



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

**PROGRAMA DE POSGRADO  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

MAPEO DE LA ESTRUCTURA DEL ANILLO CENTRAL  
AL INTERIOR DEL CRATER DE IMPACTO DE  
CHICXULUB CON BASE EN PERFILES SÍSMICOS  
DE REFLEXIÓN 2-D

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS

P R E S E N T A :

KEREN MENDOZA CERVANTES

CIUDAD UNIVERSITARIA

2006.



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.

---

---

	<b>Página</b>
<b>Índice de figuras.</b>	II
<b>Índice de tablas.</b>	IV
<b>Resumen.</b>	V
<b>I INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>II ANTECEDENTES PARA EL ESTUDIO DEL CRÁTER DE IMPACTO DE CHICXULUB.</b>	
II.I. Cráteres de impacto: elementos teóricos básicos.	2
II.I.1. Etapas de formación de un cráter.	2
II.I.2. Clasificación y morfología de cráteres de impacto.	4
II.II. El cráter de Chicxulub, un ejemplar excepcional.	7
II.III. Tectónica y geología de la zona de impacto de Chicxulub.	8
<b>III METODOLOGIA.</b>	
III.I. Campaña de adquisición de datos de reflexión sísmica 2005.	10
III.I.1. Geometría de la adquisición de datos.	11
III.I.2. Fuente de energía empleada en el experimento sísmico.	12
III.II. Procesamiento de datos.	13
<b>IV RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.</b>	
IV.I. Resultados.	22
IV.II. Interpretación de estructuras.	24
IV.II.1. Estructuras exteriores.	24
IV.II.2. Estructuras interiores.	28
IV. II.2.1. El <i>peak ring</i> del cráter de Chicxulub en 2D.	29
IV.II.2.2. Expresión tridimensional del <i>peak ring</i> .	31
<b>V DISCUSIÓN.</b>	34
<b>VI CONCLUSIONES.</b>	37
<b>Bibliografía.</b>	38
<b>Páginas de Internet consultadas.</b>	41
<b>Apéndices.</b>	
A. Glosario.	42
B. Ubicación de pozos en la zona de impacto.	45
C. Restricciones del experimento sísmico de 2005.	46
D. Perfiles Sísmicos de la campaña 2005.	51
E. Subrutina de procesamiento.	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fin de la etapa de contacto y compresión.	2
Figura 2. Etapa de excavación y formación de la cavidad transitoria.	3
Figura 3. Desarrollo del <i>central uplift</i> en la cavidad transitoria.	3
Figura 4. Cráter simple.	4
Figura 5. Cráter complejo tipo <i>central peak</i> .	5
Figura 6. Cráter complejo tipo <i>peak ring</i> .	5
Figura 7. Modelo del mecanismo de emplazamiento del <i>peak ring</i> .	6
Figura 8. Cráter multianillado.	6
Figura 9. Ubicación del cráter de Chicxulub y pozos perforados en la zona de impacto.	7
Figura 10. Reconstrucción de la dinámica de formación de la zona del Golfo de México y el Caribe para el Cretácico Temprano.	8
Figura 11. Estratigrafía en pozos del área de impacto.	9
Figura 12. Ubicación de los perfiles de reflexión sísmica.	10
Figura 13. Esquema de la geometría de adquisición de datos.	11
Figura 14. Vista en planta de la distribución del arreglo de pistolas en el R/V Maurice Ewing durante el experimento sísmico de 2005.	12
Figura 15. Flujo de procesamiento de datos de reflexión sísmica.	13
Figura 16. Edición de trazas y corrección por divergencia esférica en la línea Chicx-10.	14
Figura 17. Deconvolución en la sección no apilada Chicx-10.	15
Figura 18. Picado de velocidades en un gráfico de semblanza.	16
Figura 19. Campo de velocidades del perfil Chicx-10.	17
Figura 20. Corrección por efecto de <i>move out</i> y <i>mute</i> .	17
Figura 21. Sección apilada del perfil Chicx-10.	19
Figura 22. Filtrado post apilamiento en ventanas de tiempo.	20
Figura 23. Sección migrada en tiempo del perfil Chicx-10.	21
Figura 24. Zonas con reflectores de interés.	22
Figura 25. Zonas de reflectores de interés en la sección migrada en tiempo del perfil Chicx-10.	23
Figura 26. Vista en detalle de reflectores en zonas superficiales.	23
Figura 27. Estructuras reinterpretadas sobre la sección sísmica A0.	25
Figura 28. Estructuras reinterpretadas sobre la sección sísmica A1.	26
Figura 29. Estructuras interpretadas sobre la sección sísmica radial Chicx-R3.	27
Figura 30. Estructuras interiores al borde del cráter de Chicxub.	28
Figura 31. Elevación topográfica del <i>peak ring</i> sobre el <i>base of cenozoic reflector</i> .	29
Figura 32. <i>Peak ring</i> y <i>base of Cenozoic reflector</i> en el perfil R1.	30
Figura 33. Material emplazado entre el <i>peak ring</i> y el <i>dipping reflector</i> .	31
Figura 34. Vista en planta de la interpretación de la estructura del <i>peak ring</i> sobre perfiles sísmicos del conjunto de datos de 2005 y la reinterpretación sobre líneas prospectadas durante 1996.	32
Figura 35. Imagen tridimensional del <i>peak ring</i> e interpretación de estructuras sobre perfiles sísmicos.	33
Figura 36. Perspectiva desde el NE de la superficie tridimensional del <i>peak ring</i> .	33
Figura 37. Representación del mecanismo de formación de la estructura de <i>peak ring</i> .	35
Figura 38. Geometría final del cráter de Chicxulub,	36
Figura 39. Pantallas de monitoreo del equipo y procedimientos a bordo de la embarcación.	46
Figura 40. Área de observación de mamíferos marinos.	48
Figura 41. Área de monitoreo acústico pasivo ( <i>PAM</i> ).	49
Figura 42. Gráfico de relación tiempo-actividades realizadas durante la prospección del cráter de Chicxulub de 2005.	50
Figura 43. Sección Chicx-4c migrada en tiempo.	51
Figura 44. Sección Chicx-2b migrada en tiempo.	52
Figura 45. Perfil Chicx-5 migrado en tiempo.	53

Figura 46. Perfil Chicx-6 migrado en tiempo.	54
Figura 47. Sección Chicx-8a migrada en tiempo.	55
Figura 48. Sección Chicx- 8c migrada en tiempo.	56
Figura 49. Perfil Chicx-9 migrado en tiempo.	57
Figura 50. Perfil Chicx-13 migrado en tiempo.	58
Figura 51. Perfil Chicx-15 migrado en tiempo.	59
Figura 52. Perfil Chicx- 16 migrado en tiempo.	60
Figura 53. Perfil Chicx-18 migrado en tiempo.	61

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1. Relación de líneas y geometría de adquisición en perfiles de reflexión sísmica.	11
Tabla 2. Velocidad de intervalo y cuadrática media para el CMP 1100 de la línea Chicx-10.	16
Tabla 3. Características del <i>peak ring</i> en perfiles transversales.	30
Tabla 4. Ubicación de pozos en el área de impacto de Chicxulub.	45
Tabla 5. Escala de Beaufort	47
Tabla 6. Encendido escalonado de pistolas neumáticas.	49

## RESUMEN

Desde hace más de dos décadas el estudio del cráter de Chicxulub, ubicado en la península de Yucatán en México, ha cobrado gran importancia tanto por su relación con la extinción masiva a finales del Cretácico, como por ser uno de los ejemplos de cráteres de impacto de gran tamaño (diámetro ~ 200 Km) mejor preservados en la superficie terrestre debido a que se encuentra enterrado bajo ~ 600-1500 m de depósitos sedimentarios en una zona con poca actividad tectónica.

Numerosas campañas se han llevado a cabo desde su descubrimiento empleando diversos métodos de exploración geofísicos con el objetivo de definir su morfología y con base en ella definir su relación con los eventos de la frontera Cretácico-Paleógeno. Los resultados de dichos estudios han llevado a un consenso en el que se ha propuesto que el Chicxulub es un cráter multianillado con *peak ring*. Esta tesis proporciona elementos que soportan esta propuesta con base en la interpretación del *peak ring* en 27 perfiles de reflexión sísmica, 23 de los cuales fueron prospectados en la cuenca de impacto de Chicxulub durante la más reciente campaña de exploración (EW0501) llevada a cabo en enero y febrero de 2005. Este conjunto de datos comprende una retícula de 11 líneas orientadas en dirección WSW-ENE, 10 perfiles perpendiculares, más otras 6 secciones sísmicas que cruzan la estructura del cráter radialmente. Esta densidad de datos permitió identificar y construir una imagen tridimensional del *peak ring*.

Los resultados muestran que en su porción oceánica, el *peak ring* del cráter de Chicxulub es una estructura semicircunferencial emplazada alrededor del centro del cráter, con extensión máxima de ~ 52 km y un ancho de ~ 22 km. Basados en el análisis de los perfiles radiales, sus características cambian en sentido horario, presentando la máxima elevación sobre el piso del cráter en la porción noroeste de nuestros datos (casi medio kilómetro), pero ubicándose más cercano a la superficie del suelo marino en ese mismo sector. Así mismo la cantidad de material emplazado entre el *peak ring* y las estructuras de *slump blocks* que le subyacen es mayor en la porción noroeste en donde la deformación de los *slump blocks* es más pronunciada. Por otra parte la imagen tridimensional del *peak ring* permite visualizar claramente la cadena de montículos y elevaciones que lo conforman.

## I. INTRODUCCIÓN

El cráter de Chicxulub formado hace 65 millones de años por el impacto de un meteorito o asteroide sobre la superficie terrestre, se localiza en la península de Yucatán al sureste de México. La importancia que ha cobrado el estudio de este cráter se debe a su posible relación con la extinción masiva sucedida al final del Cretácico sugerida por Álvarez et al., [1980], así como a su tamaño, características y su grado de preservación. A partir de 1991 numerosos debates han tenido lugar tratando de definir tanto su morfología como su relación con los eventos del Cretácico-Paleógeno (K/P).

La estructura de este cráter de ~ 200 km de diámetro, que yace bajo aguas del Golfo de México y enterrado bajo una columna de depósitos sedimentarios carbonatados, ha sido estudiada con diferentes métodos geofísicos con el afán de precisar el tipo de estructura que representa. Empleando datos magnéticos y gravimétricos el Chicxulub fue interpretado como un cráter complejo tipo *peak ring* [Hildebrand et al., 1991; Pilkington et al. 1994 y Campos et al., 2004] y como un cráter con al menos cuatro estructuras anulares basándose en datos gravimétricos [Sharpton et al., 1993]. Interpretaciones recientes basadas en el análisis de perfiles de reflexión sísmica, permitieron definir la existencia de una estructura de *peak ring* dentro de la cuenca de impacto así como diferentes zonas de fallas relacionadas con anillos en la parte exterior al borde del cráter, características que definen al Chicxulub como un cráter multianillado [Morgan et al., 1997; Snyder y Hobbs, 1999a; Melosh, 1997; y Morgan y Warner, 1999a].

Conjuntamente con otros aspectos que definen la morfología del cráter de Chicxulub, las características propuestas para el *peak ring* difieren dependiendo del estudio, el método y la resolución empleados para la definición de las mismas. Hildebrand et al. [1991] propusieron un radio 40-45 km para la estructura anular al interior de la cuenca de impacto de Chicxulub, mientras que otros autores han indicado que el diámetro de este anillo interno es de ~80 km [Morgan et al., 1997; Melosh, 1997; Snyder y Hobbs, 1999a; y Brittan et al., 1999]. Además de su extensión radial, la elevación topográfica del *peak ring* sobre el piso de la cuenca ha sido medida en un mismo conjunto de datos de reflexión sísmica por diferentes autores, quienes indican que hacia el noroeste del cráter el *peak ring* se eleva más abruptamente levantándose entre 400-700 m [Morgan et al., 1997 y Brittan et al., 1999].

Para delimitar la geometría del cráter de Chicxulub y establecer parámetros referentes al proceso de formación de cráteres multianillados, se investigó recientemente la zona del impacto tanto en su porción oceánica como en la continental durante enero y febrero de 2005 en una campaña oceanográfica de más de dos meses llevada a cabo por la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Instituto de Geofísica, en colaboración con la University of Texas at Austin, University of Cambridge e Imperial Collage of London, en la cual se adquirieron datos gravimétricos, de refracción y reflexión sísmica.

El objetivo de esta tesis es definir las características de la estructura del *peak ring* del Chicxulub con base en el análisis e interpretación de 29 perfiles de reflexión sísmica de la campaña de exploración 2005 y la reinterpretación de cuatro líneas prospectadas en 1996. Además se crea la primera imagen tridimensional de esta estructura construida utilizando los datos de una retícula de veintiséis perfiles y seis líneas radiales, ubicados en la porción marina del cráter. Estos elementos constituyen nuevas aportaciones a las propuestas sobre el mecanismo de formación del *peak ring* establecidas hasta el momento [Melosh, 1989; y Collins et al., 2002].

## II. ANTECEDENTES PARA EL ESTUDIO DEL CRÁTER DE IMPACTO DE CHICXULUB

### II.1. CRÁTERES DE IMPACTO: ELEMENTOS TEÓRICOS BÁSICOS.

La palabra cráter de impacto define una depresión formada como resultado del choque de un cuerpo externo (meteorito o asteroide) sobre la superficie de los planetas interiores y otros cuerpos del sistema solar. La geometría final que adquiere esta depresión está determinada en diferente medida por factores tales como el material que conforma el área de impacto, la velocidad de choque, el tamaño del proyectil, y la fuerza gravitacional del planeta donde impacta el bólido. De acuerdo con su morfología los cráteres se han clasificado en varios grupos, siendo de mayor importancia los simples, complejos y multianillados (enlistados en orden de complejidad y tamaño).

#### II.1.1. ETAPAS DE FORMACIÓN DE UN CRÁTER

Para comprender como se originan las estructuras que definen la morfología de cada tipo de cráter, es necesario entender los procesos de formación del mismo; estos procesos se dividen en tres etapas: contacto y compresión, excavación y modificación [Melosh, 1989].

La etapa de contacto y compresión comienza una vez que el bólido ha hecho contacto con la superficie de impacto. Como resultado se generan ondas de choque que viajan radialmente desde el centro del proyectil transmitiéndose hacia la superficie de impacto. El proyectil penetra cierta profundidad y la combinación de las fuerzas compresivas y descompresivas mueve el material de la superficie de impacto a grandes velocidades provocando la expulsión de una masa de material equivalente al volumen del proyectil. El flujo de material hacia fuera del punto de impacto (Figura 1) marca el fin de esta etapa [Melosh, 1989].

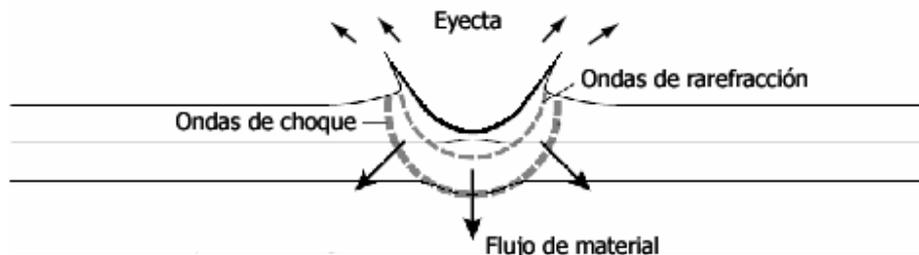


Figura 1. Fin de la etapa de contacto y compresión. Las flechas grandes indican la dirección de desplazamiento de partículas fuera de la cavidad, mientras que las pequeñas indican la dirección de movimiento de material en las capas que subyacen al punto de impacto [French, 1998].

En la segunda etapa de formación de un cráter, la generación de un flujo de excavación originado por las ondas de rarefracción sigue inmediatamente a la desintegración del proyectil. La compleja interacción de estas ondas con las compresivas añaden una componente vertical al desplazamiento radial de las ondas de choque provocando que el material de la superficie de impacto se desplace en trayectorias ascendentes y hacia fuera en zonas cercanas al impacto originando una depresión conocida como *transient cavity* o cavidad transitoria (Figura 2).

La cavidad transitoria originada es muchas veces más grande que el bólido y su geometría se asemeja a la de un tazón. Su profundidad queda definida por la resistencia que ofrece el material de la superficie de impacto al flujo de excavación. Esta etapa termina cuando la cavidad transitoria ha alcanzado su tamaño máximo, es decir cuando las fuerzas de rarefracción y compresión se equilibran, momento en el que la fuerza de gravedad y la mecánica de rocas comienzan a actuar sobre la zona de choque dando comienzo a la etapa de modificación.

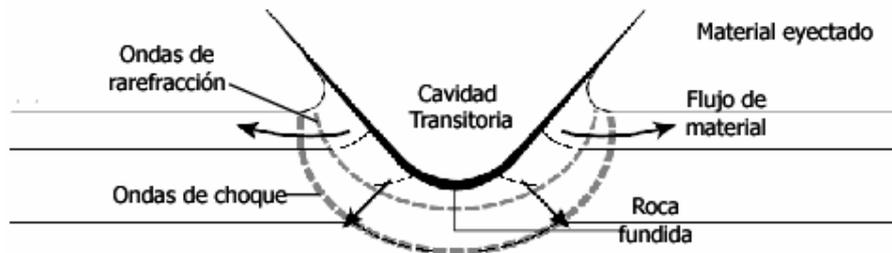


Figura 2. Etapa de excavación y formación de la cavidad transitoria [French, 1998]. Apertura de la cavidad transitoria con forma de tazón debido a la interacción de las ondas de rarefacción y de choque. Parte del material resultado de la desintegración del proyectil se combina y queda depositado en la base de la cavidad como roca fundida, otra parte es expulsada fuera de la depresión como vapor o partículas que conforman una cortina de material eyectado.

Los procesos que toman lugar durante la etapa de modificación son diferentes para cráteres simples, complejos y multianillados.

Cuando una cavidad transitoria se modifica para dar origen aun cráter simple, la principal transformación que ocurre es el deslizamiento a muy pequeña escala de material de las paredes de la cavidad transitoria hacia su parte central y la combinación de este con material fundido y partículas previamente expulsadas. Como resultado el cráter conserva a *grosso modo* la forma de tazón de la cavidad transitoria [French, 1998].

Por otra parte, los procesos de modificación que conllevan a la formación de los cráteres complejos y multianillados (Figura 3) involucran el desarrollo del *central uplift* (levantamiento central), que es el rebote de material al centro de la cavidad transitoria como una reacción al choque. La interacción del *central uplift* con material de las paredes de la cavidad transitoria que se derrumba hacia el centro, conjuntamente con la acción de la fuerza de gravedad, inducen el movimiento de grandes volúmenes de rocas que se comportan como un fluido [Grieve et al., 1981 y Melosh, 1989] dando origen a estructuras al interior y exterior de la cuenca de impacto.

La parte de este proceso que origina los múltiples anillos en los cráteres multianillados aun no se comprende en sus totalidad, sin embargo una de las propuestas indica que el estado de esfuerzos entre dos capas, una superficial de poco grosor y una fluida de menor rigidez provoca que material de la capa subyacente fluya a través de la capa de mayor rigidez por zonas de debilidad que se crean al momento del impacto y cuya geometría generalmente se asemeja a una circunferencia [Melosh, 1989].



Figura 3. Desarrollo del *central uplift* en la cavidad transitoria. El material al centro de la cavidad se eleva en una columna por efectos de rebote mientras que las paredes de la cuenca transitoria se colapsan hacia el centro por efectos de la gravedad [Tomada de French, 1998].

### II.1.2. CLASIFICACION Y MORFOLOGIA DE CRÁTERES DE IMPACTO.

En esta sección se da una breve descripción de la morfología de los diferentes tipos de cráteres de impacto (en orden de complejidad), empleando imágenes de algunos ejemplares que facilitan su reconocimiento.

Como se mencionó con anterioridad, la cuenca de impacto de los cráteres simples se asemeja a la forma de un tazón, su piso es relativamente plano y no se observan estructuras de colapso en sus paredes [Melosh, 1989]. Uno de los ejemplos más ilustrativos de este tipo de cráter en nuestro planeta es el *Meteor Crater* en Arizona (Figura 4).

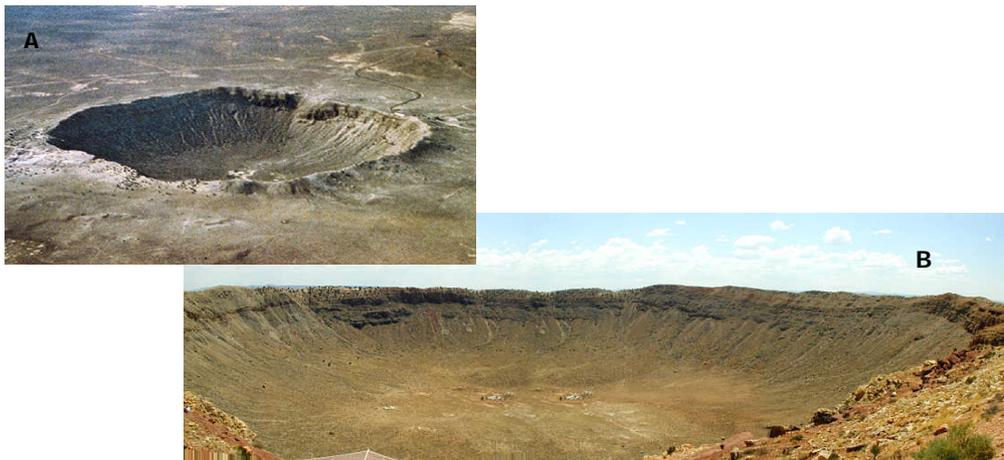


Figura 4. Cráter simple. A) Fotografía del Meteor Crater en Arizona, E.E.U.U. en la que se puede apreciar su geometría casi circular con forma de tazón. B) Imagen del interior del Meteor Crater; en esta fotografía se hace evidente la relativa planicie del suelo y la ausencia de estructuras de colapso en sus paredes. [Fotografías tomadas de <http://imagers.gsfc.nasa.gov/adventure/MeteorCr.html>].

De acuerdo con Melosh [1989], existe una relación de transición entre la morfología de un cráter simple y la de un cráter complejo que es regida principalmente por la fuerza gravitacional. Con base en esta relación, el diámetro para que una cuenca de impacto se desarrolle como un cráter complejo es mayor en planetas con menor atracción gravitatoria. En nuestro planeta esta transición ocurre a ~ 3-5 km [Melosh e Ivanov, 1999].

A diferencia de los cráteres simples, las paredes de los cráteres tipo complejo y multianillados, colapsan hacia el centro de la cavidad transitoria generando grandes bloques de rocas conocidos como *slump blocks* [Melosh, 1989]. En nuestro planeta la longitud de estos bloques es de decenas de kilómetros y en conjunto se les denomina *terrace zone* o zona de terrazas (Figura 5). Además de los *slump blocks*, en los cráteres complejos y multianillados se pueden desarrollar estructuras de *central peak* o *peak ring*.

El *central peak* (Figura 5), que le da nombre a uno de los tipos de cráteres complejos, es una estructura formada por la acción de rebote del material del piso de la cavidad que se emplaza al centro de la cuenca de impacto una vez que los esfuerzos en la zona de choque han alcanzado el equilibrio [Melosh, 1989].

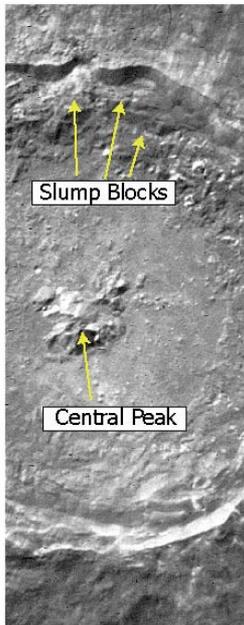


Figura 5. Cráter complejo tipo *central peak*. Imágen satelital del cráter Tycho en la Luna. Se observan las estructuras de *central peak* y *slump blocks*. Imagen tomada de [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object\\_page/clm\\_usgs\\_14.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/clm_usgs_14.html)

El *peak ring* (Figura 6), que le da nombre al segundo tipo de cráteres complejos y que también se presenta en cráteres multianillados, es una cadena de montículos emplazados alrededor del centro del cráter que carece de estructuras de fallamiento que limite estas elevaciones topográficas entre sí [Morgan et al., 1997].

Aunque el *peak ring* ha sido reconocido en un gran número de cráteres en otros planetas, el proceso que lo origina no se ha comprendido en su totalidad debido a la dificultad que representa estudiar un fenómeno a distancia; a pesar de ello algunas teorías sugieren que el *central uplift* se levanta en una columna de gran altitud durante el proceso de formación de un *peak ring* (mucho mayor comparativamente con la altura que alcanza cuando se forma un *central peak*). Debido a la altura que alcanza, esta columna se vuelve altamente inestable por efectos de la gravedad y el colapso del *central uplift* es inminente provocando que el material se desplace hacia fuera del punto de choque depositándose sobre el *slump block* más interno del cráter una vez que estos se ubican en su posición final en la zona de terrazas (Figura 7) [Deutsch et al., 1995, Collins et al., 2002]. De acuerdo con Melosh [1989], este mecanismo de formación del *peak ring* explica el desarrollo de esta estructura haciendo la consideración fundamental de que el material en la zona de impacto se comporta como un fluido.

