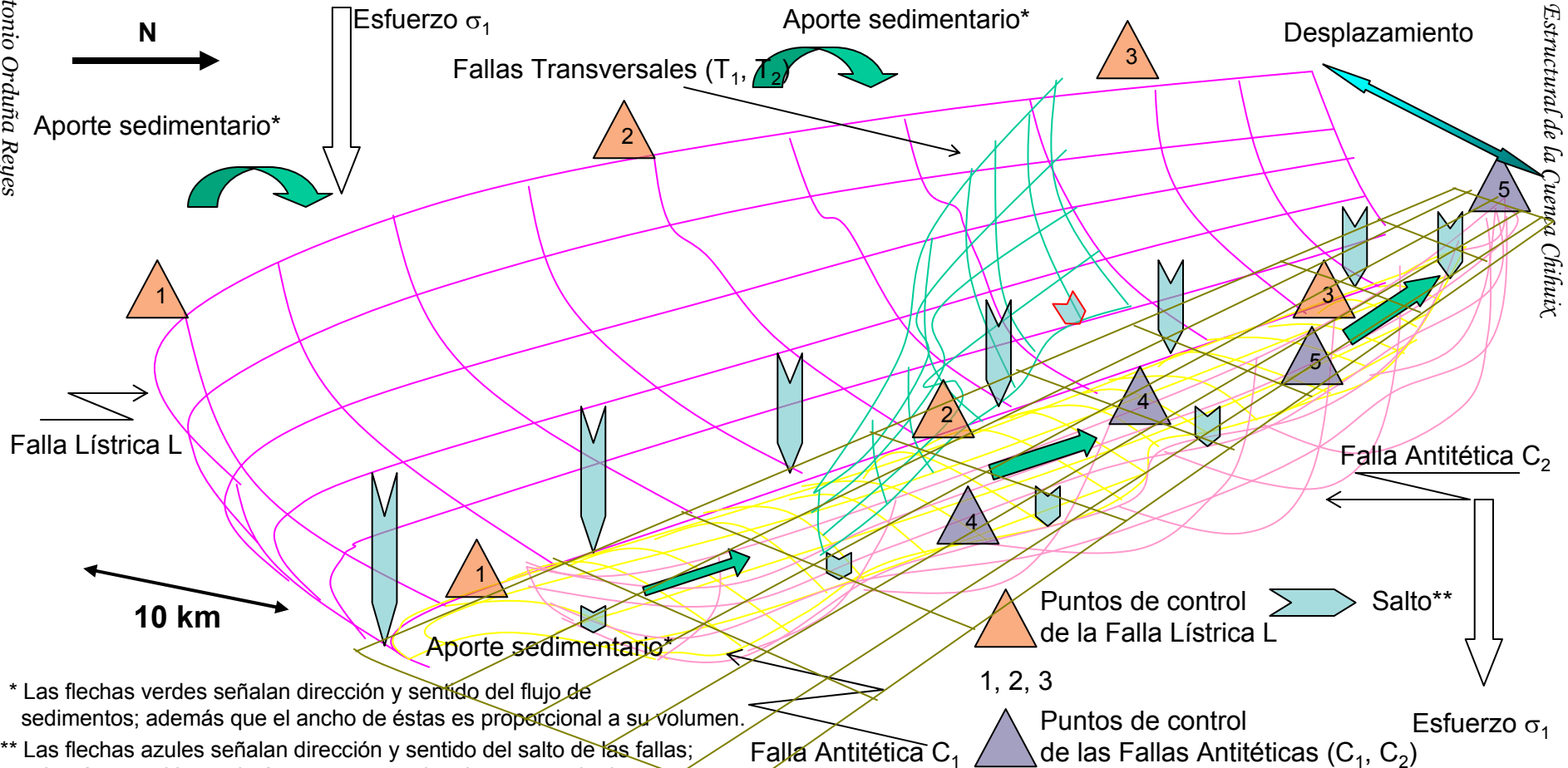


* Las flechas verdes señalan dirección y sentido del flujo de sedimentos; además que el ancho de éstas es proporcional a su volumen.

** Las flechas azules señalan dirección y sentido del salto de las fallas; además que el largo de éstas es proporcional a su magnitud.



EVOLUCIÓN DE LA CUENCA CHIHUIX PASO 6



* Las flechas verdes señalan dirección y sentido del flujo de sedimentos; además que el ancho de éstas es proporcional a su volumen.

** Las flechas azules señalan dirección y sentido del salto de las fallas; además que el largo de éstas es proporcional a su magnitud.

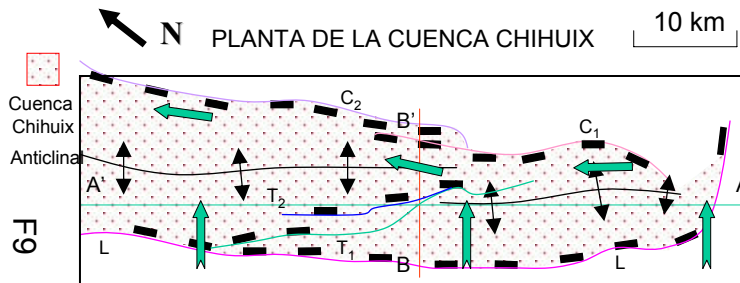
1, 2, 3

▲ Puntos de control de las Fallas Antitécticas (C₁, C₂)

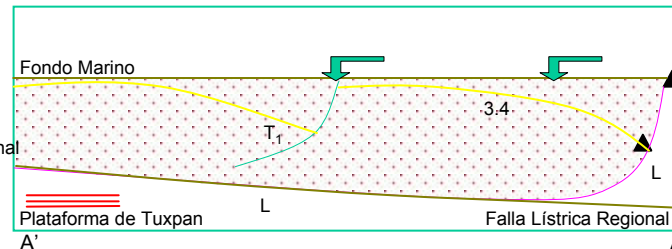
Falla Listrica Regional

4, 5

SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CUENCA CHIHUIX



NW SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA CUENCA CHIHUIX SE



SW NE