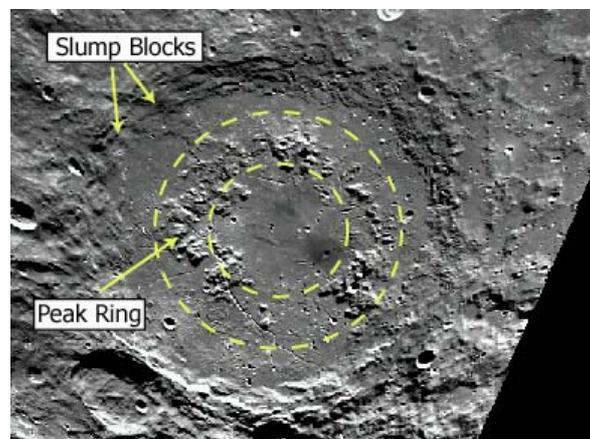


Figura 6. Cráter complejo tipo *peak ring*. Cráter Schrodinger en la Luna. Las flechas señalan las estructuras de *slump blocks* que definen la *terrace zone*, que coincide hacia el exterior de la cuenca con el borde del cráter. Las circunferencias punteadas señalan la presencia del *peak ring* o cadena de elevaciones topográficas, que se levanta sobre el piso del cráter [Imagen satelital tomada de <http://www.lpi.usra.edu>].

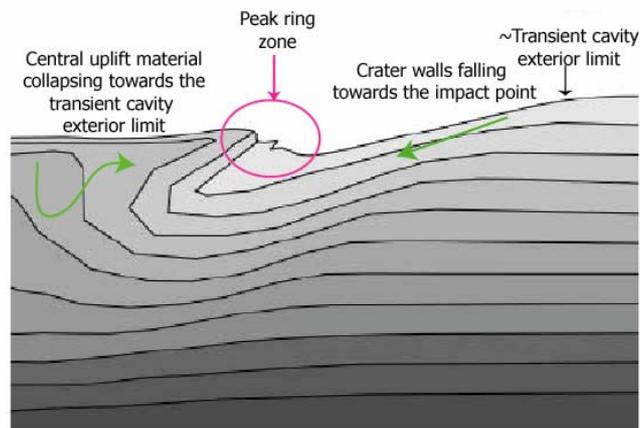


Figura 7. Modelo del mecanismo de emplazamiento del *peak ring*. Las flechas verdes indican la dirección sugerida de desplazamiento de las paredes del cráter en formación y del material del levantamiento central (*central uplift*). El círculo rosa indica el lugar del emplazamiento del *peak ring* y la flecha negra señala el borde de la *transient cavity* [Modificado de Collins et al., 2002].

Además de presentar estructuras de *slump blocks*, *central peak* y *peak ring*, los cráteres multianillados desarrollan al menos dos estructuras anulares hacia el exterior de la cuenca de impacto y una en la parte interior que corresponde al *peak ring* [Morgan et al., 1997]. Las estructuras anulares desarrolladas hacia el exterior presentan escarpes asimétricos que se inclinan en dirección al centro del cráter a diferencia del *peak ring* en cuyo caso no se distinguen rasgos de orientación preferencial. La cuenca Oriental, en la Luna (Figura 8) es un ejemplo de este tipo de cráter, con al menos tres anillos en su estructura.

En la Tierra los cráteres multianillados se desarrollan a partir de diámetros mayores a 100 km [French, 1998] pero debido a los procesos erosivos y relacionados con la tectónica de placas su morfología se altera dificultando su clasificación. Considerando el tamaño de la cuenca de impacto se tienen tres posibles ejemplares en nuestro planeta: Vredefort, Sudbury y Chicxulub, siendo este último el mejor preservado y cuyas características se revisarán por ser materia de estudio de esta tesis.

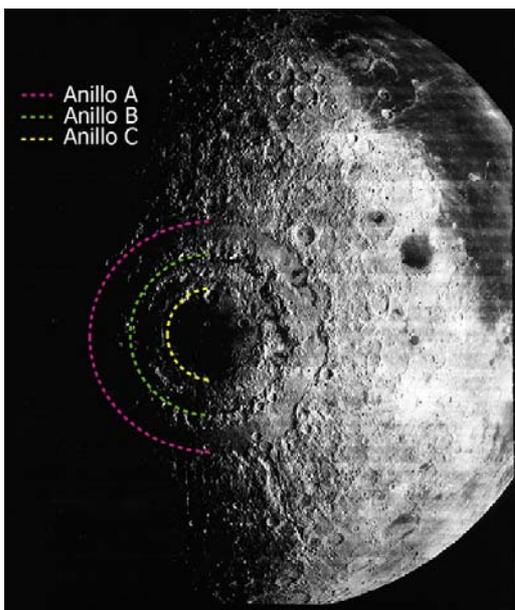


Figura 8. Cráter multianillado. Las líneas punteadas de diferentes colores indican la ubicación de múltiples anillos en el cráter Oriental en la Luna [Imagen satelital tomada de [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/hires/lo4\\_m187.gif](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/hires/lo4_m187.gif)].

## II.II. EL CRÁTER DE CHICXULUB, UN EJEMPLAR EXCEPCIONAL.

El cráter de Chicxulub, identificado primeramente como una estructura de impacto por Penfield y Camargo [1981], yace parcialmente sobre la Península de Yucatán y frente a sus costas en la sección sureste del Golfo de México (Figura 9). Esta estructura de ~ 200 Km de diámetro, originada hace aproximadamente 65 millones de años, se formó como resultado del impacto de un bólido en aguas someras que cubrían la plataforma carbonatada de Yucatán en esa época [Álvarez et al., 1980].

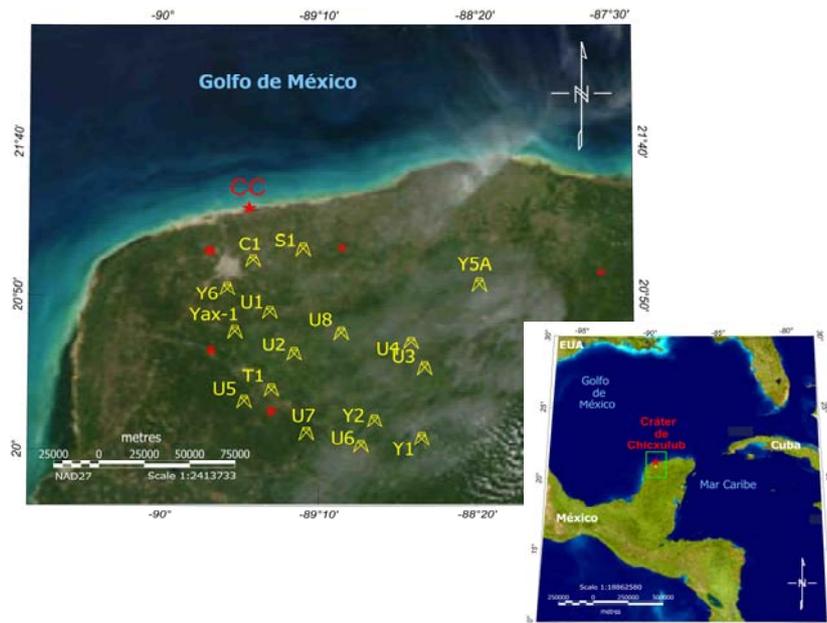


Figura 9. Ubicación del cráter de Chicxulub y pozos perforados en la zona de impacto. La imagen inferior de la derecha muestra la ubicación de la zona de impacto en la Península de Yucatán inscrita en el cuadro verde. En la figura de la izquierda se observa a detalle la ubicación del centro del cráter (CC), señalado con una estrella roja; y la localización de pozos perforados en la zona con la siguiente nomenclatura: C1, S1, Y1, Y2, Y5A, Y6, U1, U2, U5, U6, U7, U8, y Yax-1. Las escalas gráficas están en metros.

Uno de los principales debates desde su descubrimiento, ha concernido al diámetro y número de anillos del cráter; considerando la presencia y posición de estos últimos, algunos autores sugirieron durante la primer mitad de la década de los noventa, que el Chicxulub era un cráter tipo *peak ring* [Hildebrand et al., 1991 y Espindola et al., 1995], sin embargo, la reinterpretación de un conjunto de datos gravimétricos llevó a Sharpton et al. [1993] a proponer la existencia de cuatro anillos ubicados a distancias radiales del centro del cráter de ~ 53 km, 77 km, ~ 100 km y ~ 140 km. En 1997 Morgan et al., presentaron los resultados de un estudio de prospección sísmica llevado a cabo durante 1996 sobre cuatro perfiles en los que definieron tres estructuras anulares, el *peak ring* al interior del borde del cráter, el *inner ring* y el *outer ring*. Dos años más tarde al reinterpretar dichos perfiles, Morgan y Warner [1999a] definieron la distancia radial de estos anillos ubicando al *inner ring* a aproximadamente 65-75 km del centro del cráter, al *outer ring* a ~ 90 -110 km y una nueva zona de anillos a una distancia de ~120-130 km que denominaron *exterior ring*. El valor de la distancia radial cambia de acuerdo con la zona del cráter prospectada, existiendo una diferencia marcada entre las líneas prospectadas al NE del cráter con aquellas del NW.

Los estudios de Sharpton et al. [1993] y Morgan et al. [1997], sentaron las bases para definir al Chicxulub como un cráter multi anillado, siendo el único ejemplar en su tipo bien preservado que permite estudiar directamente el complejo mecanismo de formación de múltiples anillos, y en especial de la estructura de *peak ring* en su interior.

El *peak ring* del cráter de Chicxulub fue descrito por primera vez empleando la información de cuatro perfiles sísmicos [Morgan et al., 1997]. Dos de las características que se determinaron fueron su radio y la elevación respecto al piso del cráter. En ese estudio se propuso un radio de ~ 40 km y se determinó que la elevación del *peak ring* era diferente entre los sectores este-noreste y oeste-noroeste del cráter, presentando picos más pronunciados de 400-600 m de altura en el W-NW y montículos más suavizados de 200-300 m en la porción E-NE. También se identificó por primera vez la existencia de un reflector inclinado que subyace al *peak ring*, y que forma una frontera entre este y los *slump blocks*, que se denominó *dipping reflector* [Morgan et al., 1997].

Subyaciendo al *dipping reflector*, la zona de terrazas del Chicxulub tiene una extensión máxima de ~ 45 km y la longitud de los *slump blocks* que la conforman es de 5-12 km. La deformación e inclinación de los *slump blocks* es máxima en el sector NW del cráter y la superficie que dibuja la zona de terrazas se encuentra a mayor profundidad en este mismo sector [Sean Gulick, comunicación personal]. Además se ha observado que el *slump block* más cercano al centro del cráter subyace a la estructura de *peak ring* [Morgan et al., 1997 y Morgan et al., 1999a].

### II.III. TECTÓNICA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA DE IMPACTO DE CHICXULUB

La Península de Yucatán, el Golfo de México y la región del Caribe son el resultado de la separación de Norte y Sudamérica debido a un movimiento de divergencia de estas placas hacia el oeste respecto a África [Pindell y Kennan, 2001].

Las reconstrucciones de tectónica de placas así como los registros geológicos y paleomagnéticos, indican que el desarrollo de la península de Yucatán estuvo asociado a la formación del Caribe y del Golfo de México, sin embargo algunos modelos sugieren que el movimiento del bloque de Yucatán fue mayormente independiente de la dinámica de movimiento de las placas continentales de la zona [Pindell et al., 2000].

La Península de Yucatán alcanzó su posición actual durante el Cretácico Temprano (Figura 10) después de que migró desde el norte desprendiéndose de Norteamérica y giró en sentido antihorario respecto a diferentes polos de rotación de acuerdo a la dinámica de cada periodo [Pindell y Kennan, 2001]. Esto significa que para el momento del impacto del meteorito o asteroide, lo que hoy conocemos como Chicxulub, se localizaba en las coordenadas actuales pero sumergido bajo aguas someras que proporcionaban las condiciones ideales para la depositación de rocas sedimentarias como constatan los registros geológicos (Figura 11).

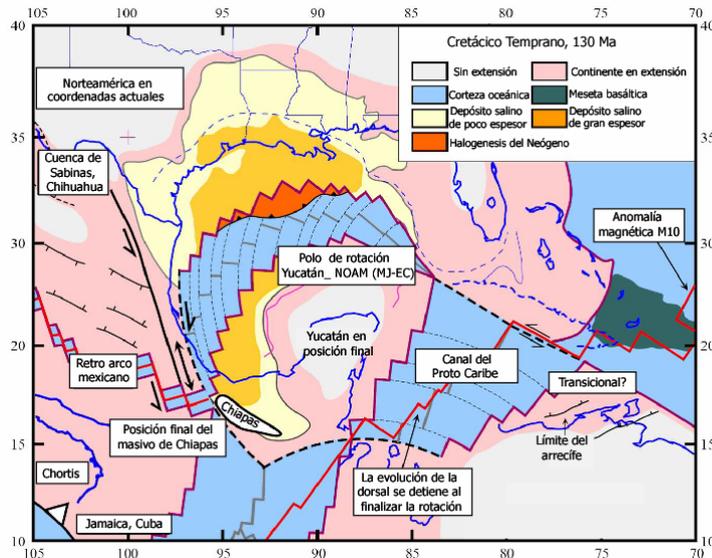


Figura 10. Reconstrucción de la dinámica de formación de la zona del Golfo de México y el Caribe para el Cretácico Temprano. MJ: Jurásico Medio, EC: Cretácico Temprano, NOAM: Norteamérica [Pindell et al., 2001].

MAPEO DE LA ESTRUCTURA DEL ANILLO CENTRAL AL INTERIOR DEL CRATER DE IMPACTO DE CHICXULUB  
CON BASE EN PERFILES SÍSMICOS DE REFLEXIÓN 2-D.

II. Antecedentes para el estudio del cráter de impacto de Chicxulub.

La geología del área del impacto del Chicxulub ha sido estudiada tanto por rocas expuestas en la zona de Yucatán como a través de la perforación de diversos pozos (Figura 9). Los primeros pozos en el área de impacto, Chicxulub1 (C1), Sacapuc1 (S1), Ticul1 (T1), Yucatán 1, 2, 4 y 5a (Y1, Y2, Y4 y Y5a), fueron perforados por la compañía estatal de Petróleos Mexicanos (PEMEX) con la finalidad de investigar el potencial de la zona para fines de explotación de hidrocarburos. El análisis de las muestras obtenidas permitió definir de manera general las unidades litológicas de la zona hasta los ~3500 m.

Sin embargo el creciente interés de la comunidad científica en el cráter, llevó a diferentes instituciones, tales como la Universidad Nacional Autónoma de México y el *Internacional Continental Drilling Program (ICDP)* a realizar perforaciones con el objetivo de recabar información de tipo científico que permitiera conocer más acerca de este impacto (en la Figura 9 los pozos de la UNAM son: U2, U5, U5 y U7 y del ICDP: Yax-1).

La relación litológica entre los pozos perforados se simplificada en la Figura 11; en ella se muestra que las rocas de la zona de Chicxulub son fundamentalmente originadas por el impacto y por procesos sedimentarios. Los pozos más profundos Y2, Y1 y Y4, atraviesan el grueso de la columna estratigráfica de la zona y en ellos se reconoce la litología pre impacto, de impacto y post impacto representada por calizas y dolomitas; suevita, roca fundida y brecha; dolomita anhidrita y basamento cristalino correspondientemente [Stöffler et al., 2004]. Como se puede observar en la misma figura, cada una de las unidades aparece o cambia de espesor en los pozos dependiendo de la relación de distancia que guarda el mismo respecto a centro del cráter, de tal manera que el grosor de los depósitos sedimentarios post impacto es mayor hacia el centro del cráter y se desvanece hacia la parte sur de la península de Yucatán; de forma similar ocurre con las rocas de impacto que se registraron en los pozos C1, S1, Y6, U6, U7 pero que no se encuentran en las secciones de pozos a distancias mayores de ~140 km del centro del cráter.

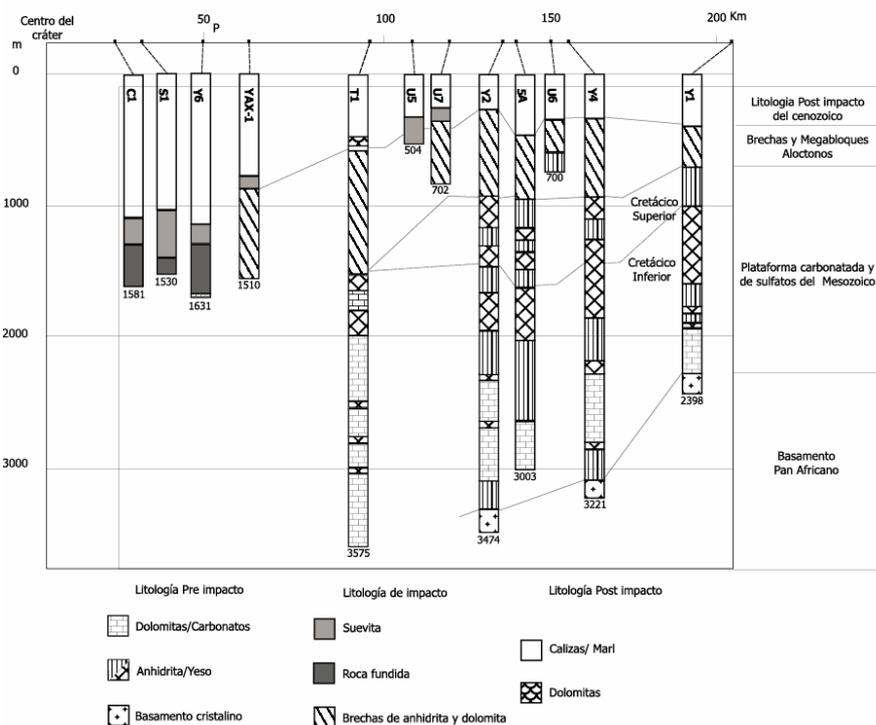


Figura 11. Estratigrafía en pozos del área de impacto. La ubicación de los pozos respecto al centro del cráter se indica en kilómetros en la parte superior de la figura [Stöffler et al., 2004].

### III. METODOLOGÍA

#### III.1. CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE REFLEXIÓN SÍSMICA 2005.

El cráter de Chicxulub había sido poco explorado en la porción que yace bajo la superficie marina en el Golfo de México, los datos con los que se contaba comprendían tan solo dos perfiles sísmicos prospectados por PEMEX en 1992 y cuatro secciones adquiridas durante 1996 (Figura 12). Para definir con mayor detalle la geometría del cráter e investigar las características del *peak ring*, con la finalidad de obtener elementos que ayuden a la comprensión de los complejos procesos de formación de un cráter de impacto, durante 2005 se obtuvieron un total de 29 perfiles de reflexión sísmica con diferentes orientaciones que se muestran en la Figura 12 como líneas de color rosa identificadas con los números 1-25 y R1-R7 (que serán referidas a lo largo de la tesis como Chicx-XX).

Once de estas líneas tienen una longitud de  $\sim 80$  km y se orientan WSW-ENE (1-13) y una mide tan solo  $\sim 25$  km (R5), diez tienen  $\sim 25$  km de longitud y son perpendiculares a las anteriores (15-24), tres perfiles son radiales de  $\sim 50$ -90 km de largo (R1, R3 y R7), una línea de  $\sim 30$  km orientada NW-SE (25), una sección de  $\sim 18$  km orientada NWN-SES y un perfil semicircunferencial prospectado a una distancia radial  $\sim 120$  km (R6a y R6b). Las líneas 1-24 forman una retícula en la porción NW-central del cráter con una separación de  $\sim 3$ -5 km en dirección aproximada NS y  $\sim 10$  km perpendicularmente.

Algunos de los perfiles que aparecen representados como líneas continuas en la Figura 12 en realidad están conformados por dos o más secciones (Tabla 1), ya que la adquisición de datos durante este experimento estuvo altamente regulada por las autoridades mexicanas mismas que impusieron una serie de restricciones a las operaciones (Apéndice C) lo que impidió que la toma de datos fuera continua a lo largo de los perfiles afectando con ello la densidad de datos adquiridos.

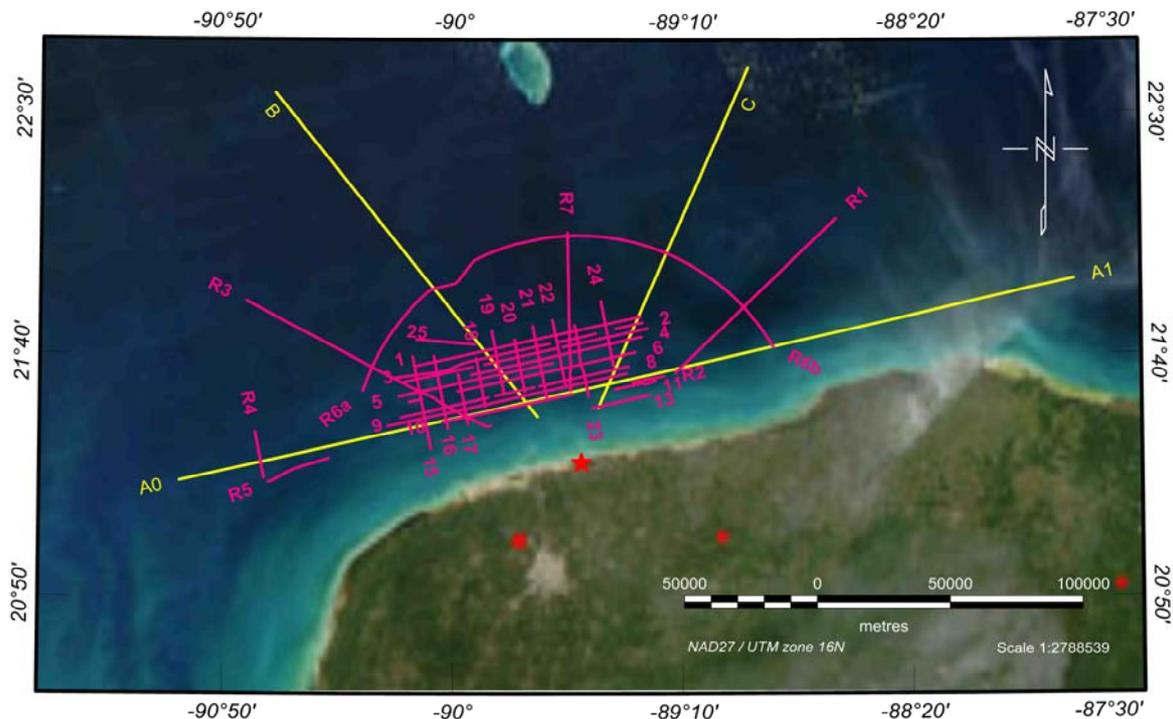


Figura 12. Ubicación de los perfiles de reflexión sísmica. Las líneas rosas indican la localización de los perfiles de reflexión sísmica obtenidos durante el experimento de 2005 (1-25 y R1-R7). Las líneas amarillas señalan la ubicación de las líneas prospectadas en 1996 (A0, A1, B y C). La estrella roja se ubica en el centro del cráter en las coordenadas 21.3°N, 89.54°W de acuerdo con Morgan et al., [1997]. La escala gráfica representa distancia en metros.

### III.I.1. GEOMETRÍA DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

En este experimento se empleó un tendido de 6 km de largo con 480 canales espaciados cada 12.5 m. El intervalo de muestreo fue de 2 ms y se rastrearon estructuras hasta los 14 s doble tiempo de viaje. Durante la prospección sobre el cráter se usaron tres diferentes geometrías de adquisición con distancias de separación entre el barco y el grupo de receptores más cercano en el tendido (*near offset*) de 112 m, 180 m y 13 m como se muestra en Tabla 1.

Un aspecto importante a considerar para el diseño de la geometría de adquisición de datos de reflexión sísmica, es que la calidad de los datos depende de la profundidad a la que se sitúe el tendido de hidrófonos y las pistolas neumáticas que sirven como generadoras de ondas elásticas (Figura 13). De acuerdo con experimentos previos que se realizaron en el *R/V Maurice Ewing*, el conservar los receptores a una profundidad de 7 m y las pistolas a 6 m debajo de la superficie del agua proporciona datos con la menor influencia de ruido [[http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/phys\\_prin.html](http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/phys_prin.html)]. Para lograr este objetivo se emplearon un total de 28 flotadores distribuidos a lo largo del tendido para mantener constante esta relación de flotabilidad durante todo el crucero (Figura 13).

Distancia: 112 m		Distancia: 180 m	Distancia: 13 m
Chix1	Chix18	Chix2	Chix2a
Chix2b	Chix19	Chix4b	
Chix3	Chix20	Chix4c	
Chix3a	Chix21	Chix6	
Chix3b	Chix22	Chix6a	
Chix5	Chix23	Chix8a	
Chix6b	Chix23a	Chix8b	
Chix9	Chix24	Chix8c	
Chix11b	ChixR3	Chix10	
Chix13b	ChixR4	ChixR1	
Chix15	ChixR5	ChixR2	
Chix16	ChixR6a		
Chix17	ChixR6b		
Chix17a	ChixR7		
Chix17b			

Tabla 1. Relación de líneas y geometría de adquisición en perfiles de reflexión sísmica. La distancia se refiere a la separación entre la embarcación y el grupo de hidrófonos más cercano al barco en el tendido (*near offset*). Las líneas identificadas con el mismo número son secciones de un mismo transecto.

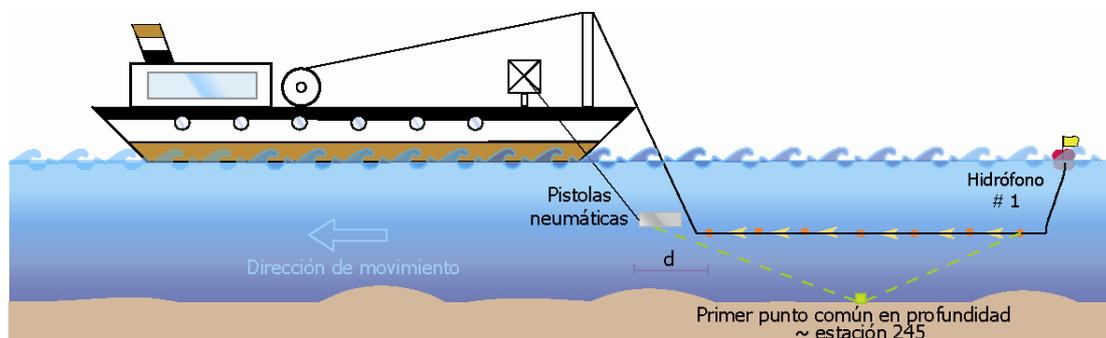


Figura 13. Esquema de la geometría de adquisición de datos. Los círculos naranjas son los grupos de hidrófonos sobre la línea del tendido que se mantuvo a una profundidad de 7 m. Las flechas amarillas son flotadores. El arreglo de 20 pistolas neumáticas se representa con un rectángulo color gris; *d*: es la distancia medida entre el barco y grupo de hidrófonos más próximo al barco del tendido.

III.I.2. FUENTE DE ENERGÍA EMPLEADA EN EL EXPERIMENTO SÍSMICO.

La fuente de energía empleada durante el experimento fue un arreglo conformado por 20 pistolas neumáticas que fueron disparadas en sincronía a intervalos de 20 s aproximadamente cada 50 m. El principio básico de funcionamiento consiste en generar una burbuja de aire que libera cierta presión al medio y viaja través del mismo en forma de ondas elásticas. Las burbujas generadas cumplen ciclos de expansión-colapso que están en función del volumen y la presión del aire dentro del cilindro de la pistola así como de la profundidad a la cual es colocada. De esta forma se tiene que la amplitud generada por la burbuja es proporcional al volumen de aire librado[Fontana, 2002]:

$$A \sim \sqrt[3]{V} \dots\dots\dots(1)$$

Donde,

A: amplitud del impulso generado

V: volumen de aire generado por la pistola neumática.

Con base en la relación anterior se puede inferir que para tener un impulso de gran amplitud que viaje a través de las diferentes capas del medio es necesario tener una fuente cuyo volumen de gran volumen, pero en términos prácticos esto no es posible por lo que se recurre a emplear arreglos conformados por un cierto número de pistolas neumáticas cuyo volumen no sea muy grande. La señal generada por dicho arreglo puede ser considerada como proveniente de una fuente puntual ubicada al centro del área del mismo [http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/Airgun\_array\_directivity.pdf]. La Figura 14 muestra la disposición del arreglo de pistolas del R/V Maurice Ewing empleado en la prospección en el cráter de impacto de Chicxulub durante 2005. El volumen total de este arreglo era de 6947 in<sup>3</sup> con lo que se generaron señales con una frecuencia dominante de ~ 40 Hz, lo que permitió tener una resolución vertical de ~ 15.5 m para profundidades menores a un kilómetro.

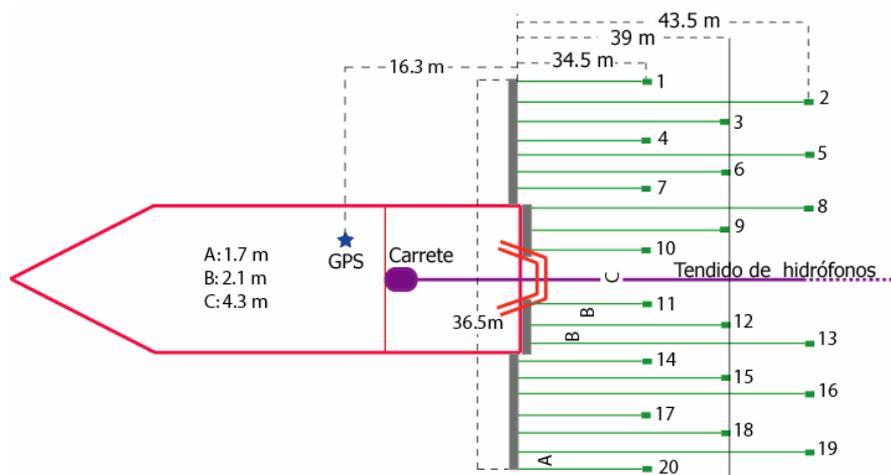


Figura 14. Vista en planta de la distribución del arreglo de pistolas en el R/V Maurice Ewing durante el experimento sísmico de 2005 [ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB\_Report\_&\_Appendices/Chicxulub%20Cruise]. Los rectángulos verdes representan las pistolas neumáticas identificadas con números 1-20. Las letras indican la separación entre los cables de las pistolas neumáticas, las distancias que no se indican en la figura corresponden a 1.7 m. La longitud total del tendido de hidrófonos es de 6000 m

Durante esta campaña de adquisición de datos, el uso de las pistolas neumáticas se realizó escalonando su potencia. Al comienzo de cada perfil, las pistolas se accionaban de manera que se encendía primeramente la de menor volumen continuando en orden ascendente hasta tener todas las pistolas en funcionamiento. El tiempo requerido para tener el total de volumen de aire expulsado al medio era de 25 min (Apéndice C). Este procedimiento se seguía cada ocasión que la embarcación cambiaba de rumbo o en casos previstos por las restricciones impuestas a este experimento. Es importante mencionar que la calidad de datos al inicio y final de cada perfil es pobre como resultado de seguir este procedimiento, además de que se tuvo un efecto negativo sobre todo el experimento sísmico restando tiempo de adquisición de datos (Apéndice C).

### III.II. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Con el objetivo de interpretar estructuras geológicas en los perfiles de reflexión sísmica es necesario aplicar una serie de procesos a los datos de campo para mejorar la relación señal-ruido y para asegurarse de que la información que se interpreta corresponde a un evento verdadero.

Para procesar el conjunto de datos del experimento del cráter de Chicxulub de 2005, se empleó el programa FOCUS desarrollado por Paradigm. Los módulos que lo conforman, permiten realizar desde los pasos fundamentales en la secuencia de procesamiento como lo son la deconvolución, apilamiento y migración, hasta procedimientos para mejorar la calidad de los datos en diferentes sentidos, como lo es la aplicación de factores de ganancia, corrección por dispersión geométrica, diferentes tipos de filtrado, análisis interactivo de velocidades, etc.

El flujo de procesamiento aplicado a los 29 perfiles de dicho conjunto se observa en la Figura 15. Los resultados obtenidos en algunas de las etapas se muestran a lo largo de este capítulo en el orden indicado por las flechas solo para dos perfiles (Chicx-10 y Chicx-R3) con la finalidad de hacer evidentes las mejoras obtenidas para el lector.

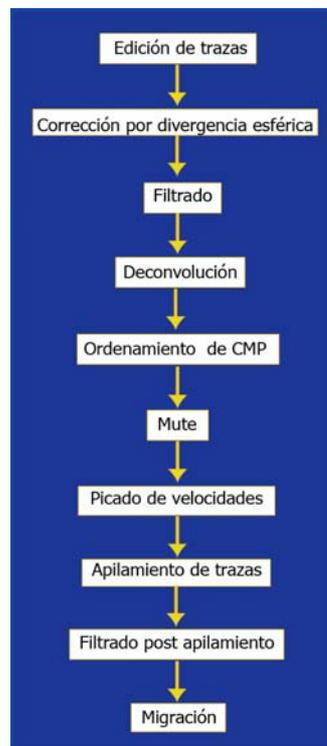


Figura 15. Flujo de procesamiento de datos de reflexión sísmica. Los módulos representan los pasos generales aplicados a los datos de la campaña de adquisición de 2005.

La primera parte del procesamiento consistió en realizar un análisis gráfico para observar la calidad de las trazas en cada canal y editar aquellas con alto contenido de ruido. Mediante el uso de una subrutina del software se eliminaron un promedio de 5 trazas de mala calidad de todos los registros de tiro y diferente número de trazas en cada línea en específico. La Figura 16 muestra el resultado de eliminar las trazas 14, 31, 312, 341, 343, 402, y 463 de los registros de la línea Chicx-10.

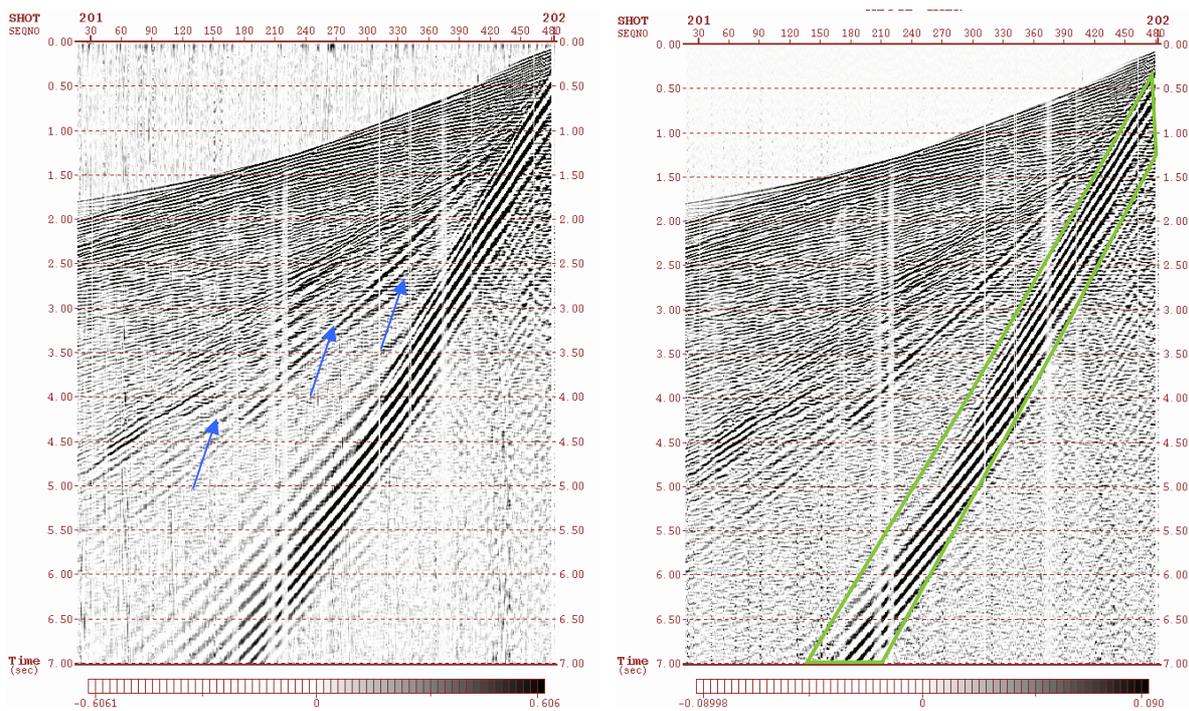


Figura 16. Edición de trazas y corrección por divergencia esférica en la línea Chicx-10. El eje horizontal contiene puntos de disparo y el eje vertical es el doble tiempo de viaje en segundos. El lado izquierdo de la figura muestra un punto de tiro del perfil después de la edición de trazas. En el lado derecho se observa la misma sección después de aplicar la corrección por divergencia esférica, es evidente que la señal es más clara para tiempo mayor a 3s, pero los procesos aplicados no han removido las ondas que viajan entre la interfase agua-substrato marino como *guided waves* (flechas azules) y *Scholte waves* (inscritas en el polígono verde) que afectan a todo el campo de reflexiones.

Además de contener información ruidosa, los registros sísmicos pierden claridad por diferentes causas. Una de los fenómenos que afectan la calidad de las secciones en profundidad, es la pérdida de amplitud de la señal por causa de la divergencia esférica [Yilmaz, 2001]. En el programa Focus este efecto puede ser revertido multiplicando cada traza por una función de efecto inverso  $g(t)$  tal que,

$$g(t) = t^{\alpha} \dots\dots\dots(2)$$

donde,  
 $\alpha$ , es el valor de una constante definida por el usuario.

La Figura 17 muestra el resultado de aplicar la corrección por divergencia esférica a la línea Chicx-10. Es evidente que aunque para tiempos de viaje mayores a 3 s los eventos reflejados se aprecian mejor, los registros de tiro aun presentan una fuerte componente de ruido debido a las *guided waves* y *Scholte waves* generadas por el alto contraste de velocidades que representa la interfaz de agua y los substratos del suelo marino de la zona prospectada. Con la finalidad de remover la presencia de estas ondas en los registros se puede recurrir al empleo de un filtro F-K o una transformación  $\zeta$ - $p$  [Yilmaz, 2001]. Para los datos del experimento sísmico de 2005, se empleó un filtro F-K cuyos parámetros pueden consultarse en el Apéndice E. La Figura 17 muestra el resultado de este procedimiento.

La señal de los registros de campo, está conformada por la combinación de la respuesta del medio o serie de reflectividad, con la excitación de la ondícula generada por las pistolas neumáticas y una componente de ruido. Para separar la serie de reflectividad de las demás componentes, se aplica la operación de deconvolución [Yilmaz, 2001]. La disminución del contenido de ruido después de aplicar esta operación en la sección Chicx-10 se hace evidente en la Figura 17, en ella se puede apreciar una mejoría sustancial respecto a la Figura 16.

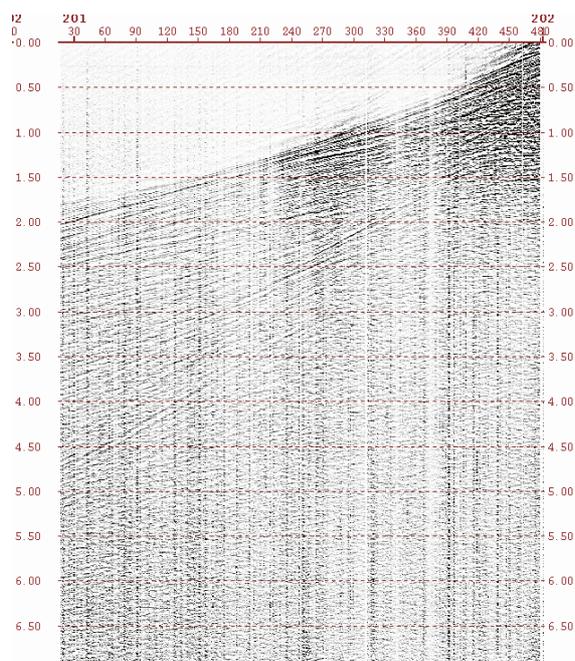


Figura 17. Deconvolución en la sección no apilada Chicx-10. La presencia de ruido ha sido aminorada después de aplicar un filtro F-K y aplicar operador deconvolución.

Una vez que gran parte de la componente del ruido fue eliminada, se procedió a ordenar los datos en conjuntos denominados *gathers*, dicha colección de datos posee un parámetro en común que puede ser punto de disparo, receptor, punto medio, etc. Para los datos de esta prospección, se formaron *gathers* de *CMP* (*common mid point*) o punto medio común de reflexión considerando una cobertura de 120 trazas.

Los datos agrupados de esta manera presentan otro efecto por el que se deben de corregir como una consecuencia directa de la geometría de adquisición. Debido a que la información en cada receptor se detecta en un tiempo distinto de acuerdo con la posición que guardan en el tendido respecto a la fuente, los eventos en fase dibujan una trayectoria parabólica; este efecto es conocido como *move out* y para corregirlo es necesario tomar en cuenta la velocidad a la que se desplazan las ondas elásticas en el medio estudiado [Yilmaz, 2001].

Para definir dichas velocidades se empleó un módulo interactivo del programa Focus, en el que se señalan o pican los eventos de máxima coherencia para todos los *gathers* de *CMP*. El valor así definido es aproximadamente igual a la velocidad cuadrática media ( $V_{rms}$ ) que se utiliza posteriormente para obtener la velocidad de intervalo aplicando la fórmula de Dix [Jones, 1999] y un campo de velocidades que define el comportamiento de las capas para todos los puntos de un perfil.

La Figura 18 muestra el proceso interactivo para definir la velocidad cuadrática media en la línea Chicx-10, mientras que la Figura 19 es un ejemplo del campo de velocidades creado para el mismo perfil con base en la velocidad de intervalo. La Tabla 2 sintetiza, a manera de ejemplo, las velocidades picadas y calculadas para el *CMP 1100* de la misma sección.

Cabe mencionar que los registros de campo muestran además de las reflexiones, los eventos que viajan con mayor rapidez y que corresponden a las refracciones. Como estos eventos no representan ningún interés para este estudio, se eliminaron mediante la aplicación de un *mute*. En la Figura 20 se puede apreciar el resultado de eliminar las refracciones mediante este método así como la mejoría obtenida sobre los eventos de reflexión que anteriormente describían una parábola y que una vez corregidos por *NMO* se vuelven más horizontales.

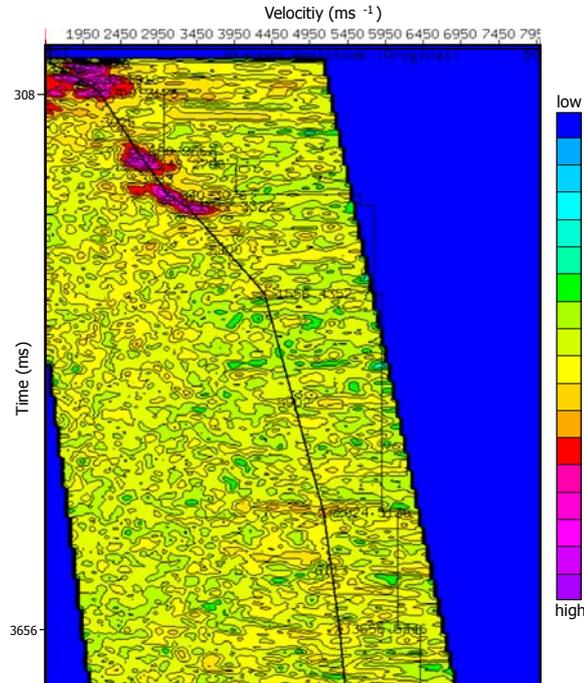


Figura 18. Picado de velocidades en un gráfico de semblanza. La línea negra gruesa define los eventos de mayor coherencia en el campo de velocidades para un *gather* de *CMP* del perfil Chicx-10. Los colores cálidos representan valores altamente correlacionados mientras que las tonalidades azules son valores poco relacionados. Los pares de números son tiempo doble de viaje y velocidad cuadrática media.

TWTT (s)	$V_{rms}$ ( $ms^{-1}$ )	$V_i$ ( $ms^{-1}$ )
0	1520	1520
0.112	1518	1518
0.216	1586	1656
0.296	1872	2485
0.44	2322	3045
0.532	2481	3132
0.644	2640	3292
0.816	2971	3972
0.94	3331	5101
1.264	4067	5687
1.424	4305	5854
1.8	4714	6016
3.876	5463	6038
4.96	5756	6700
5.86	5931	6815
9.524	6329	6918
14.332	6949	8037

Tabla 2. Velocidad de intervalo y cuadrática media para el *CMP* 1100 de la línea Chicx-10. TWTT se refiere al doble tiempo de viaje.

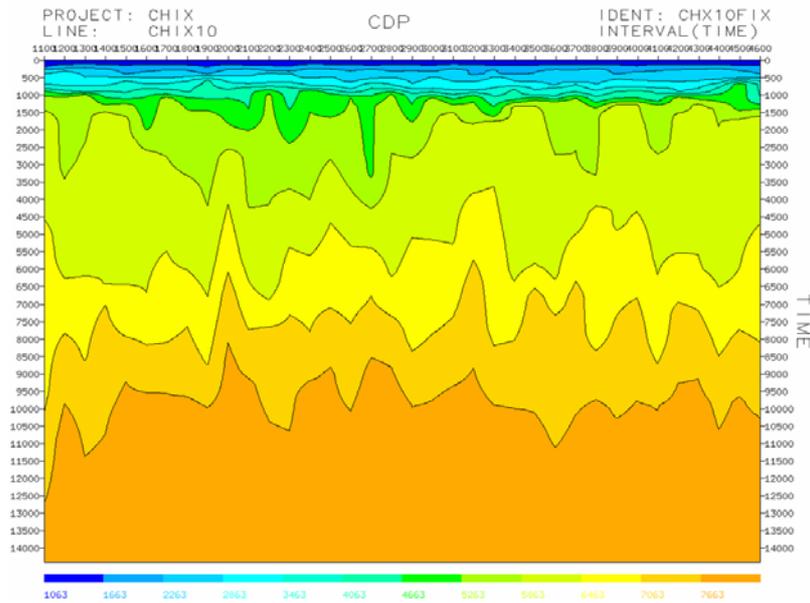


Figura 19. Campo de velocidades del perfil Chicx-10. La escala de colores indica la velocidad de intervalo en  $\text{ms}^{-1}$ , los eventos en color azul son los de menor velocidad mientras que los anaranjados corresponden a altas velocidades. El eje horizontal contiene los *CDP* del perfil y eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en milisegundos.

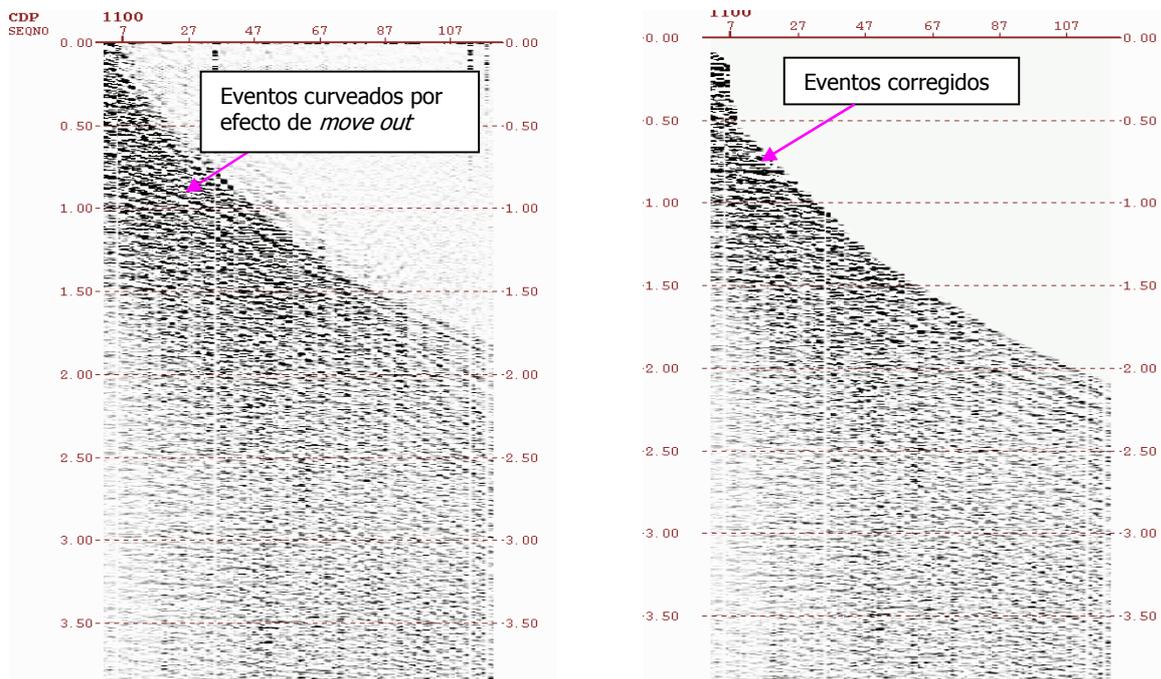


Figura 20. Corrección por efecto de *move out* y *mute*. La figura de la izquierda es un *gather* de *CDP* antes de ser corregido por *move out*, la curvatura de los eventos es más evidente para tiempos menores a 1.5 segundos. La figura de la derecha muestra la misma sección después de aplicar la corrección *NMO* y hacer un *mute*; los eventos ya no presentan la tendencia parabólica y la porción de la señal que correspondía en parte a las refracciones ha sido eliminada con un *mute* manual. El eje horizontal muestra los *gathers* de *CDP* y el eje vertical es doble tiempo de viaje en segundos.

El siguiente paso en el procesamiento de los datos es el apilamiento de la información. Con este procedimiento se logra que los eventos que se encuentren en fase se sumen constructivamente destruyendo aquellos que no son coherentes. La Figura 21 muestra la sección apilada del perfil Chicx-10, en ella se pueden identificar algunos rasgos que bien pueden ser interpretados como de interés, pero al mismo tiempo se observa la poca claridad de los eventos para tiempos mayores a 2 s causada por la inherente pérdida de información que conlleva el proceso de apilamiento. Para mejorar la definición de la sección, se recurrió a un filtrado posterior al apilamiento (ver parámetros en Apéndice E). El resultado de aplicar un filtro *TVF (Time Variant Filter)* al perfil Chicx-10 se puede ver en la Figura 22. La recuperación de claridad en la definición de los eventos es evidente para todo el rango de tiempo mostrado en la figura pero es más claro entre 2-3.5 s.

Aunque en las secciones mostradas en las Figuras 21 y 22 se pueden interpretar rasgos morfológicos de la zona, su ubicación aún no es real. La ubicación de los eventos en su posición correcta se logra aplicando el proceso de migración que tiene como objetivo suprimir las difracciones y llevar los eventos inclinados a su posición real [Yilmaz, 2001]. En esta tesis se empleó el algoritmo de Kirchoff en tiempo y el resultado de aplicarlo a la línea Chicx-10 es mostrado en la Figura 23. Es claro que aún después de aplicar la migración tenemos los eventos del subsuelo referidos al tiempo doble de viaje de la onda y no a la profundidad pero esta representación sirvió como base para interpretar las estructuras geológicas asociadas al cráter de impacto de Chicxulub como se verá en el siguiente capítulo.

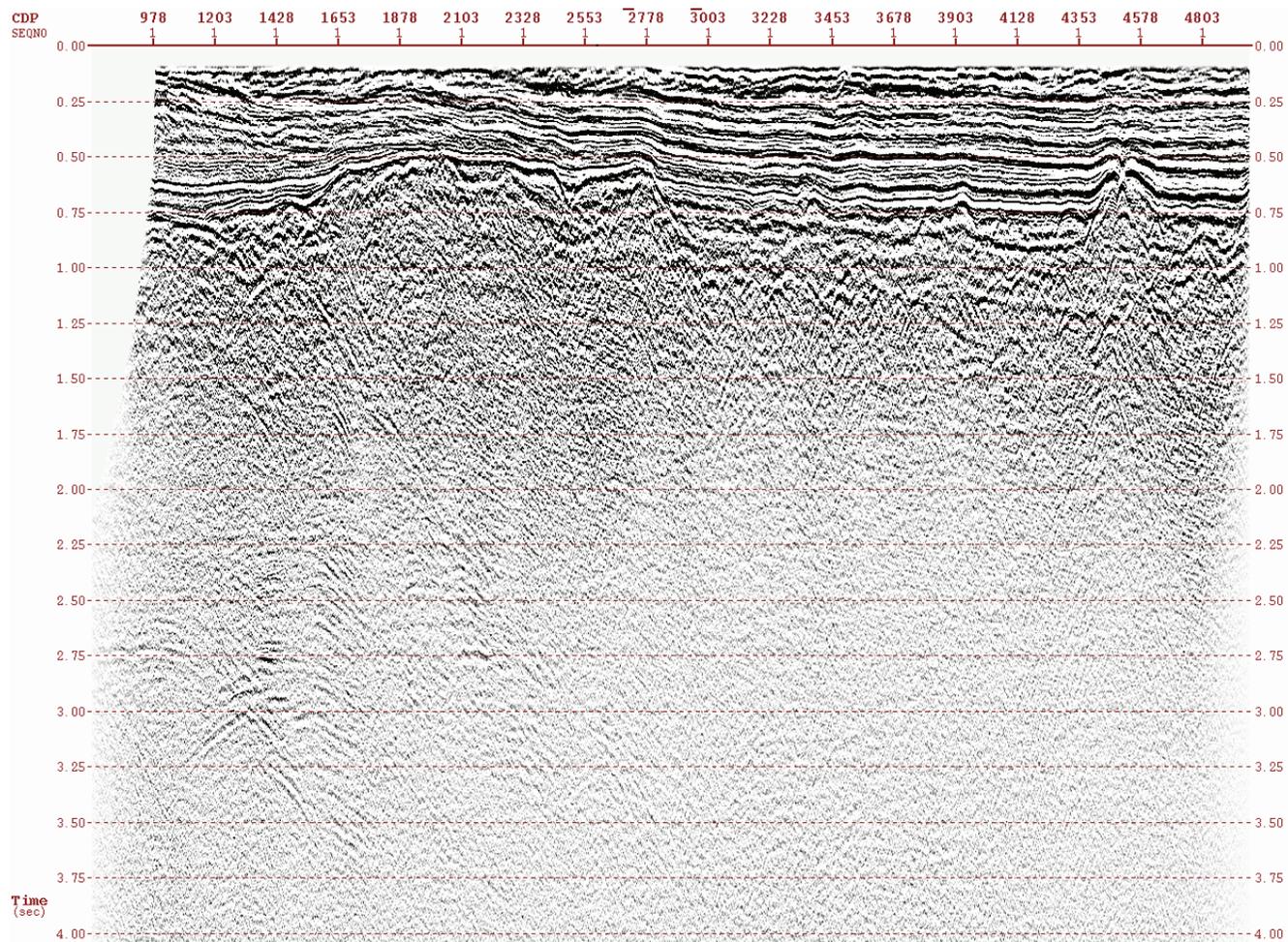


Figura 21. Sección apilada del perfil Chicx-10. Se pueden distinguir algunos rasgos del subsuelo y se observa una marcada diferencia entre los eventos superficiales menores a un segundo y los que le subyacen. El eje vertical es doble tiempo de viaje en segundos y el eje horizontal es el número consecutivo de *CMP*.

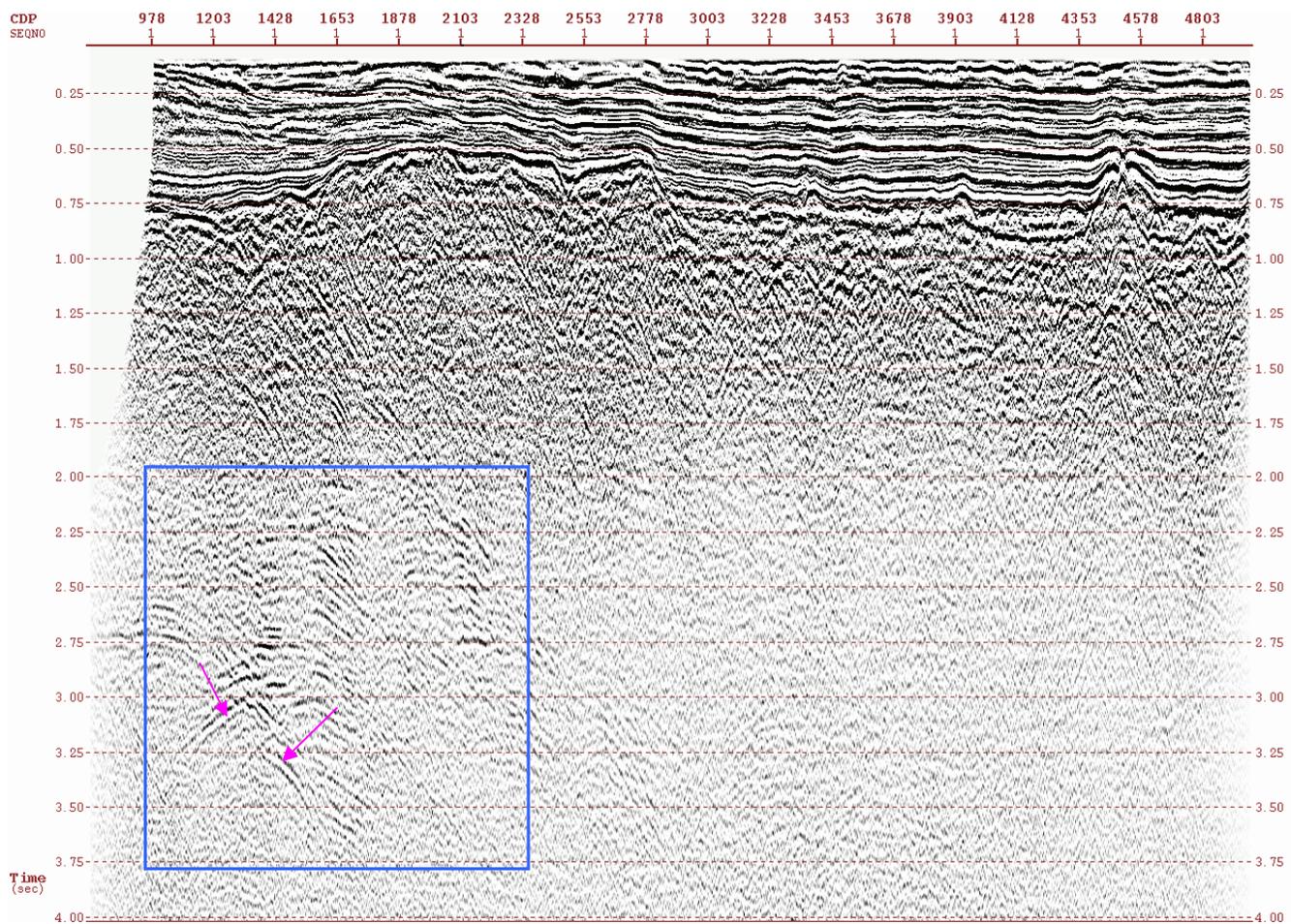


Figura 22. Filtrado post apilamiento en ventanas de tiempo. La definición de los eventos en el perfil Chicx-10 inscritos en el recuadro de borde azul es mejor respecto a la sección mostrada en la Figura 21 aunque algunos de ellos, señalados con flechas, presentan una curvatura al no estar ubicados en su posición real. El eje vertical indica doble tiempo de viaje en segundos y el eje horizontal es el número consecutivo de *CMP*.

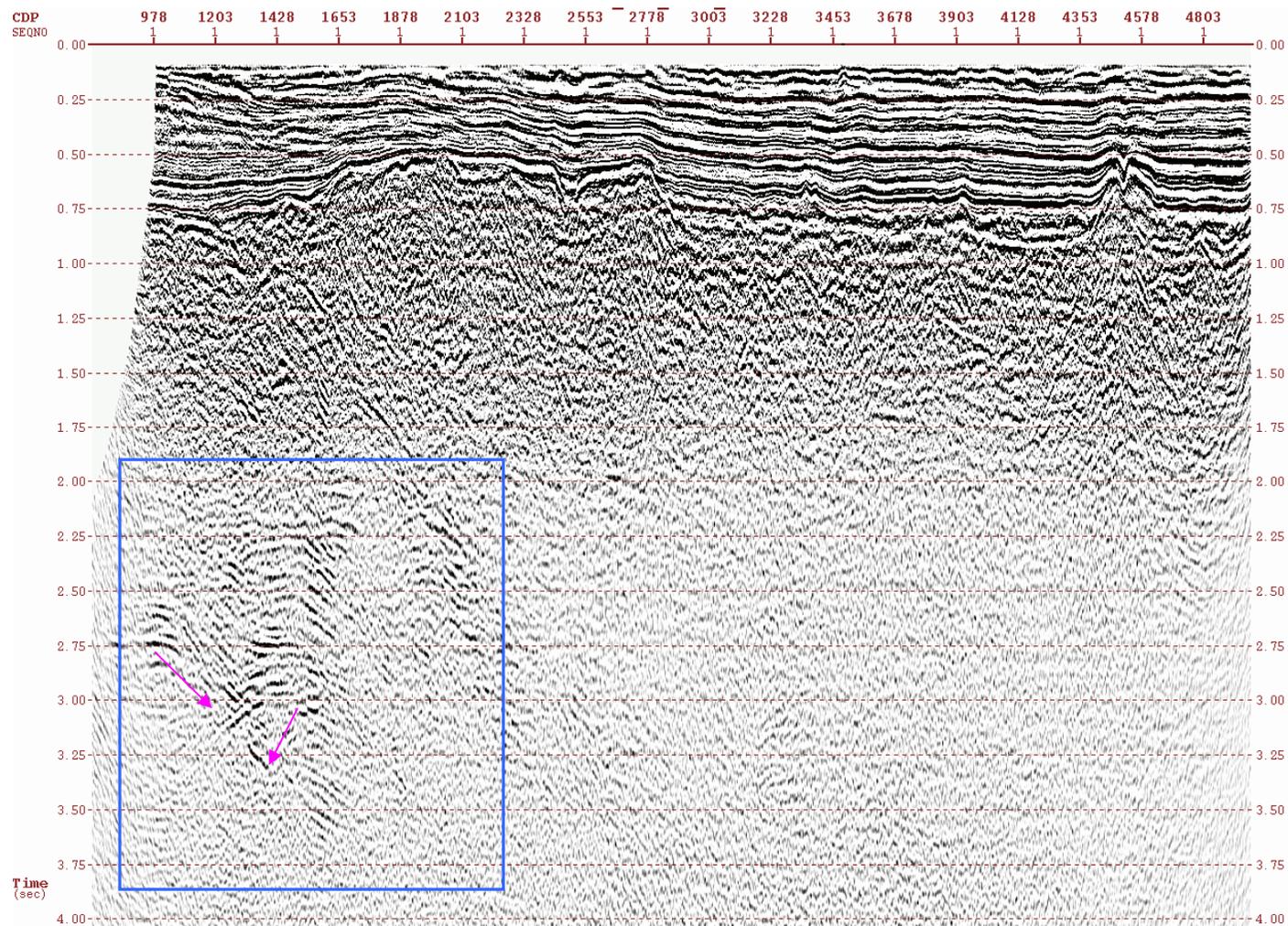


Figura 23. Sección migrada en tiempo del perfil Chicx-10. Las flechas muestran que los eventos inscritos en el recuadro azul han tomado su posición real en tiempo y las difracciones han desaparecido borrando las características *sonrisas* o patrones parabólicos característicos de una sección no migrada.

#### IV. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

##### IV. I. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos conforman un conjunto de 29 perfiles sísmicos migrados en tiempo con información hasta los 14000 ms doble tiempo de viaje. Algunas de estas secciones sin interpretar pueden ser consultadas en el Apéndice D, mientras que aquí se muestran tres perfiles con el objetivo de hacer notoria la presencia de grupos de reflectores de interés situados en seis zonas identificadas como A-F.

Los reflectores marcados en las zonas B1 y B2 son el objetivo de trabajo de esta tesis, sin embargo se describen también los horizontes sísmicos de las zonas A, C, D, E y F debido a la estrecha relación temporal y espacial con la zona B1 y B2. La Figuras 24 y 25 muestran una perspectiva general de los grupos de reflectores que serán descritos a continuación, mientras que en la Figura 26 se observan a detalle los reflectores de las zonas A y B. Cabe mencionar que la descripción que se haga de estos reflectores en *profundidad* siempre estará referida al doble tiempo de viaje a lo largo de esta tesis.

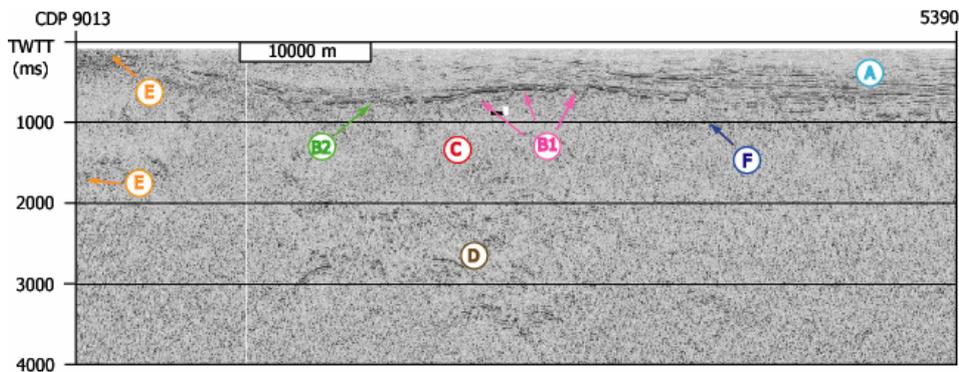


Figura 24. Zonas con reflectores de interés. Sección migrada en tiempo del perfil Chicx-9. Seis zonas identificadas como A-F, presentan horizontes sísmicos remarcables con diferentes características. El eje vertical es doble tiempo de viaje en milisegundos, y el eje horizontal muestra CDP. La escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal.

La parte más superficial de los 29 perfiles sísmicos, identificada como la zona A en las Figuras 24-26, se encuentra ocupada por un paquete de reflectores continuos de alta frecuencia muy bien definidos cuyo espesor es de 0-1200 ms. El espaciamiento vertical entre estos reflectores varía conforme su ubicación en profundidad pero de manera general es mínimo comparativamente con otras zonas de los perfiles sísmicos. Los reflectores de esta zona, definen horizontes subparalelos que yacen obedeciendo a la topografía de un reflector ubicado entre 500-1200 m; mientras que en la porción más superficial de 0-700 ms los horizontes sísmicos describen pequeños ángulos.

La base del paquete de los horizontes sísmicos de la zona A, se dibuja claramente como un reflector de alta frecuencia continuo en las zonas marcadas como B1 y B2, entre 300-1200 ms. La porción B2 de este reflector, conforma el segmento más plano de este horizonte y yace más cercano a la superficie al NW de la zona prospectada; mientras que la parte B1 presenta una topografía accidentada creando una diferencia en profundidad respecto a B2 de hasta 350 ms y puede ser identificado entre 500-1200 ms. La tendencia *topográfica* del reflector en la zona B1, indica que este se extiende algunos kilómetros más hacia la línea de costa de Yucatán, fuera del área prospectada.

El límite entre las zonas indicadas B1 y B2, está naturalmente marcado por la presencia de un reflector inclinado (*dipping reflector*) que se origina a ~ 700-1150 ms y se extiende hasta profundidades de ~ 4500 ms en la zona C (Figuras 24 y 25).

La zona D, representa la porción más profunda de los perfiles analizada en este trabajo. Los reflectores de alta amplitud y baja frecuencia que se encuentran en ella son discontinuos y se dibujan por bloques que se observan en el rango ~1700-3300 ms.

La zona E corresponde a reflectores ubicados al exterior de la cuenca de impacto. Estos horizontes sísmicos se pueden agrupar en dos importantes conjuntos; los horizontes muy cercanos a la superficie entre 0-750 ms, y un grupo de reflectores de alta amplitud y baja frecuencia entre 1000-1800 ms. Ambos conjuntos de reflectores se vuelven discontinuos en por lo menos dos zonas a lo largo de los perfiles radiales y pueden ser bien marcadas en ambas profundidades.

En la zona F se puede observar un reflector que yace ~ 300-400 ms por debajo del horizonte de la zona B1. Este reflector se origina al final de la elevación más pronunciada del reflector en B1 y se extiende en dirección hacia la costa de Yucatán por algunos kilómetros.

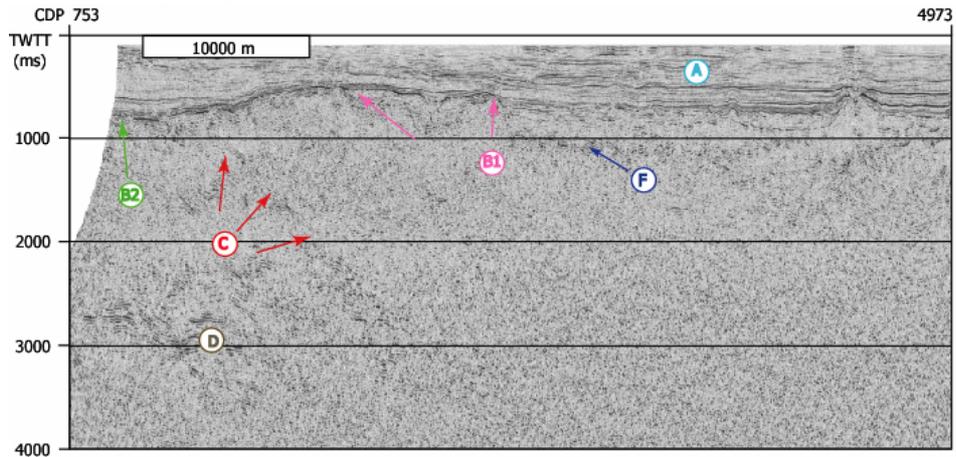


Figura 25. Zonas de reflectores de interés en la sección migrada en tiempo del perfil Chicx-10. Seis zonas identificadas como A, B, C, D, E y F, presentan horizontes sísmicos remarcables con diferentes características. El eje vertical es doble tiempo de viaje en milisegundos, y el eje horizontal muestra CDP. La escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal.

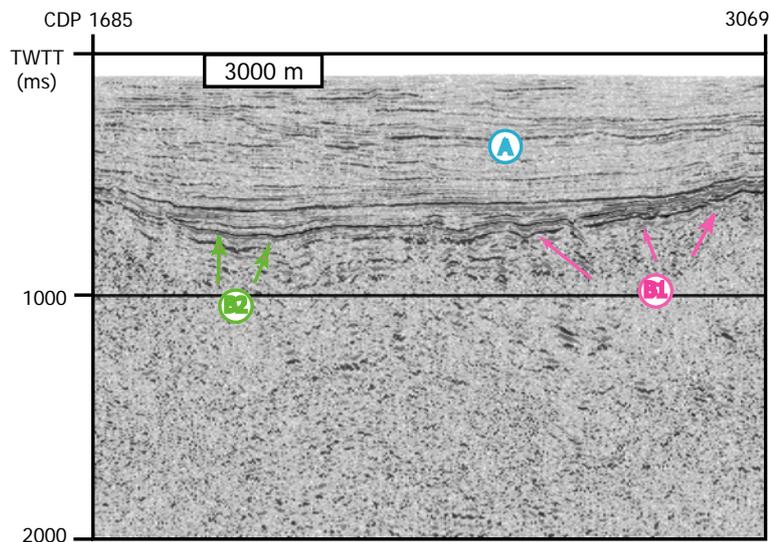


Figura 26. Vista en detalle de reflectores en zonas superficiales. Sección migrada en tiempo del perfil Chicx-17.B. La zona A se conforma de un paquete de reflectores subhorizontales de alta frecuencia, la base de estos reflectores se señala con flechas y se identifica con la letra B. El eje vertical es doble tiempo de viaje en milisegundos, y el eje horizontal muestra CDP. La escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal.

#### IV. II. INTERPRETACIÓN DE ESTRUCTURAS.

La interpretación de las estructuras del cráter de Chicxulub, se basa en información de perfiles migrados en tiempo tanto del experimento sísmico de 2005 como de 1996. Es prudente hacer notar que en el caso de los cuatro perfiles de la campaña de 1996, solamente se reinterpretó la información empatándola con los nuevos datos adquiridos en 2005; esto significa que la interpretación de las características del cráter se sustenta en un total de 33 secciones sísmicas.

Para interpretar la información se empleó el paquete GeoViz que es uno de los módulos del software GeoFrame desarrollado por Paradigm. Este programa permite definir horizontes de interés seleccionándolos manualmente en la pantalla de la computadora. Las interpretaciones fueron realizadas enteramente sobre el conjunto de 33 perfiles pero para efectos prácticos, sólo se mostrarán algunas líneas cuyas diferentes orientaciones permiten formar una imagen general de las estructuras del cráter en 2D.

Las Figuras 27 Y 28 son dos secciones sísmicas que atraviesan la estructura del cráter en dirección WSW-ENE, en ellas se muestra una perspectiva general de la interpretación de los diferentes grupos de reflectores mostrados en las Figuras 24-26 hasta los 7000 ms. Para facilitar el entendimiento de la compleja estructura del cráter de Chicxulub, se describirá en primera instancia, la interpretación de las estructuras al exterior de la cuenca de impacto, seguida de las estructuras al interior, para posteriormente estudiar con detalle los reflectores que definen al *peak ring* de este cráter.

##### IV.II.1. ESTRUCTURAS EXTERIORES.

La discontinuidad de los grupos de reflectores de la zona E en la Figura 24, se interpreta como tres estructuras anulares limitantes y exteriores a la cuenca de impacto del cráter de Chicxulub, como fueron descritas por Gulick et al., [2006]. En los perfiles Chicx-A0 y Chicx-A1 (Figuras 27 y 28 respectivamente) el anillo más exterior, referido como *exterior ring*, se define por una zona de fallas entre los ~5,700-7,700 *CMP* a una distancia radial del centro del cráter de ~124 km, y entre los ~ 12700-13700 *CMP* a una distancia de 105 km correspondientemente. La segunda zona de fallas relacionada al *outer ring*, se localiza a ~102 km del centro del cráter alrededor del *CMP* 9700 en la sección Chicx-A0, mientras que en el perfil Chicx-A1 se ubica a aproximadamente 95 km alrededor del *CMP* 11,000. El tercer anillo o *inner ring* se puede mapear a una distancia respectiva de 80 km y 76 km desde el centro del cráter en estos mismos perfiles. En la línea Chicx-R3 (Figura 29), que atraviesa el cráter en dirección NW-SE, la zona de fallas relacionadas al *inner ring* se interpretó alrededor del *CMP* 3,400 a una distancia del centro del cráter de ~ 72 km.

Las tres zonas de fallas que definen las estructuras de *exterior ring*, *outer ring* e *inner ring* sugieren deformación hasta 7000 ms conforme lo propuesto por Gulick et al., [2006]. Aunque estas estructuras anulares no tienen una expresión en superficie, debido a la inaccesibilidad de la porción del cráter que se ubica bajo un tirante de agua en el Golfo de México y los depósitos sedimentarios que yacen sobre el, la presencia de estas zonas de fallas se observa también en otros tres perfiles sísmicos que cruzan la estructura del cráter transversalmente (Chicx R1, R7, y B).

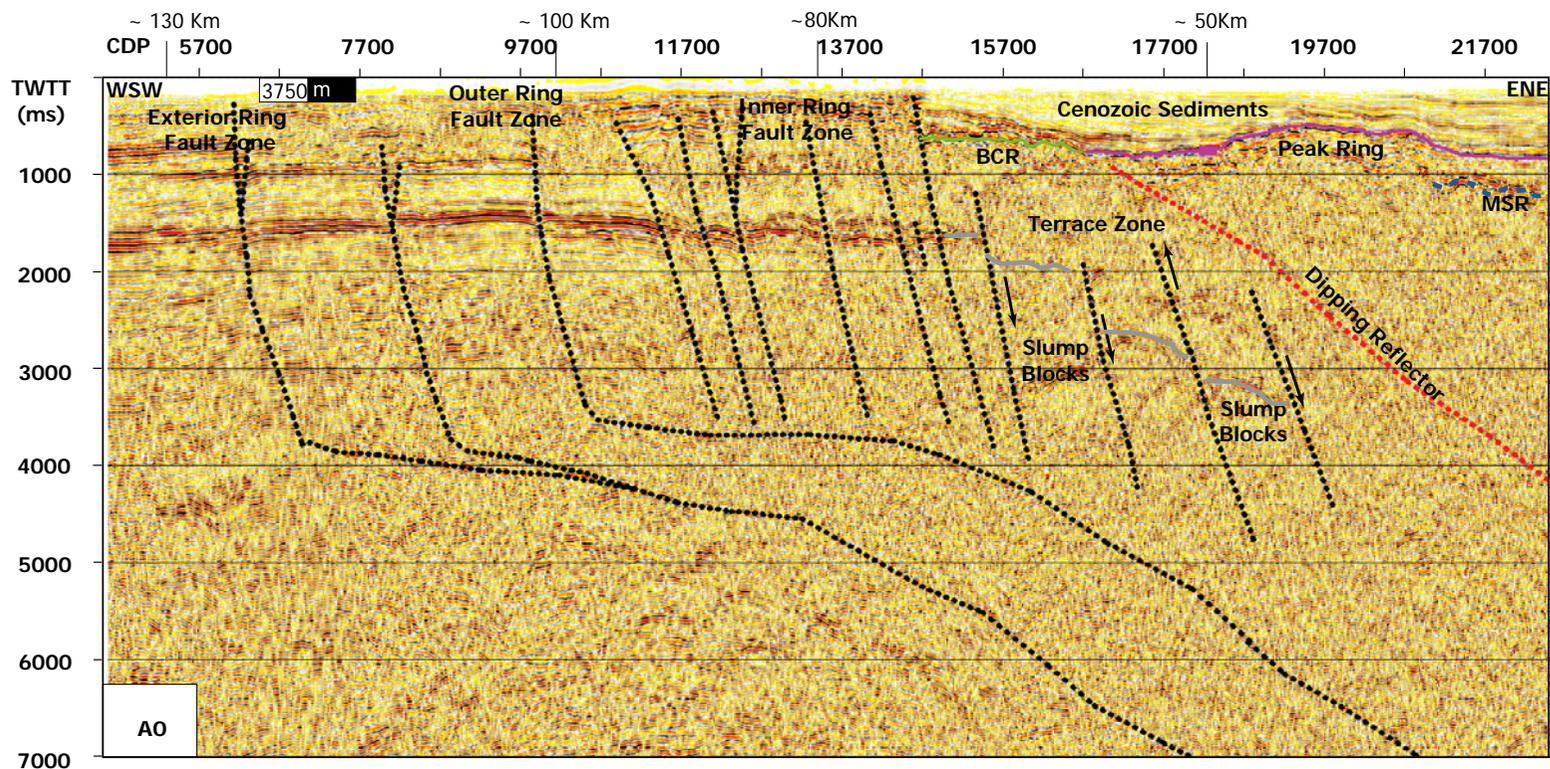


Figura 27. Estructuras reinterpretadas sobre la sección sísmica A0. Perfil migrado en tiempo de la prospección de 1996. Las fallas asociadas a las estructuras del *inner ring*, *outer ring* y *exterior ring* [Gulick et al., 2006] ubicadas a distancias radiales mayores a 60 Km se dibujan con un líneas punteadas negras. La línea gris indica la superficie de los *slump blocks* que caen hacia el centro del cráter (ENE) y se encuentran delimitados a ambos lados por fallas representadas por líneas discontinuas negras. Las flechas indican el sentido sugerido de desplazamiento de los *slump blocks*. El horizonte sísmico morado representa el *peak ring* (PR) mientras que el verde es el *base of Cenozoic reflector* (BCR). Los depósitos posteriores al impacto (*Cenozoic sediments*) sobreyacen al PR y BCR por encima de 1000 ms doble tiempo de viaje. La línea punteada en color rojo es el *dipping reflector* [Gulick et al., 2006] que coincide con el extremo exterior del *peak ring*. MSR es un reflector relacionado posiblemente con el *melt sheet* [Morgan et al., 2000]. Las distancias aproximadas que se muestran en la parte superior de la figura toman como referencia el centro del cráter. La escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal y el eje vertical es doble tiempo de viaje en ms.

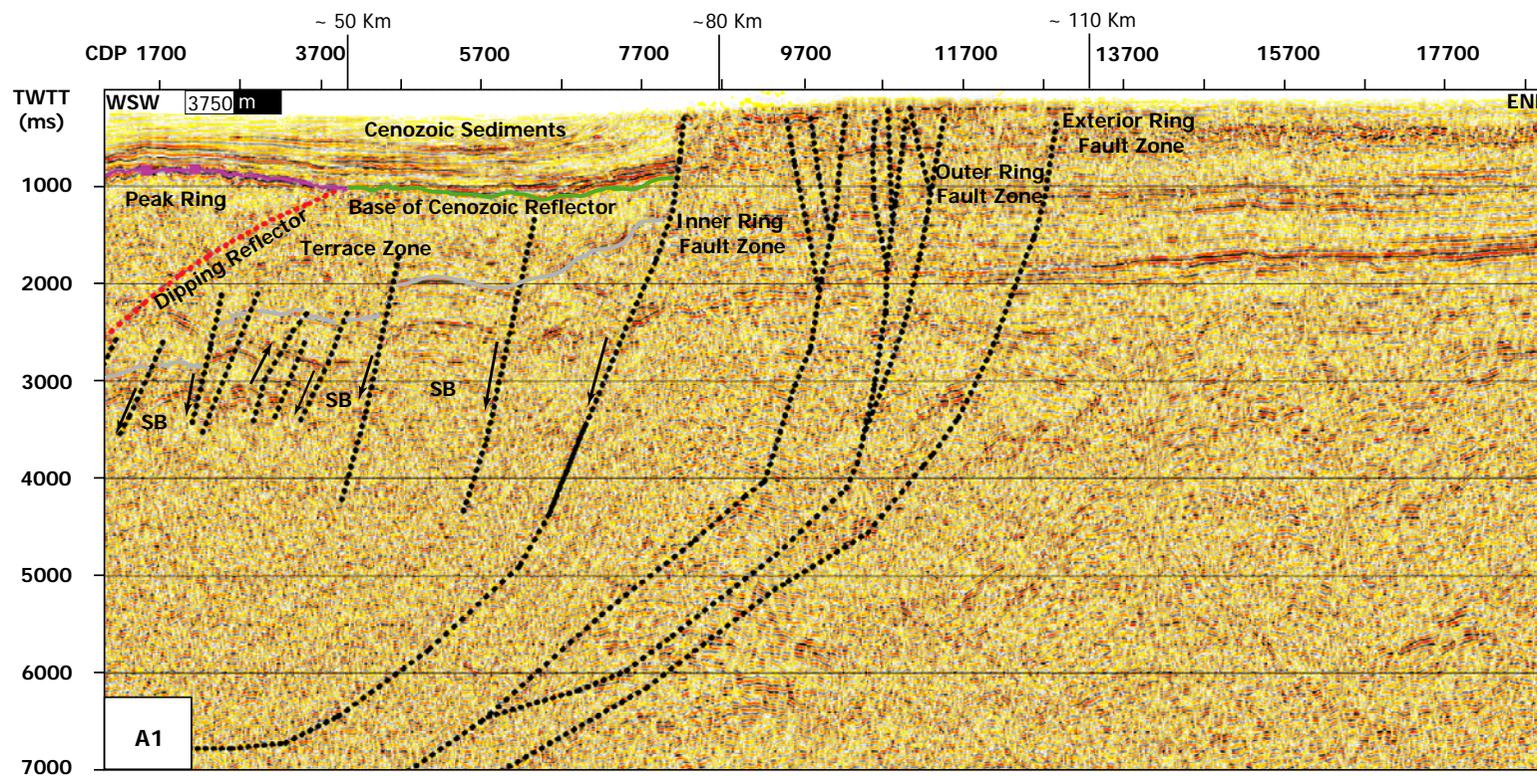


Figura 28. Estructuras reinterpretadas sobre la sección sísmica A1. Perfil migrado en tiempo del experimento sísmico de 1996 orientado WSW- ENE. La escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal. Los *slump blocks* (SB) se representan por la línea gris. Las fallas asociadas a las estructuras del *inner ring*, *outer ring* y *exterior ring* son líneas negras discontinuas [Gulick et al., 2006]. El horizonte morado representa el *peak ring* delimitado en su parte exterior por un reflector inclinado (*dipping reflector*) representado por la línea punteada en color rojo [Gulick et al., 2006]. El reflector señalado con color verde es el *base of Cenozoic reflector* y sobre estos se definen los depósitos posteriores al *impacto* (*Cenozoic Sediments*). Las flechas indican el sentido sugerido de desplazamiento de los *slump blocks*. Las distancias aproximadas que se muestran en la parte superior de la figura toman como referencia el centro del cráter. El eje vertical es doble tiempo de viaje en ms.

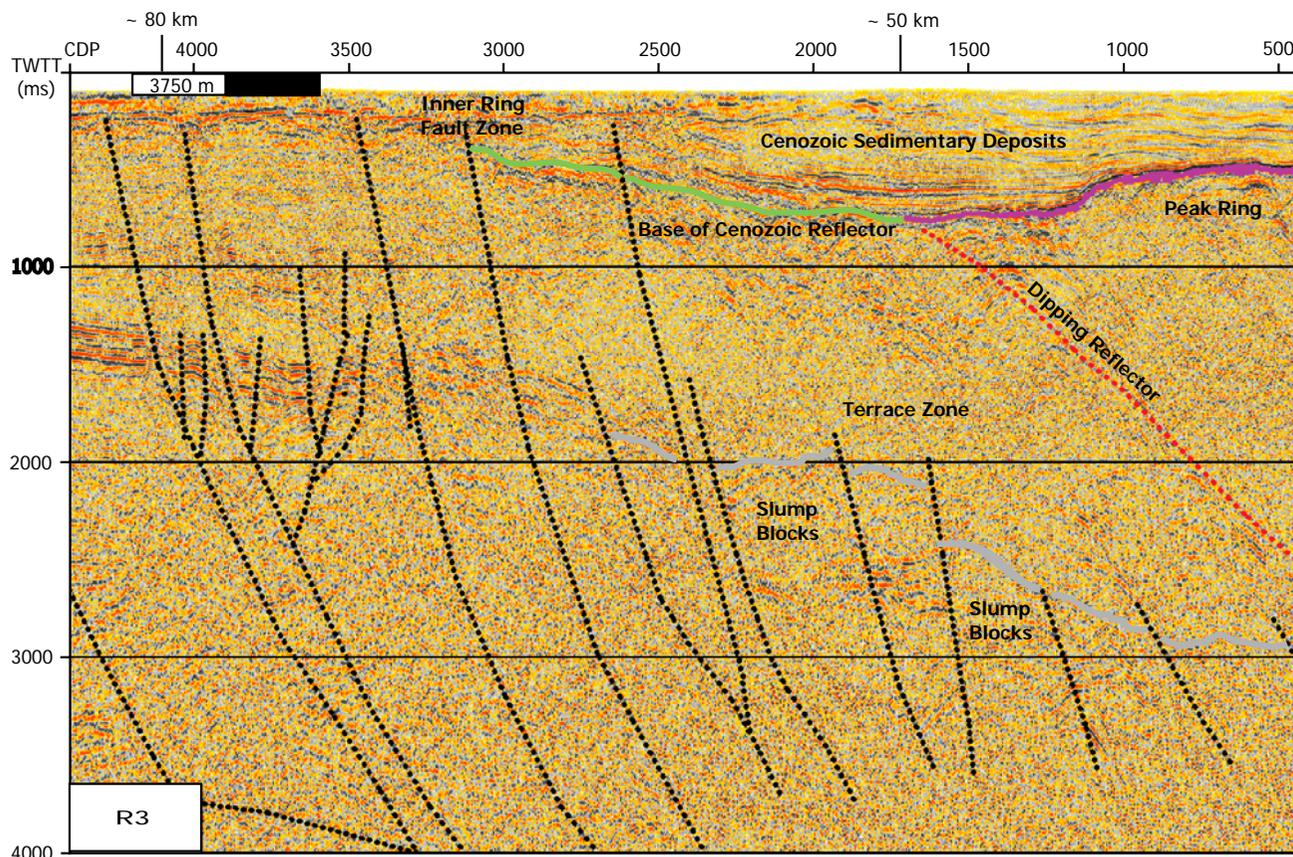


Figura 29. Estructuras interpretadas sobre la sección sísmica radial Chicx-R3. Perfil migrado en tiempo. Las líneas punteadas negras representan zonas de fallas asociadas al *inner ring* [Gulick et al., 2006] hacia el exterior de la cuenca (NW) y a los *slump blocks* hacia en interior de la misma (SE). El horizonte morado representa el *peak ring* (PR) mientras que el verde es el *base of Cenozoic reflector* (BCR), sobreyaciendo a estas estructuras se observan depósitos sedimentarios posteriores al *impacto* (*Cenozoic sedimentary deposits*). La frontera natural entre el *peak ring* y el *base of Cenozoic reflector* la marca el *dipping reflector* señalado con una línea discontinua roja [Gulick et al., 2006]. Las distancias aproximadas que se muestran en la parte superior de la figura toman como referencia el centro del cráter y la escala gráfica es una aproximación de la distancia en el eje horizontal. El eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en ms.

IV.II.2. ESTRUCTURAS INTERIORES.

Hacia el interior de la cuenca de impacto el reflector discontinuo de la zona D (Figuras 24 y 25) dibuja una serie de escalones entre ~17,00-3,300 ms que definen las estructuras de *slump blocks*. La zona de terrazas (*terrace zone*) que en conjunto conforman estos bloques, se mapeó a distancias entre 35 km y 75 km a partir del centro del cráter.

El tamaño de los *slump blocks* queda definido por las fallas que los limitan a ambos (interpretadas por Gulick et al., 2006) y es menor hacia el centro del cráter, siendo de ~ 4 km en promedio para los bloques de la línea R3 (Figura 29), ~ 6 km en la línea B (Figura 30), ~ 5.8 km en la porción oeste del segmento A0-A1 y 4.8 km en la parte este del mismo (Figuras 27 y 28). Aunque el promedio de la longitud de los *slump blocks* es similar en la porción NW y NE del cráter la diferencia entre los valores máximos encontrados en los perfiles B y A1 correspondientemente, llega a ser de ~ 1000 m; a su vez la pendiente de la zona de terrazas que conforman, es más pronunciada en la parte noroeste de la cuenca de impacto en el perfil B (Figura 30).

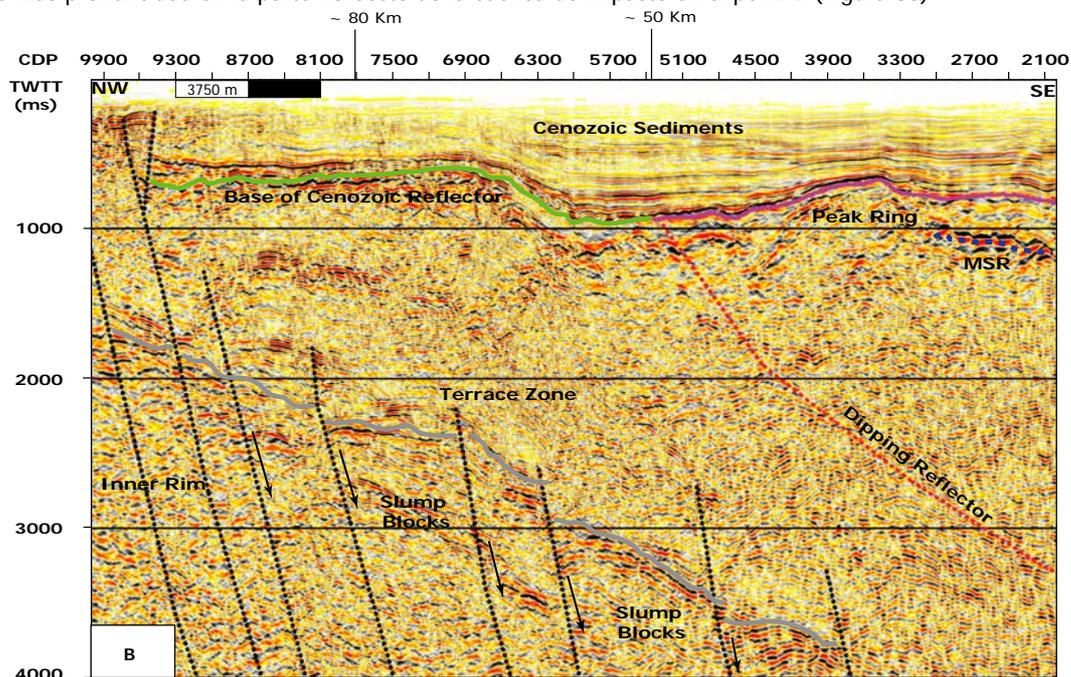


Figura 30. Estructuras interiores al borde del cráter de Chicxulub. Reinterpretaciones sobre el perfil radial Chicx-B. Los *slump blocks* quedan definidos por el reflector escalonado de color gris y delimitados por fallas que son representadas con una línea discontinua negra. La línea azul punteada define al reflector MSR (*melt sheet reflector*) por debajo del *peak ring* (línea morada) que continua hacia el borde de la cavidad como el *base of Cenozoic reflector* (línea verde). El *dipping reflector* [Gulick et al., 2006] está señalado con la línea inclinada discontinua de color rojo y los depósitos post impacto (*Cenozoic sediments*) son los reflectores por encima del *peak ring*. La escala gráfica es una aproximación de la longitud en el eje horizontal. Las distancias mostradas en la parte superior se refieren al centro del cráter y las flechas indican el sentido de desplazamiento de los *slump blocks*. El eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en ms.

En promedio se pueden observar 5-10 *slump blocks* en los perfiles sísmicos, siendo el bloque más cercano al centro del cráter el que subyace a los reflectores de las zonas C y B1, interpretados como *dipping reflector* [Gulick et al., 2006] y *peak ring (PR)* respectivamente. La extensión de este último reflector hacia la zona B2, en dirección al borde de la cuenca, conforma el piso del cráter o *base of Cenozoic reflector (BCR)*.

Usando una velocidad de 2,500 ms<sup>-1</sup> calculada por Barton et al., [2006], se determinó que la profundidad del *base of Cenozoic reflector* en el límite con el *peak ring*, es menor en la porción NW del cráter y mínima en la línea Chicx R3 donde el horizonte que lo define se ubica a ~ 960 m, y que aumenta hacia el centro de la cuenca de impacto hasta el perfil Chicx-R7 en el que se mapea a ~ 1,500 m, pero que disminuye nuevamente

en la porción este de la cuenca sobre las líneas C y A, siendo excepcionalmente máxima en el perfil Chicx-R1 donde el reflector se ubica a ~ 1,400 m.

Tanto el *peak ring* como el *base of Cenozoic reflector* conforman una frontera natural entre la litología de impacto, la litología del área del choque antes del impacto y los depósitos que ocurrieron después del mismo, de tal forma que los reflectores de la zona A que les sobreyacen, son interpretados como depósitos sedimentarios del Cenozoico (*Cenozoic sediments*).

La presencia de un reflector que yace por debajo del *peak ring*, aproximadamente a 1,100-1,400 ms (DTV) en las Figuras 39 y 42 se identifica como un reflector que define posiblemente al *melt sheet (MSR)*.

#### IV. II.2.1. EL PEAK RING DEL CRÁTER DE CHICXULUB EN 2D.

Con base en el análisis del reflector sísmico que define al *peak ring* registrado en un total de 27 perfiles del conjunto de datos, y empleando una velocidad de  $2,500 \text{ ms}^{-1}$  [Barton et al., 2006], se estableció que la profundidad máxima y mínima a la cuál se puede mapear esta estructura es de ~ 1,430 m y ~ 625 m respectivamente.

Por otro lado la elevación máxima del *peak ring* sobre el *base of Cenozoic reflector* en ocho perfiles que cruzan la estructura del cráter (A0, R3, B, R7, C, R1 y A1) es en promedio de ~ 385 m. Sin embargo hay que tomar en cuenta que este parámetro varía aumentando en sentido horario desde el NW (perfiles A0, Figura 27; y línea Chicx-R3, Figura 29) del cráter hasta su porción central (Sección Chicx-R7, Figura 31), y disminuye nuevamente en el sector NE de la cuenca de impacto (perfiles C; Chicx-R1, Figura 32; y A1, Figura 28). La diferencia entre la máxima y la mínima elevación del *peak ring*, en la porción prospectada con los perfiles transversales, llega a ser de ~ 100 m (Tabla 3).

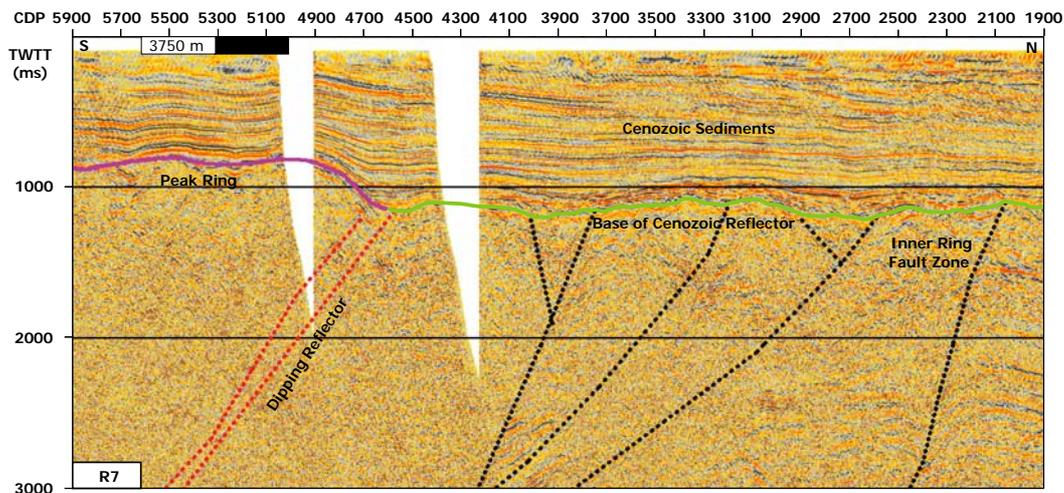


Figura 31. Elevación topográfica del *peak ring* sobre el *base of Cenozoic reflector*. Perfil transversal Chicx- R7 migrado en tiempo. La elevación topográfica del *peak ring* es el horizonte de color morado que limita hacia el N con el *dipping reflector* indicado con líneas punteadas rojas [Gulick et al., 2006]. El *BCR* representado por el horizonte en color verde se define entre el *dipping reflector* y el *inner ring*. Los depósitos posteriores al impacto o *Cenozoic sediments (CS)* sobreyacen tanto al *PR* como al *BCR*. La escala gráfica es sólo una aproximación de la longitud en el eje horizontal. EL eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en ms.

Perfil	Elevación del <i>peak ring</i> sobre el <i>base of Cenozoic reflector</i> (m)	Material emplazado entre el <i>peak ring</i> y el <i>dipping reflector</i> (m)
A0	375.697	4809.612
ChixR3	395.905	5026.393
B	426.018	5147.335
ChixR7	465.921	4018.49
C	236.102	4705.574
ChixR1	422.393	3786.912
A1	370.952	3687.753

Tabla 3. Características del *peak ring* en perfiles transversales.

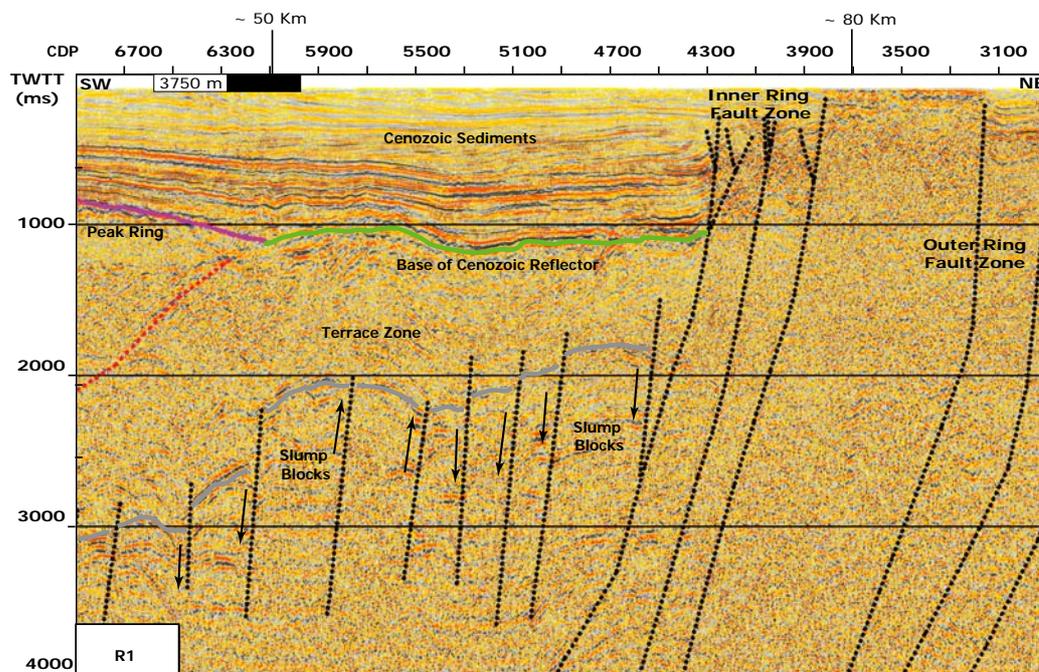


Figura 32. *Peak ring* y *base of Cenozoic reflector* en el perfil R1. El *peak ring* es el horizonte color morado limitado hacia el NE por el *dipping reflector* señalado con una línea punteada roja [Gulick et al., 2006]. La línea verde representa el piso del cráter (BCR). Los depósitos posteriores al impacto sobreyacen al *peak ring* y al *base of Cenozoic reflector* y se identifican como *Cenozoic sediments*. Se observan también las zonas de fallas del *inner* y el *outer ring* indicadas con líneas negras punteadas. La escala gráfica es una aproximación de longitud en el eje horizontal. Las flechas sugieren el sentido de desplazamiento de los *slump blocks*.

El mapeo del *peak ring* sobre todo el conjunto de datos, indica que su extensión promedio medida a partir del centro del cráter es de ~ 52 km. Es necesario considerar este resultado con cautela puesto que la distancia más próxima al centro del Chicxulub a la que se prospectaron las líneas de reflexión sísmica fue ~ 20 km, sin embargo es posible decir, mediante la observación de la tendencia del reflector que define al *peak ring* hacia el interior del borde de la cuenca de impacto, que este pareciera continuar al menos algunos kilómetros más en esa dirección.



rayos se representan en coloraciones cálidas que equivalen aproximadamente a 800–1,150 ms; esta diferencia en rangos indica que la superficie del *peak ring* se ubica a mayor profundidad en la porción NE como fue expuesto en la sección anterior.

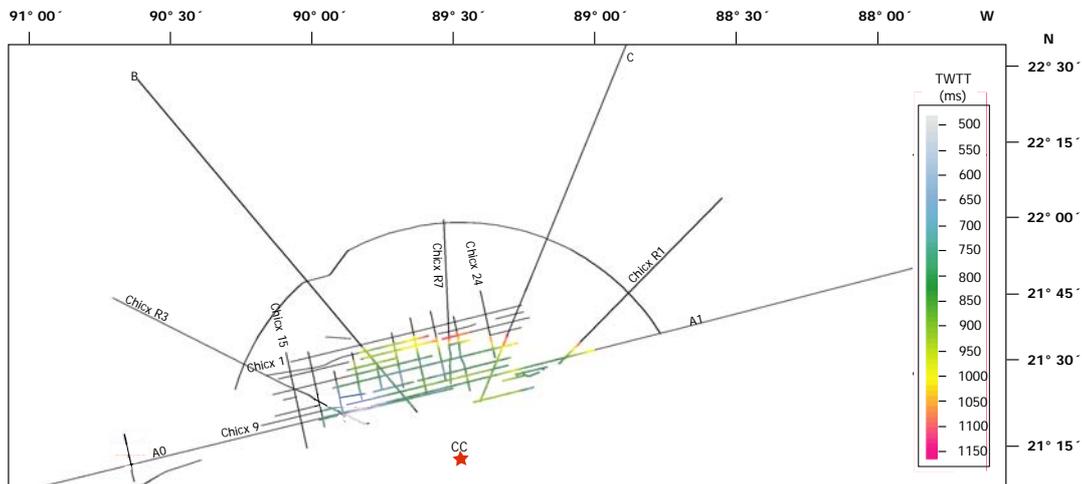


Figura 34. Vista en planta de la interpretación de la estructura del *peak ring* sobre perfiles sísmicos del conjunto de datos de 2005 y la reinterpretación sobre líneas prospectadas durante 1996. La estrella en color rojo indica el centro del cráter (CC). La escala de colores indica el doble tiempo de viaje en ms.

Utilizando el programa GeoViz fue posible visualizar las interpretaciones sobre los perfiles bidimensionales en un ambiente tridimensional y construir una superficie 3D del *peak ring*. En la Figura 35 se muestran apreciar algunas de las estructuras que definen la geometría del cráter interpretadas sobre dos de las secciones sísmicas de la prospección de 2005 sobre el cráter de Chicxulub; una línea radial (Chicx -R3) que otorga la perspectiva necesaria para visualizar el ancho del *peak ring* y en la que se puede identificar también el horizonte que define al *base of Cenozoic reflector* hacia la parte exterior de la cuenca y algunas fallas que se relacionan con los anillos del cráter; y otro perfil que mapea el cráter transversalmente (Chicx-9) en el que se puede constatar la longitud del *peak ring* en dirección WSW-ENE así como la presencia de los horizontes sísmicos interpretados como depósitos del Cenozoico que sobreyacen tanto al *peak ring* como al *base of Cenozoic reflector*.

La Figura 36 muestra otra perspectiva tridimensional desde el NE del *peak ring*, en ella se puede observar claramente que esta superficie está conformada por múltiples montículos que parecen estar dispuestos en una cadena que rodea simétricamente al centro del cráter al menos su porción marina. También es notorio que la elevación de los picos o montículos que conforman esta estructura anular están más próximos al fondo marino (representado por el marco en color azul) en la porción NW. Por otra parte, la superficie del *peak ring* pareciera ser más plana que el resto de la estructura en la porción de la extrema izquierda en la figura, sin embargo este falso aspecto se debe solamente a la baja densidad de datos en esa zona de los que dispone el programa empleado para la construcción de la superficie, ya que los perfiles 2D transversales Chicx- 5, 6, 8 y 9 que pudieran definir al *peak ring* entre los perfiles C, R1 y A1 son demasiado cortos en esa sección (ver Figura 34). A pesar de esta limitante se tiene que recordar que de acuerdo los análisis hechos, la tendencia de los perfiles sísmicos indica que el *peak ring* en esta porción debe de estar conformado por elevaciones topográficas sobre el piso del cráter que tal vez sólo difieran en los rangos de elevación propuestos para el resto del anillo.

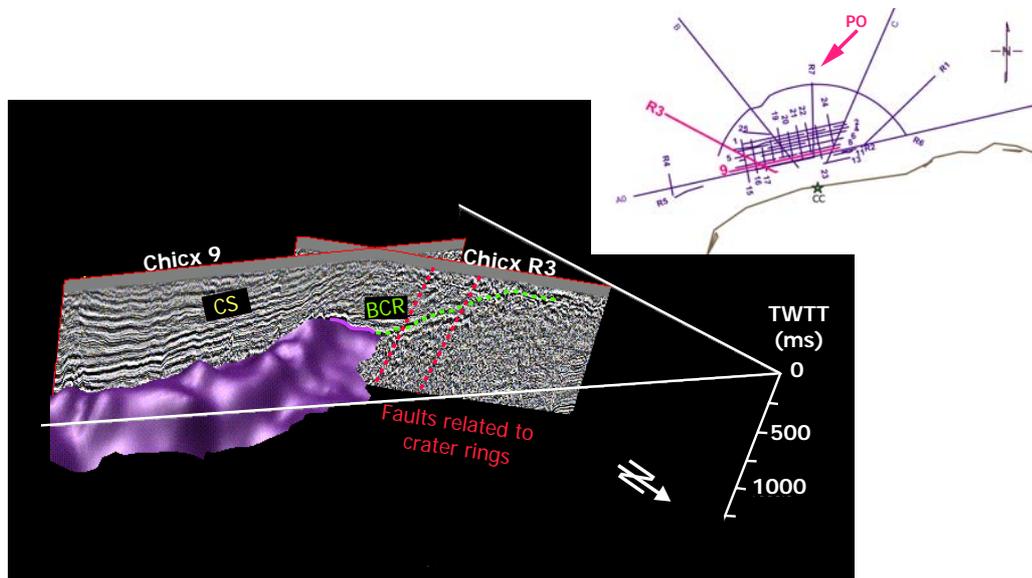


Figura 35. Imagen tridimensional del *peak ring* e interpretación de estructuras sobre perfiles sísmicos. La línea punteada verde representa al *base of Cenozoic reflector (BCR)* y *CS* son los depósitos sedimentarios del Cenozoico. Las líneas punteadas rojas son fallas relacionadas a los anillos. El eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en milisegundos. En el recuadro superior resaltan en color rosa los perfiles que atraviesan la superficie tridimensional en color morado del *peak ring*. PO indica la posición del observador y la flecha indica la dirección en la que se ve la superficie del *peak ring*.

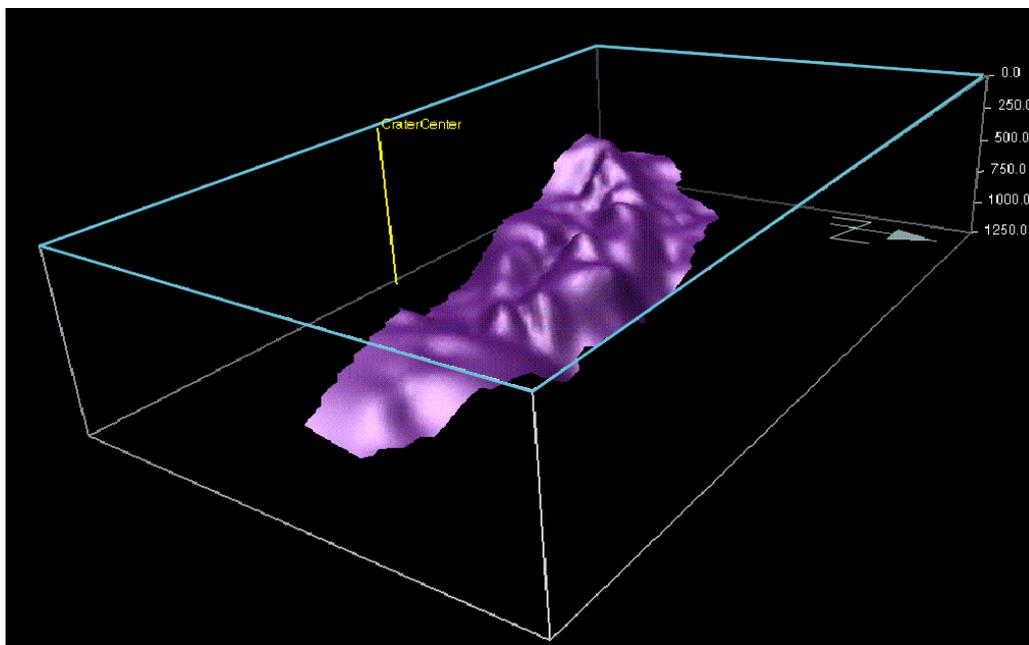


Figura 36. Perspectiva desde el NE de la superficie tridimensional del *peak ring*. La cadena de montículos y elevaciones de color morado es el *peak ring*. El rectángulo de borde azul en cero milisegundos indica el suelo del fondo marino. El centro del cráter se indica por la línea en color amarillo. La escala vertical muestra el doble tiempo de viaje en milisegundos.

## V. DISCUSIÓN

La interpretación de tres zonas de fallas limitantes y al exterior de la cuenca de impacto en las secciones sísmicas de este trabajo concuerdan, de manera general con la ubicación a partir del centro del cráter propuesta en trabajos anteriores [Morgan et al., 1997, Morgan y Warner, 1999, Morgan y Warner, 1999a, Morgan et al., 2002] para el *inner ring*, *outer ring* y *exterior ring*, situando al Chicxulub como un cráter multianillado. El mapeo del *inner*, *outer* y *exterior rings* en los perfiles sísmicos empleados en este trabajo, constató la asimetría del cráter de impacto de Chicxulub propuesta por Morgan y Warner [1999a], haciendo explícita la posibilidad de que el proceso de formación en la cuenca de impacto haya ocurrido de manera diferencial entre las porciones NW y NE del cráter.

La formación asimétrica del cráter de Chicxulub se evidencia también al observar las estructuras de *slump blocks*; la zona de terrazas que conforman en conjunto, presenta una pendiente más pronunciada en la porción NW del cráter en conformidad con lo propuesto por McDonald et al., [2006] y la longitud promedio de los *slump blocks* es mayor en esa misma porción, sin embargo la distancia del *slump block* más cercano al centro del cráter respecto al *inner ring* es mayor en la porción NE.

En cuanto al *peak ring* se refiere, las características analizadas en esta tesis, indican también un proceso de emplazamiento asimétrico. Con anterioridad [Morgan et al., 1997] se había establecido una diferencia marcada en la elevación del *peak ring* sobre el *base of Cenozoic reflector* (piso del cráter), entre la porción NW y NE del cráter. Los resultados y la interpretación de esta estructura presentados, muestran que si bien hay una diferencia en la topografía del *peak ring*, los valores aquí propuestos discrepan en el orden de 25-175 m para la porción NW y 30-120 m para la NE respecto a los sugeridos por otros autores.

Además, la extensión del *peak ring*, tanto en dirección hacia el borde de la cuenca del impacto como hacia el centro del cráter es mayor en al menos un par de decenas a lo establecido por Morgan et al., [2000]; y Morgan et al., [2002], lo que implica que longitud total del *peak ring* es mayor establecido previamente.

Los resultados de interpretar esta estructura en 27 de los perfiles sísmicos que conforman el conjunto de datos de esta tesis, muestran que la extensión máxima del *peak ring* en dirección hacia el borde del cráter es al menos de 52 km. Por otra parte la distancia a partir del *inner ring* a la que se mapea el *peak ring*, que no había sido determinada con anterioridad, indican que esta estructura se emplazó asimétricamente en el interior de la cuenca de impacto ya que se ubica más próxima al borde del cráter en la porción NW del cráter comparativamente con la porción NE.

Los modelos de formación del *peak ring* [Melosh, Deutsch et al., 1995; y Collins et al., 2002], sugieren la interacción de diferentes regímenes de esfuerzos estrechamente relacionados temporal y espacialmente. Los resultados de la interpretación de las estructuras al interior del cráter de Chicxulub, corroboran la existencia de zonas de fallas que limitan las estructuras de *slump blocks* en la zona de terrazas, mismas que validan la existencia de un régimen frágil. A su vez, la ausencia de fallas al interior de la estructura del *peak ring* es un indicativo de que el material que lo conforma se comportó de manera dúctil o similar a un fluido durante su emplazamiento sobre la zona de terrazas. Si bien el material que pudiera cumplir con estas expectativas es el que proviene del levantamiento central como ha sido propuesto, el análisis de velocidades con base en datos de refracción sísmica en la parte central del cráter [Christeson et al., 1999] y en la porción debajo del *peak ring* [Surendra et al., 2006], indican que las velocidades de la litología que conforma al *peak ring*, son menores a las esperadas para material de alta densidad proveniente de capas muy profundas por acción del levantamiento central; a pesar de ello es posible que este sea el elemento principal de una mezcla con influencia de litología de menor densidad que se adhiere al flujo conforme el material proveniente del basamento atraviesa las capas del subsuelo en su paso hacia la superficie y que además interactuó con los *slump blocks* que igualmente hayan sido arrastrados por esta corriente como se muestra en el esquema de la **Figura 37**.

Aunque esta hipótesis puede explicar el origen del material del *peak ring*, la morfología de esta estructura anular no puede ser entendida sin aludir a la conducta especial de la combinación del material del cual se conforma; Melosh e Ivanov [1999] sugirieron un comportamiento tipo fluido de esta mezcla que se mueve largas distancias horizontales, como resultado de la oscilación vertical de bloques de rocas o partículas dentro de su masa; este fenómeno fue primeramente descrito por Melosh en 1973 y se conoce como *acoustic fluidization* [Melosh e Ivanov, 1999].

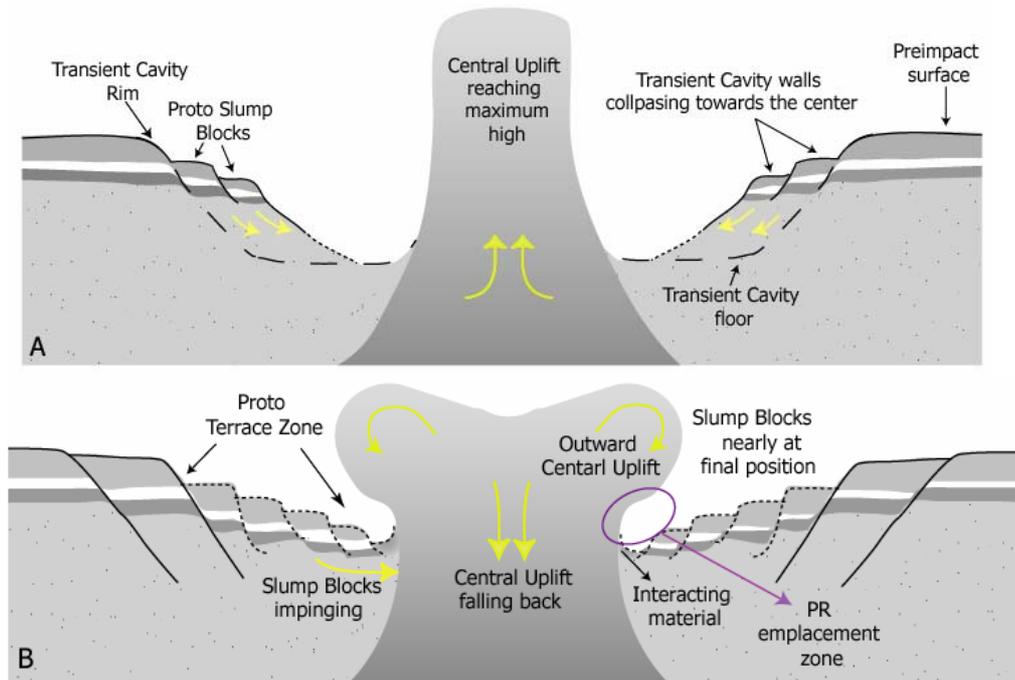


Figura 37. Representación del mecanismo de formación de la estructura de *peak ring*. Los esfuerzos del material que se derrumba por efectos gravitacionales hacia el centro de la cavidad transitoria (indicado con las flechas en color negro) conformarán la zona de terrazas en el cráter final y comprimen el material en ascenso proveniente del levantamiento central que se combina con la litología de capas que atraviesa en su paso hacia la superficie de la cavidad transitoria. Después de alcanzar la elevación máxima, la columna de esta mezcla se desploma hacia la parte exterior de la cuenca viajando sobre la zona de terrazas en formación más cercana al centro del cráter. PR: *peak ring*.

Otro de los aspectos que fue posible constatar es que el *slump block* más interno o ubicado más cercano del centro del cráter siempre subyace al *peak ring* como ya había sido señalado anteriormente [Morgan y Warner, 1999a]. Esta relación geométrica implica en términos temporales, que la zona de terrazas fue emplazada en el interior del cráter en formaciones instantes antes que el *peak ring* como se muestra en la Figura 37B.

El material que conforma al *peak ring* se emplaza sobreyaciendo a los *slump blocks* pero limitado por una frontera natural identificada por primera vez como *dipping reflector* por Morgan et al., [1997]. El *dipping reflector* se bosqueja como reflexiones inclinadas que se originan en el límite entre el *peak ring reflector* y el *base of Cenozoic reflector* tanto en las líneas transversales prospectadas sobre el cráter como en las que atraviesan su estructura longitudinalmente en los perfiles presentados en la sección de resultados.

Todos los aspectos del cráter discutidos con anterioridad, conducen a proponer que la geometría final del Chicxulub es muy parecida a la Figura 38. En esta imagen se puede observar, además de las estructuras anulares de *inner ring*, *outer ring* y *exterior ring*; que el *peak ring* se extiende desde el centro del cráter sobreyaciendo al *slump block* más interior hasta ~ 52 km y que la distancia mínima a la cual se le podría mapear es ~ 20 km (referida al centro del cráter). Si esta configuración es cierta el reflector MSR (*melt sheet reflector*) encontrado en algunos de los perfiles, podría corresponder a la superficie del *impact melt sheet* en concordancia con la figura.

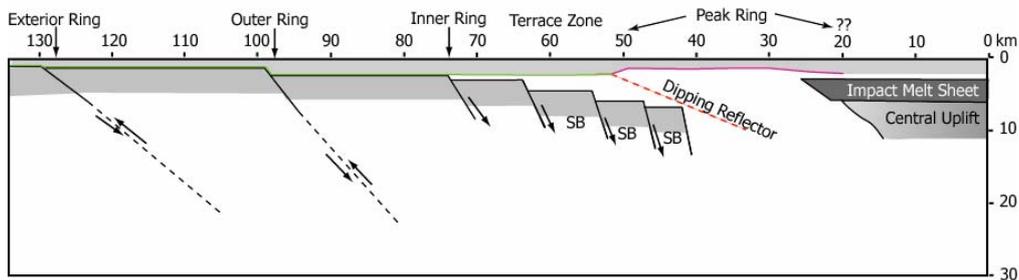


Figura 38. Geometría final del cráter de Chicxulub. El *peak ring* está señalado con la línea de color rosa y el base of *Cenozoic reflector* se indica con la línea verde. El *dipping reflector* es la línea punteada roja. Las distancias en la parte superior indican el radio aproximado respecto al centro del cráter en km. Las flechas indican la dirección de desplazamiento. SB: *Slump blocks*. [Modificado de Morgan et al., 2000].

Estos análisis en conjunto, conducen a proponer que las asimetrías encontradas entre las porciones NW y NE del cráter pueden ser el resultado de tres diferentes causas relacionadas al proceso de formación del *peak ring*:

- Colapso del *central uplift* en una dirección preferencial (en este caso hacia el noroeste) que no está necesariamente relacionada al ángulo de impacto, lo que induce que más cantidad de material se emplace sobre los *slump blocks* provocando a su vez mayor altura del *peak ring* e inclinación de la superficie de la zona de terrazas en esa misma zona.
- Desplazamiento del *central uplift* hacia alguno de los bordes de la cavidad transitoria lo que causaría la formación asimétrica de todas las estructuras del cráter.
- Heterogeneidades de la zona del impacto antes de la colisión del bólido, lo que implicaría que la morfología de la Península de Yucatán gobernó por completo la geometría final del cráter de Chicxulub.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados obtenidos sobre dos conjuntos de datos prospectados sobre la porción marina del cráter de Chicxulub; el procesamiento y el análisis de 23 perfiles de reflexión sísmica adquiridos durante los primeros meses de 2005 y la reinterpretación de 4 secciones del experimento sísmico de 1996.

Los cambios en la velocidad de las ondas acústicas registrados en ambos conjuntos de datos, como horizontes de diferentes características, permitieron precisar dos zonas principales de fallas en la parte exterior de la cuenca de impacto relacionadas con el *exterior ring* aproximadamente a 120-140 km de distancia del centro del cráter, y al *outer ring* a una distancia de ~ 90-130 km, además de una zona de fallas asociada al *inner ring* a ~ 80 km.

En la parte interior de la cuenca se pudo identificar un paquete de depósitos sedimentarios del Cenozoico (*Cenozoic sediments*) en la porción más cercana a la superficie del fondo marino cuyo espesor se calculó en 600-1400 m; subyaciendo a estos, un horizonte continuo permitió corroborar la existencia de la estructura *peak ring* que sobreyace a su vez a la zona de terrazas conformada por 5-10 *slump blocks* cuyas características varían en diferentes secciones del cráter presentando una pendiente más pronunciada en la porción noroeste de la cuenca. También se detectó un horizonte sísmico denominado *melt sheet reflector* asociado posiblemente con el *impact melt sheet*.

El *base of Cenozoic reflector* dibuja el piso del cráter desde el *inner ring* y se extiende hacia el interior de la cuenca de impacto en promedio 22 km, punto en el que una serie de reflectores esbozan al *dipping reflector* que se inclina hacia el centro del cráter; a partir de este límite el reflector continuo del *peak ring* se eleva sobre el piso del cráter y su longitud se mapea por al menos 22 km más en la misma dirección.

Debido a la densidad de datos en la que se basan los análisis de este trabajo, resulta más confiable aseverar que visto en planta y con base a la figura tridimensional construida del *peak ring* en esta tesis, este parece ser una estructura casi circular emplazada alrededor de un centro que está desplazado hacia el NW, al menos en su porción oceánica, mientras que tanto sus características como la relación que guarda con estructuras como los *slump blocks* y el *dipping reflector* difieren entre su porción noreste y noroeste tendiendo a cambiar en sentido horario. Estas asimetrías pueden ser causadas por el colapso en dirección preferencial o el deslizamiento del *central uplift* hacia el borde NW de la cuenca en formación o por heterogeneidades en la superficie previas al impacto.

Aunque la definición del tipo de material que conforma al *peak ring* así como la dirección y ángulo de impacto quedan fuera de los objetivos de esta tesis, los resultados presentados deben de ser tomados en cuenta para construir futuros modelos del proceso de formación del cráter de Chicxulub y estructuras como el *peak ring* en los que se consideren las importantes asimetrías encontradas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L. W., Azaro, F. y Michel, H. V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction, *Science*, N. 208, p. 1095-1108.
- Barton, P., Surendra, A., Masoomzadeh, H., Gulick, S., and Morgan, J., 2006, Structure of Chicxulub peak ring and shallow crater floor from new seismic data, *GSA Annual Meeting*, Paper 448.
- Bell, C., Morgan, J. V., Hampson, G. J., y Trudgill, B., 2004, Stratigraphic and sedimentological observations from seismic data across the Chicxulub impact basin., *Meteoritics and Planetary Science*, V. 39, p. 1089-1098.
- Brittan, J., Morgan, J., y Warner, M., 1999, Near-surface seismic expression of the Chicxulub impact crater., *Geological Society of America, Special Paper*, N. 39, p. 269-279.
- Campos-Enríquez, J., Chávez-García, H., Acosta-Chang, J. G., Matsui, T., Arzate, J. A., Unsworth, M. J., y López-Ramos, J., 2004, Shallow crustal structure of Chicxulub impact crater imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift., *Geophysics Journal International*, V. 157, p. 515-525.
- Christeson, G. L., Buffler, R. T., Nakamura, Y., 1999, Upper crustal structure of the Chicxulub impact crater from wide-angle ocean bottom seismograph data., *Geological Society of America Special Paper*, V. 339, p. 291-298.
- Collins, G. S., Melosh, J. H., Morgan, J. V., y Warner, M. R., 2002, Hydrocode simulations of Chicxulub crater collapse and peak-ring formation, *Icarus*, V. 157, p. 24-33.
- Deutsch, A., Grieve, R. A. F., Avermann, M., Bischoff, L., Brockmeyer, P., Buhl, D., Lakomy, R. Müller-Mohr, V., Ostermann, M., y Stöffler, D., 1995, The Sudbury structure (Ontario Canada): A tectonically deformed multi-ring impact basin, *Geologische Rundschau*, V. 84, p. 697-709.
- Espindola, J. M., Mena, M., de la Fuente y Campo-Enriquez, J. O., 1995, A model of the Chicxulub impact structure (Yucatan, Mexico) based on its gravity and magnetic signatures, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, V. 92, p. 271-278.
- French, B. M., 1998, Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. *LPI Contribution N. 954*, p. 120.
- Fontana, P., 2002, Airgun Arrays and Marine Mammals, International Association of Geophysical Contractors, p. 1-16.
- Grieve, R. A. F., Robertson P. B., y Dence M. R., 1981, Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data in Multi-Ring Basins: Formation and Evolution, *Proc. Lunar Planet. Sci.*, N. 12A, p. 37-57.
- Gulick, S., Christeson, G., Morgan, J., Warner, M., y Barton, P., 2006, Structure of the multi-ring Chicxulub impact crater: what fault patterns tell us about pre-existing structures, impact obliquity, and crater collapse structure, *European Space Agency, Abstracts of the First International Conference on Impact Cratering in the Solar System*.
- Hildebrand, A.R., Penfield, G.T., Pilkington, D.A., Camargo, A., Jacobsen, S.B., y Boyton, W.V., 1991, Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico., *Geology*, V.19, p. 867-87.
- Jones, E. J., 1999, Marine Geophysics, *John Willey & Sons*, London, 264 p.

- Kring, D., Hörz, F., Zurcher, L., y Urrutia-Fucugauchi, J.; 2004, Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico., *Meteoritic and Planetary Science*, V. 39, N. 6, p. 879-897.
- Mendoza-Cervantes, K., Gulick, S., McDonald, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Barton, P., y Christeson, G., 2006, 3D image of the Chicxulub crater peak ring based on 2-D seismic reflection profiles from R/V Maurice Ewing 2005 survey, *European Space Agency, Abstracts of the First International Conference on Impact Cratering in the Solar System*.
- McDonald, M., Gulick, S., Christeson, G., Mendoza-Cervantes, K., Barton, P. J and Gorney, D., 2006, Terrace zone structure of the Chicxulub impact crater, Mexico, *European Space Agency, Abstracts of the First International Conference on Impact Cratering in the Solar System*.
- Mann, P., and Burke, K., 1984, Neotectonics of the Caribbean, *Review of Geophysics and Space Physics*, V. 22, p. 309-362.
- Melosh, H. J., 1989, Impact cratering. A geologic process, *Clarendon Press*, Oxford, UK, 245 p.
- Melosh, H. J., 1997, Multi-ringed revelation, *Nature*, V. 390, p. 439-440.
- Melosh, H. J., e Ivanov, B. A., 1999, Impact crater collapse, *Annu. Rev. Planet. Sci.*, V. 27, p. 385-415.
- Morgan, J., Warner, M., Brittan, J., Buffler, R., Camargo, A., Christeson, G., Denton, P., Hildebrand, A., Hobbs, R., Macintyre, H., Mackenzie, G., Maguire, P., Marin, L., Nakamura, Y., Pilkington, M., Sharpton, V., Snyder, D., Suarez, G., y Trejo, A., 1997, Size and morphology of the Chicxulub impact crater, *Nature*, V. 390, p. 472-476.
- Morgan, J. y Warner M., 1999, Morphology of the Chicxulub impact: peak ring crater or multi-ring basin?, *Geological Society of America, Special Paper*, N. 339.
- Morgan, J. y Warner M., 1999a, Chicxulub: the third dimension of a multi-ring impact basin, *Geology*, V. 27, N. 5, p.407-410.
- Morgan, J., Warner, M. R., Collins, G. S., Melosh, H. J., Christeson, G. L., 2000, Peak-ring formation in large impact craters: geophysical constraints from Chicxulub, *Earth and Planetary Science Letters*, V. 183, p. 347-354.
- Morgan, J., Christeson, G. L., y Zelt, C. A., 2002, Testing resolution of a 3D velocity tomogram across the Chicxulub crater, *Tectonophysics*, V. 355, p. 215-226.
- Pearson, Z., Gulick, S., Whalen, M., 2006, Annealing the Chicxulub impact: tertiary Yucatan carbonate platform development and basin infilling, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, V.38, N. 7, p. 297.
- Penfield, G. T., y Camargo, Z. A., 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity, *Abstracts of the 51<sup>st</sup> Annual Meeting Society. of Exploration Geophysics*, V.1, p.37.
- Pilkington, M., Hildebrand, A. R., y Ortíz-Alemán, C., 1994, Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub crater, Mexico, *Journal of Geophysical Research*, V.99, p.13147-13462.
- Pindell, J., Kennan, L., y Barrett, S., 2000, Part 4: Putting it all together, *Geophysical Corner, AAPG, Explorer*.
- Pindell, J. y Kennan, L.; 2001, Kinematic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean, *GCSSEPM Foundation 21<sup>st</sup> Annual Research Conference Transactions, Petroleum Systems of Deep-Water Basins*, p. 193-220.
- Sedlock, R. L., Ortega, G. F., y Speed, R. C., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geological Society of America Special Paper*, N. 278.

Sharpton, V., Burke, K., Camargo-Zanoguera, A., Hall, S.A., Lee, D.S., Marin, L.E., Sufirez-Reynoso, G., Quezada-Mufieton, J., Spudis, P.D.G. and Urrutia-Fucugauchi, J., 1993, Chicxulub multiring impact basin. Size and other characteristics derived from gravity analysis, *Science*, V. 261, p. 1564-1567.

Smit, J., 1999, The Global Stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary Boundary Impact Ejecta, *Annual Reviews Earth Planet Sciences*, V. 27, p. 75-113.

Stöffler, D., Artemieva, N. A., Ivanov, B. A., Hecht, L., Kenkmann, T., Schmitt, R. F., Tagle, R. A., y Wittmann, A., 2004, Origin and emplacement of the impact formation at Chicxulub. Mexico as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling. *Meteoritics and Planetary Science*, V. 39, N. 7, p. 1035-1067.

Snyder, D. B., y Hobbs, R. W., 1999, Deep seismic reflection profiles across the Chicxulub crater, *Geological Society of America Special Paper*, V. 339, p. 263-268.

Snyder, D. B., y Hobbs, R. W., 1999, Ringed structural zones with deep roots formed by the Chicxulub impact, *Journal of Geophysical Research*, V. 104, p. 10743-10755.

Surendra, A., Barton, P., Morgan, J., Gulick, S., y Christeson, G., 2006, Tomographic imaging of the Chicxulub impact crater, *European Space Agency, Abstracts of the First International Conference on Impact Cratering in the Solar System*.

Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., y Trejo-García, A., 1996, UNAM Scientific drilling program of Chicxulub impact structure -Evidence for a 300 kilometer crater diameter. *Geophysical Research Letters*, V. 23, N. 23, p. 1565-1568.

Yilmaz Öz, 2001, Seismic data analysis. Processing, inversion, and interpretation of seismic data, *Society of Exploration Geophysics, Investigations in Geophysics*, V. I, N. 10, 100 p.

### **PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS**

Las páginas de internet consultadas para la elaboración de esta tesis, se muestran en el orden de aparición en el cuerpo del trabajo. En corchetes aparece la página en la que se hace alusión a ellas.

<http://imagers.gsfc.nasa.gov/adventure/MeteorCr.html>, [4]

[http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object\\_page/clm\\_usgs\\_14.html](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/html/object_page/clm_usgs_14.html) tycho crater [5]

<http://www.lpi.usra.edu>, [5]

[http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/hires/lo4\\_m187.gif](http://nssdc.gsfc.nasa.gov/imgcat/hires/lo4_m187.gif), [6]

[http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/phys\\_prin.html](http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/phys_prin.html), [11]

[http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/Airgun\\_array\\_directivity.pdf](http://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/oma/sss/Airgun_array_directivity.pdf), [12]

[ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB\\_Report\\_&\\_Appendices/Chicxulub%20Cruise](ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB_Report_&_Appendices/Chicxulub%20Cruise), [12, 48,50]

<http://www.semar.gob.mx/meteorologia/ESCALA%20BEAUFORT.html>, [47]

## APÉNDICE A GLOSARIO

El estudio de cráteres de impacto ha tenido mayor auge en los últimos años debido a que la tecnología con la que se cuenta actualmente hace posible acceder a lugares remotos y realizar estudios detallados. El estudio de cuencas de impacto como la de Chicxulub, sólo ha sido posible mediante la exploración con métodos geofísicos y programas de perforación. Considerando que de manera general las perforaciones y los métodos presentan costos altos, el caso del Chicxulub resulta ser aún más especial debido a que la mitad de su estructura yace bajo el Golfo de México en tanto que la otra porción permanece oculta bajo un paquete de depósitos sedimentarios de más de un kilómetro de grosor en la parte continental. Por estas razones, las investigaciones en este cráter han sido conducidas principalmente por países económicamente desarrollados y los resultados publicados en idioma inglés.

La complejidad de algunos de los términos relacionados con la morfología del cráter y con su proceso de formación, pueden provocar que la simple traducción al español de estos términos sea insuficiente para crear en el lector una idea clara del concepto que se pretende transmitir, por lo que en este trabajo de tesis, se decidió conservar vocablos como *peak ring*, *topographic peak ring*, *slump blocks*, etc., en su idioma original con el objetivo de no crear confusión, pero se provee al lector con este glosario en el que se define cada uno de estos conceptos y en el que a su vez podrán ser encontrados términos propuestos en español (en letras itálicas) que pueden facilitar, en algunos casos, la comprensión de este trabajo. Además se pretende clarificar el significado de algunas palabras de uso común en materia de sismica de reflexión. Es preciso mencionar que en algunos de los casos los vocablos referidos tienen validez únicamente cuando son aplicados al cráter de Chicxulub y que pueden cambiar de acuerdo a la definición de los autores que originalmente los presentó.

Es preciso hacer notar sin embargo, que algunos términos cuyas traducciones son muy obvias como, *terrace zone* (zona de terrazas), *bowl shaped* (con forma de tazón) y algunos otros, fueron usados indistintamente en el desarrollo de la tesis con la certeza de que el empleo de uno u otro no causa ningún conflicto en el lector. Por otra parte algunos de los términos en itálicas son palabras de uso difundido en la literatura actual.

AGC (Automatic Gain Control)	Operador de ganancia temporal que se aplica a la traza sísmica. Dependiendo del programa de procesamiento de datos empleado, se refiere a una constante.
Bowl shaped crater, <i>Cráter con forma de tazón</i>	Cráteres de tipo simple con forma de tazón.
Central peak crater, <i>Cráter de pico central</i>	Cráteres de tipo complejo que presentan una elevación topográfica al centro.
CDP (Common Depth Point)	Punto común del trazado de rayos en profundidad.
CMP (Common Mid Point)	Punto medio común del trazado de rayos.
Crater rim, <i>Borde del cráter</i>	Orilla de la cuenca del cráter que presenta una elevación respecto al nivel de la superficie antes del impacto.
Dipping reflector, <i>Reflector limitante</i>	Reflector sísmico que subyace al piso del cráter formando un ángulo respecto al mismo y que coincide con la parte externa de la elevación topográfica del anillo de picos.

---

Exterior ring zone, <i>Zona anular externa</i>	Es la zona de fallas relacionadas al impacto, ubicada en la porción más lejana a la cuenca del cráter y que corresponden al anillo más exterior de la estructura.
Fold	Cobertura o número de trazas por cada punto común del trazado de rayos en superficie o profundidad ( <i>CMP</i> o <i>CDP</i> ).
Guided waves	Ondas sísmicas que se generan en medios marinos poco profundos con capas de alto contraste de velocidad, lo que provoca que las ondas queden atrapadas y viajen.
Inner ring, <i>Anillo Interior</i>	Primera estructura anular al exterior de la cuenca del cráter de impacto.
Inner ring fault zone, <i>Zona anular interna</i>	Zona de fallas asociada a la primera estructura anular al exterior de la cuenca del cráter de impacto.
Multiring crater, <i>Cráter multianillado</i>	Cráter que presenta al menos dos estructuras anulares exteriores a la cuenca de impacto y un anillo de picos.
Offset, <i>Separación</i>	En materia de cráteres de impacto, es el distanciamiento entre un referente y una determinada estructura que pueden ser los anillos del cráter, la zona de terrazas, etc. En sismica de reflexión se refiere a la distancia entre la fuente y un último receptor del tendido.
Outer ring zone, <i>Zona anular lejana</i>	Se refiere a una zona de fallas relacionadas a una estructura anular alejada del centro del cráter una determinada distancia pero que no se define en la parte más externa del mismo.
Peak ring, <i>Anillo de picos, anillo montañoso</i>	Estructura al interior de la cuenca del cráter de impacto que puede presentarse tanto en cráteres de tipo complejo como en cráteres multianillados. Queda definido por una cadena de picos o montículos que se elevan sobre el piso del cráter y se emplazan alrededor del centro del mismo.
Peak ring crater, <i>Cráter tipo anillo de picos</i>	Este tipo de cráteres complejos presentan una estructura anular conformada por una secuencia montañosa al interior de la cuenca de impacto o anillo de picos.
Ring, <i>Anillo</i>	Estructura de forma anular que puede relacionarse con fallamiento y cuya manifestación en la superficie puede haber sido eliminada por efectos de la depositación, erosión o procesos tectónicos.
Slump blocks, <i>Bloques desplazados</i>	Bloques de grandes dimensiones limitados a los lados por fallas al interior de la cuenca de impacto y que inicialmente formaban parte de las paredes de la cavidad transitoria pero que se derrumbaron desplazándose hacia el centro del cráter debido a procesos extensivos e inestabilidad gravitatoria durante la etapa de modificación del cráter.
Scholte waves	Ondas elásticas generadas en una interfaz agua-medio sólido.

Terrace zone, <i>Zona de terrazas</i>	Zona conformada por bloques derrumbados (desplazados) de gran longitud.
Transient cavity, <i>Cavidad transitoria</i>	Cavidad de duración ínfima formada instantes después del impacto de un bólido sobre una superficie cuya morfología cambia por efectos de modificación.
TWTT (Two Way Travel Time)	Tiempo de viaje del rayo de la fuente hacia al receptor.

**APÉNDICE B**  
**UBICACIÓN DE POZOS**

La tabla en este apéndice muestra la ubicación en coordenadas geográficas de algunos de los pozos perforados en el área de impacto de Chicxulub a los cuáles se hace alusión en el capítulo de antecedentes para el estudio del cráter de Chicxulub.

Pozo	Longitud (°)	Latitud (°)
C1	-89.5283	21.125
S1	-89.3397	21.1428
Y6	-89.7547	20.8572
YAX-1	-89.7187	20.7438
T1	-89.5095	20.4107
U5	-89.6615	20.3385
U7	-89.2453	20.1965
Y2	-88.9812	20.1965
Y5A	-88.3397	21.0167
U6	-89.0377	20.0715
Y1	-88.717	20.0167

Tabla 4. Ubicación de pozos en el área de impacto de Chicxulub. La posición de cada perforación se indica en grados. Las abreviaturas de los nombres de los pozos corresponden a C: Chicxulub, S: Sacpuc, T: Ticul, Y: Yucatán, U: UNAM, y YAX: Yaxcopoil [Datos cortesía de Ana María Soler Arechalde, comunicación personal].

### APÉNDICE C RESTRICCIONES DEL EXPERIMENTO SÍSMICO DE 2005

La campaña de adquisición de datos sísmicos sobre el cráter de Chicxulub llevada a cabo durante el año 2005 fue un proyecto científico altamente regulado por las autoridades mexicanas; instituciones como la Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (PROFEPA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Marina y el Instituto Nacional de Ecología (INE) implementaron reglas que se tuvieron que acatar para la realización del mismo. La principal preocupación de las autoridades respecto a los procedimientos llevados a cabo durante la campaña de prospección, se relacionó a la operación de las pistolas de aire bajo ciertas condiciones climáticas y a la repercusión que su uso pudiera tener en el medio ambiente y organismos marinos de la región, por tal motivo las actividades a bordo del *R/V Maurice Ewing* fueron realizadas operando las siguientes áreas de trabajo dentro y fuera de la embarcación con el objetivo de cumplir cabalmente con las disposiciones implementadas por las instituciones antes mencionadas:

- Monitoreo del equipo y procedimientos a bordo de la embarcación
- Observadores de Mamíferos Marinos, *MMO (Marine Mammals Observers)*
- Monitoreo Acústico Pasivo, *PAM (Passive Acoustic Monitoring)*
- Monitoreo de la zona de prospección con embarcaciones de apoyo y aeroplano.

Una de las restricciones más importantes que repercutió en la densidad de datos obtenidos durante la campaña de adquisición fue que las pistolas neumáticas podían ser empleadas únicamente durante la luz del día en un horario de 06:30 a 18:00 hrs, además el disparo de las mismas podía suceder únicamente cuando ciertas condiciones climáticas ocurrían. Al inicio del experimento sísmico sólo nos fue permitido operarlas cuando la velocidad del viento era menor a 7 nudos correspondiente al nivel 2 en la escala de Beaufort (Tabla 5), si las condiciones climáticas diferían de aquellas descritas en esta escala, entonces los disparos con las pistolas de aire tenían que cesar; modificaciones posteriores a esta regulación permitieron que los disparos se realizaran siempre que la fuerza del viento fuera menor 28 km/hr equivalente al nivel 4 en la escala de Beaufort.

En el área de monitoreo del equipo y procedimientos a bordo de la embarcación se contaba con pantallas en las cuales se podía verificar el estado en tiempo real de muchas de las actividades llevadas a cabo en el buque de investigación como se muestra en la Figura 39. Con la información provista se podían regular por ejemplo las actividades de disparo considerando la velocidad del viento.



Figura 39. Pantallas de monitoreo del equipo y procedimientos a bordo de la embarcación. Los números en la Figura identifican los parámetros monitoreados en cada una de ellas, 1) Posición de la embarcación en coordenadas geográficas, velocidad del crucero, velocidad respecto al fondo marino, rumbo, etc. 2) Imágenes de diferentes áreas de la embarcación. 3) Control de la flotabilidad del tendido de hidrófonos. 4) Inspección del estado de las pistolas neumáticas, en la pantalla del lado izquierdo se puede observar el impulso generado por los disparos (en la pantalla ubicada a la derecha se verifica la sincronía de las pistolas neumáticas en cada disparo). 5) Trayectoria y transectos del trabajo de prospección. 6) Pantalla de posicionamiento GPS.

Escala	Velocidad del viento (nudos)	Velocidad del viento (km/hr)	Efectos del viento en el mar
0	< 1	1	El mar tiene la apariencia de un espejo
1	1-3	1 – 5	Se observan pequeñas olas sin espuma
2	4-6	6 – 11	Se observan olas pequeñas con crestas de apariencia cristalina que no se rompen
3	7-10	12 – 19	El mar presenta olas largas con crestas que empiezan a romper, además de crestas de olas dispersas con espuma
4	11-16	20 – 28	Las olas pequeñas empiezan a alargarse, y se observan numerosas crestas de olas con espuma
5	17-21	29 – 38	Se forman olas moderadas y alargadas. Se observan muchas crestas de olas con espuma y dispersión de gotas pequeñas de agua.
6	22-27	39 – 49	Comienzan a formarse olas grandes y crestas de olas con espuma por todas partes; además de que hay una mayor dispersión de gotas pequeñas de agua, resultando peligrosa la navegación para embarcaciones menores
7	28-33	50 – 61	El mar se agita y se dispersa espuma blanca como resultado del efecto del viento y del rompimiento de las olas, reduciéndose la visibilidad.
8	34-40	62 – 74	Se observan olas moderadamente altas y de mayor longitud, cuyos bordes de sus crestas se rompen dentro de un remolino; además de que la espuma se mantiene en suspensión de acuerdo a la dirección del viento.
9	41-47	75 – 88	El mar empieza a rugir y se observan olas altas con espesas estelas de espuma; dificultándose la visibilidad por la dispersión de gotas pequeñas de agua.
10	48-55	89 – 102	El mar ruge y toma apariencia blanca debido a la espuma que es arrastrada en gran proporción; formándose olas muy altas con crestas sobrepuestas en forma de penacho, mientras que al enrollarse provocan visibilidad reducida.
11	56-63	103 – 117	Se forman olas excepcionalmente altas, provocando en el mar una apariencia blanca que reduce la visibilidad y haciéndose peligrosa la navegación de tal manera que los buques de mediano tonelaje se pierden de vista.
12	> 64	> 118	El aire se mezcla con la espuma y el mar esta completamente blanco con dispersión y suspensión de pequeñas gotas de agua; por lo que la visibilidad es casi nula y se imposibilita toda navegación.

Tabla 5. Escala de Beaufort. Velocidad del viento relacionada con la apariencia de la superficie marina [Tomada de <http://www.semar.gob.mx/meteorologia/ESCALA%20BEAUFORT.html>]

El área de observadores de mamíferos marinos localizada sobre el puente de mando del buque realizaba operaciones dentro del horario de 6 a 18 horas; desde este lugar seis observadores aprobados por las autoridades mexicanas (tres de los cuales fueron siempre de nacionalidad mexicana), se podían realizar inspecciones visuales de los alrededores de la embarcación (Figura 40). Con el objetivo de no causar daño a mamíferos y tortugas marinos del área de prospección, se consideró una distancia de 3500 m medidos a partir del punto de observación en el barco como radio de seguridad, ya que a esta distancia y a profundidades menores de 100 m el sonido generado por las pistolas neumáticas se ve reducido a 180 dB [ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB\_Report\_&\_Appendices/Chicxulub%20Cruise], nivel que ya no afecta directamente o en comportamiento a los mamíferos o tortugas marinos. Los avistamientos se realizaban tanto de manera natural como empleando dispositivos que aumentarían la visibilidad tales como binoculares de corto y largo alcance durante guardias de 4 horas de duración.



Figura 40. Área de observación de mamíferos marinos. La imagen de la izquierda muestra el trabajo de avistamiento empleando binoculares de gran alcance. La fotografía de la derecha muestra algunos otros dispositivos empleados en esta área de trabajo así como una pantalla en la que aparecían parámetros de velocidad de crucero, posición, hora, etc.

Con la finalidad de llevar un registro detallado del lugar de avistamiento de tortugas y mamíferos marinos dentro del radio de seguridad, se contaba también con una pantalla en la que se podía verificar la posición de la embarcación. Cuando un avistamiento era notificado por los observadores se procedía a desactivar las pistolas escalonadamente hasta que quedara encendida solo una de ellas o a hasta apagarlas en su totalidad dependiendo del caso. La pistola que permanecía encendida pretendía funcionar como una alarma de alerta para los organismos que se encontraran cercanos a la embarcación. Cabe mencionar que el comienzo o reanudación de operación de las pistolas neumáticas se realizaba de igual forma escalonadamente, poniendo en funcionamiento primeramente las pistolas de menor volumen y siguiendo una secuencia de encendido hasta alcanzar el volumen total de 6947 pulgadas cúbicas. La Tabla 6 muestra una relación de tiempo de encendido escalonado, volumen de aire de las pistolas neumáticas empleadas durante el experimento y ruido en dB de acuerdo con el número de pistolas encendidas.

El procedimiento de desactivar las pistolas se aplicaba también cuando la embarcación cambiaba de rumbo, cuando la velocidad del viento excedía el nivel 4 de acuerdo con la escala de Beaufort, y cuando alguna embarcación se encontraba dentro del radio de seguridad de operaciones del *R/V Maurice Ewing*. Es necesario indicar, que la distancia mínima de operaciones en caso de avistar una embarcación era de al menos ~1.6 km de la proa y ~ 6 km de la popa.

Tiempo (m)	0	5	10	15	20	25
# de pistolas funcionando	1	2	4	8	16	20
Volumen agregado (inc <sup>3</sup> )	80	145	345	830	2682	2865
Volumen total (inc <sup>3</sup> )	80	225	570	1400	4082	6947
Señal total (dB)	223	230	236	242.5	249	253.5

Tabla 6. Encendido escalonado de pistolas neumáticas. Intervalo de tiempo para escalonamiento de potencia de las pistolas neumáticas [Modificada de ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB\_Report\_&\_Appendices/Chicxulub%20Cruise].

En el área de monitoreo acústico pasivo se realizaban detecciones de vocalizaciones de mamíferos marinos mediante el uso de un hidrófono sumergido por el estribor de la embarcación, las detecciones se realizaban durante el mismo periodo de tiempo permitido para la operación de las pistolas neumáticas aun cuando estas no se encontraran en funcionamiento. Las pantallas que se observan en la Figura 41, muestran espectrogramas en tiempo real que eran analizados por los expertos conjuntamente con la recepción de sonidos en auriculares o bocinas para determinar si las señales recibidas correspondían a algún mamífero marino. Este método pasivo de detección es un procedimiento que apoya los avistamientos hechos en cubierta y en algunos casos alerta a los observadores de la presencia de organismos bajo la superficie del mar dentro del radio de seguridad.

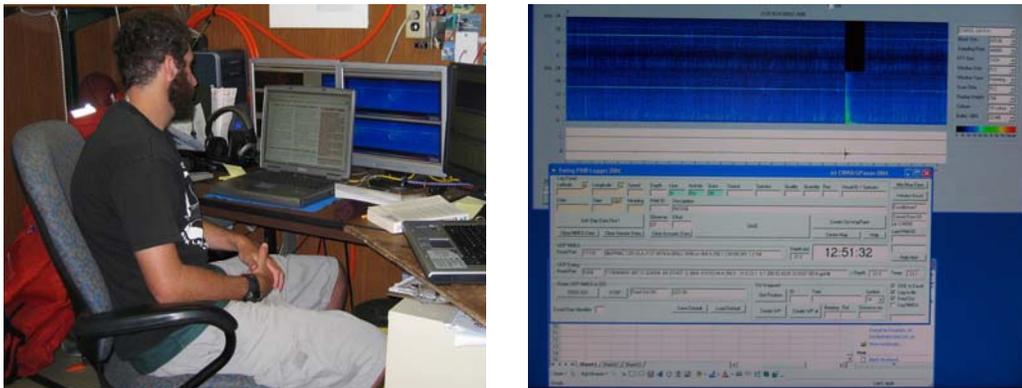


Figura 41. Área de monitoreo acústico pasivo (PAM). Imagen de la derecha muestra a un observador de mamíferos marinos analizando los espectrogramas en búsqueda de organismos dentro del radio de seguridad. Del lado izquierdo se aprecia un espectrograma resultado del muestreo con esta técnica.

Como una medida suplementaria para la mitigación de daños a los mamíferos y tortugas marinas de la zona de prospección, la PROFEPA requirió que se realizaran observaciones tanto por aire como en mar para detectar la presencia de dichos organismos dentro del radio de seguridad de operaciones de la embarcación, así como para llevar a cabo una búsqueda de posibles animales afectados (muertos o heridos) y analizar la relación que su condición pudiera tener con las operaciones de nuestra embarcación. Para poder cumplir con esta norma se contrató el servicio de una avioneta para la búsqueda aérea y los servicios de tres embarcaciones medianas, dos de las cuales siguieron de cerca la mayor parte del tiempo al R/V Maurice Ewing. Las embarcaciones de apoyo se encargaban además de contactar físicamente a pequeñas embarcaciones para informarles de nuestra presencia en la zona en el caso en que no se les pudiera contactar por radio.

Adicionalmente personal de la PROFEPA realizaba inspecciones periódicas a bordo de la embarcación con el objetivo de verificar personalmente el cumplimiento de todas las normas impuestas. Como última medida de seguridad el Teniente Rubén Rojas, elemento de la Secretaría de Marina Armada de México, estuvo presente durante todo el tiempo de crucero

A manera de resumen la Figura 42 muestra una relación de las actividades realizadas en la embarcación con el tiempo dedicado a las mismas, en ella se puede apreciar que la pérdida de tiempo de adquisición de datos de reflexión y refracción sísmica debido al poco tiempo del que se disponía para los disparo o al cese de actividades por la presencia de mamíferos o embarcaciones en nuestra área de trabajo.

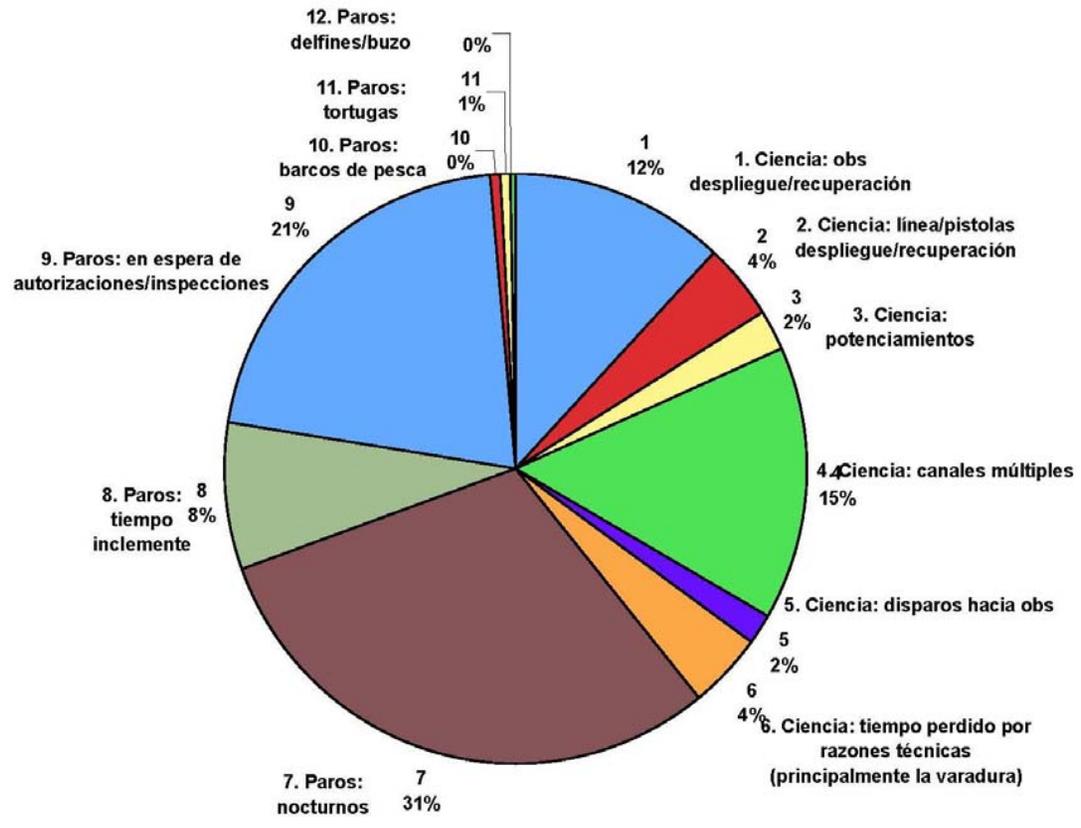


Figura 42. Gráfico de relación tiempo-actividades realizadas durante la prospección del cráter de Chicxulub de 2005. Se puede observar que el 61 % del tiempo nuestras operaciones fueron detenidas por diversos factores ajenos a las actividades científicas lo que repercutió en nuestra densidad de datos al final de la campaña [Tomada de [ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB\\_Report\\_&\\_Appendices/Chicxulub%20Cruise](ftp://utig.ig.utexas.edu/outgoing/sean/CHICXULUB_Report_&_Appendices/Chicxulub%20Cruise)].

**APÉNDICE D**  
**PERFILES SÍSMICOS DE LA CAMPAÑA 2005**

En esta sección se muestran algunos de los perfiles sísmicos disponibles de la campaña de adquisición de datos sobre el cráter de Chicxulub llevada a cabo en 2005. Las secciones de reflexión sísmica migradas en tiempo sin interpretar, se presentan hasta los 3000 ms doble tiempo de viaje.

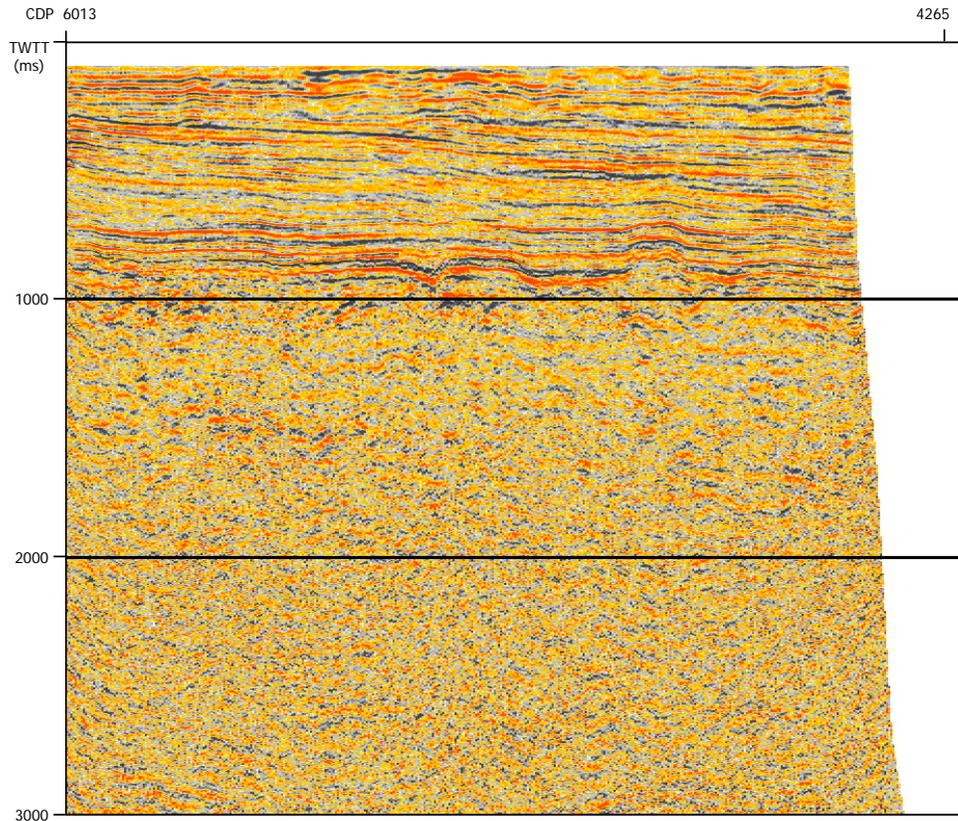


Figura 43. Sección Chicx-4c migrada en tiempo. El eje horizontal muestra el primer y último CDP. El eje vertical es el doble tiempo de viaje en milisegundos.

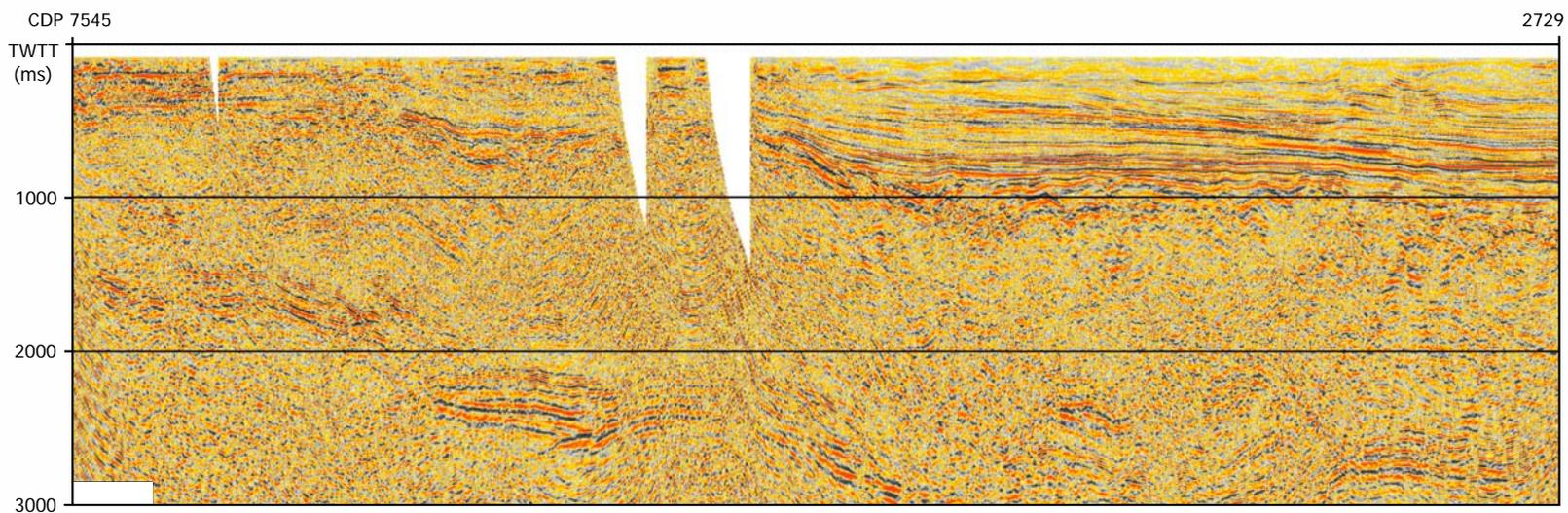


Figura 44. Sección Chicx-2b migrada en tiempo. El eje horizontal muestra los CDP y el eje vertical el doble tiempo de viaje en milisegundos.

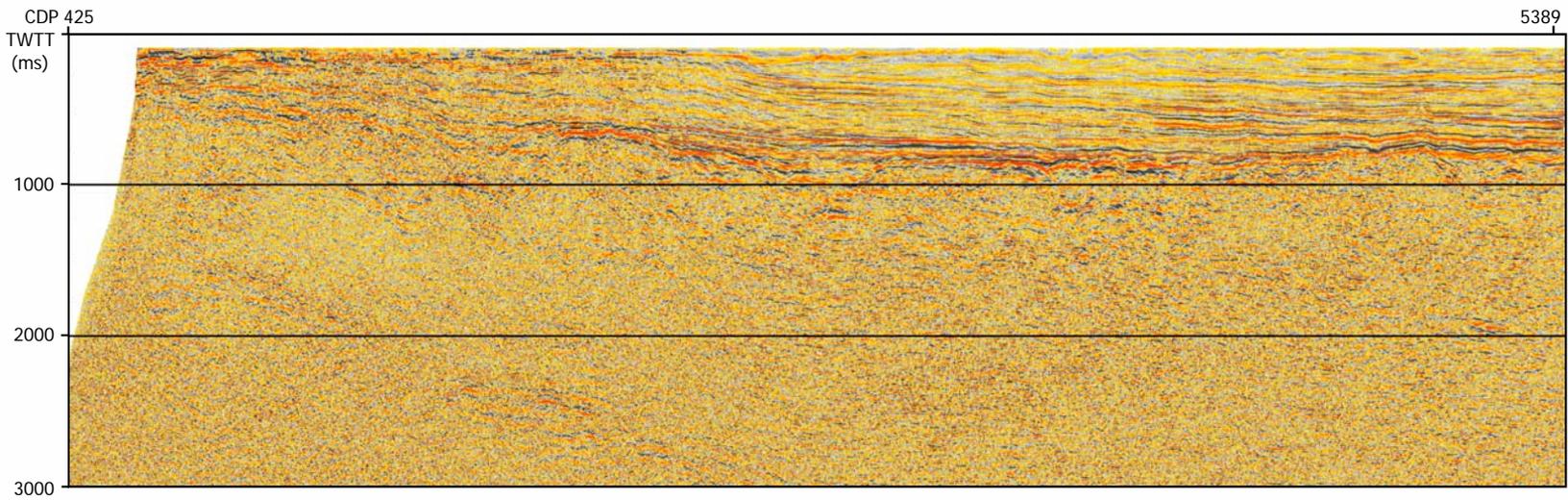


Figura 45. Perfil Chicx-5 migrado en tiempo. El eje horizontal muestra el primer y último CDP de la línea. El eje vertical muestra el doble tiempo de viaje en milisegundos.

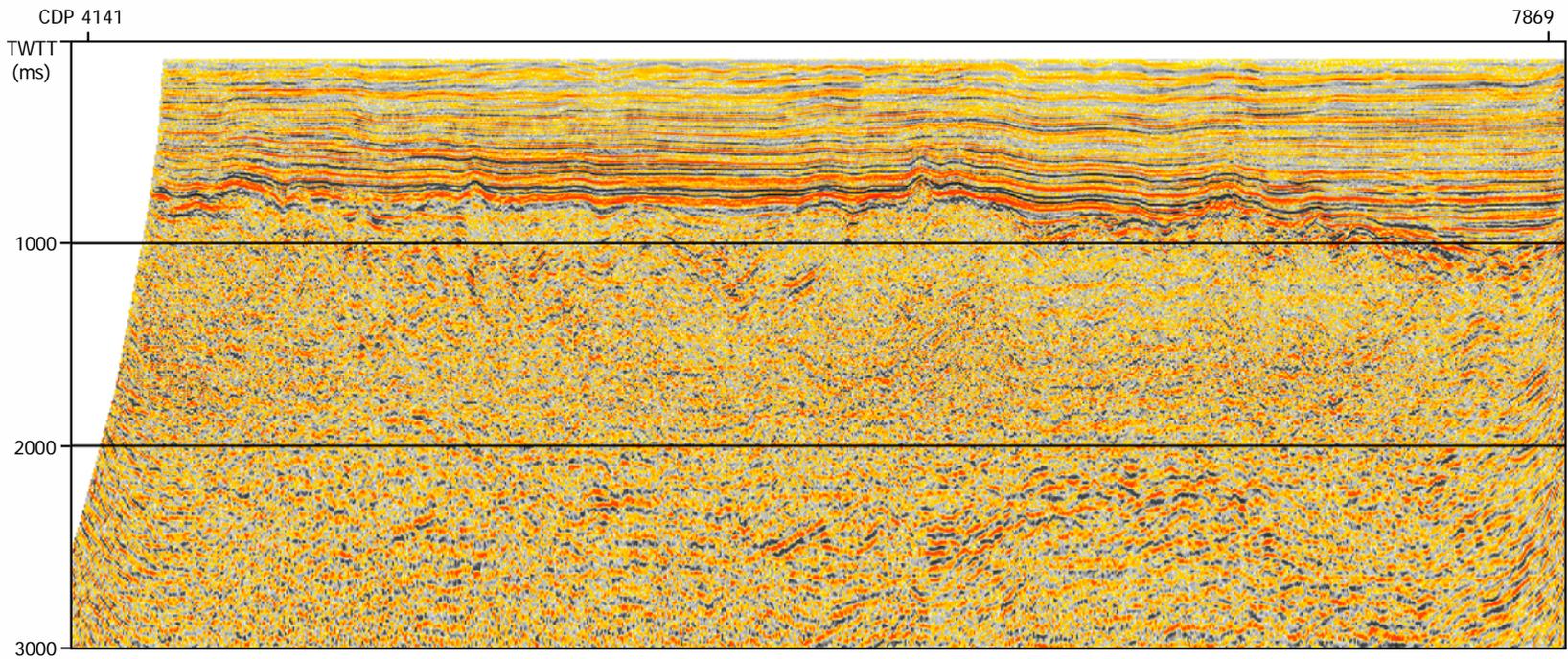


Figura 46. Perfil Chicx-6 migrado en tiempo. Los CDP se muestran en el eje horizontal. El doble tiempo de viaje en milisegundos se grafica en el eje vertical.

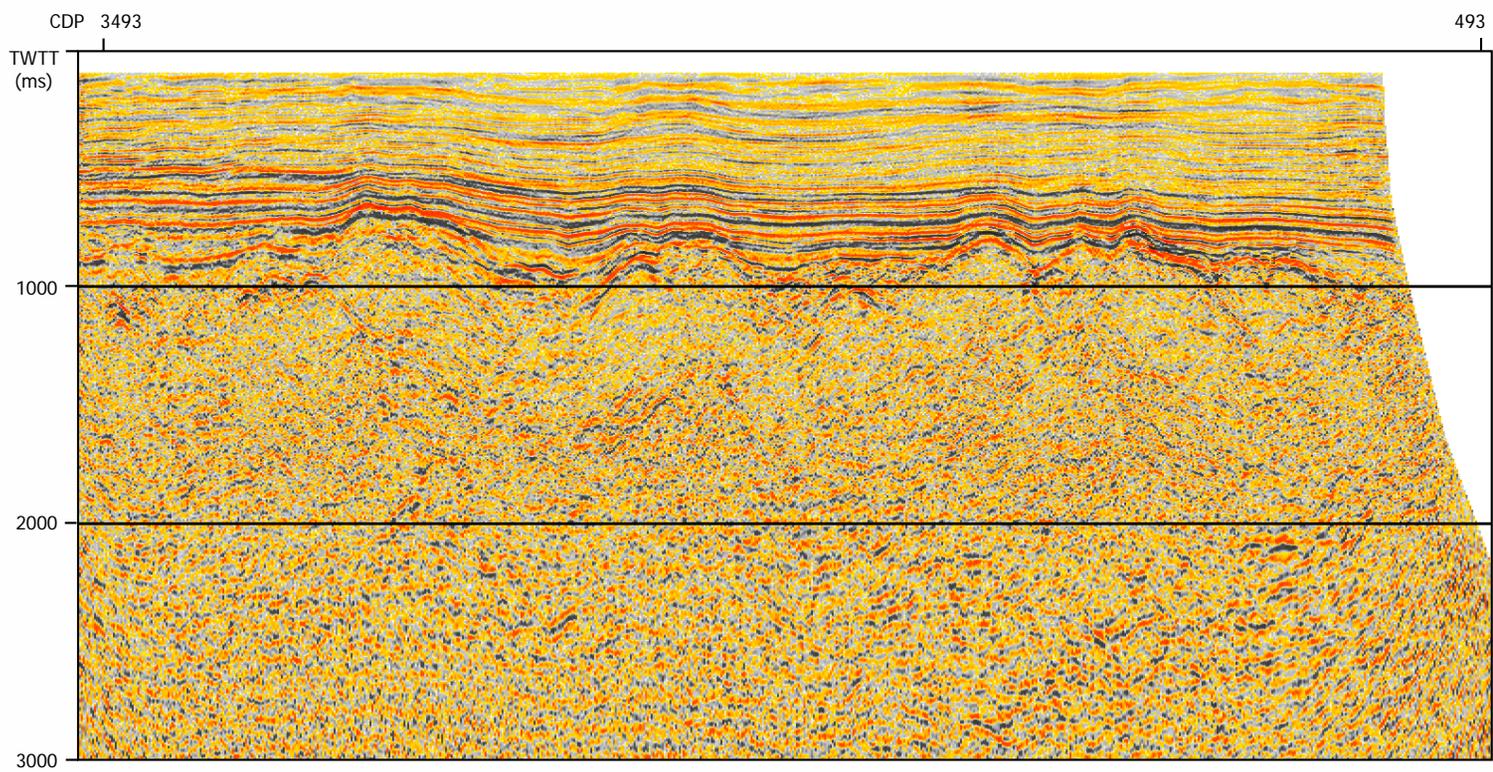


Figura 47. Sección Chicx-8a migrada en tiempo. El eje horizontal muestra el primer y último CDP de la línea. El doble tiempo de viaje se grafica en el eje vertical.

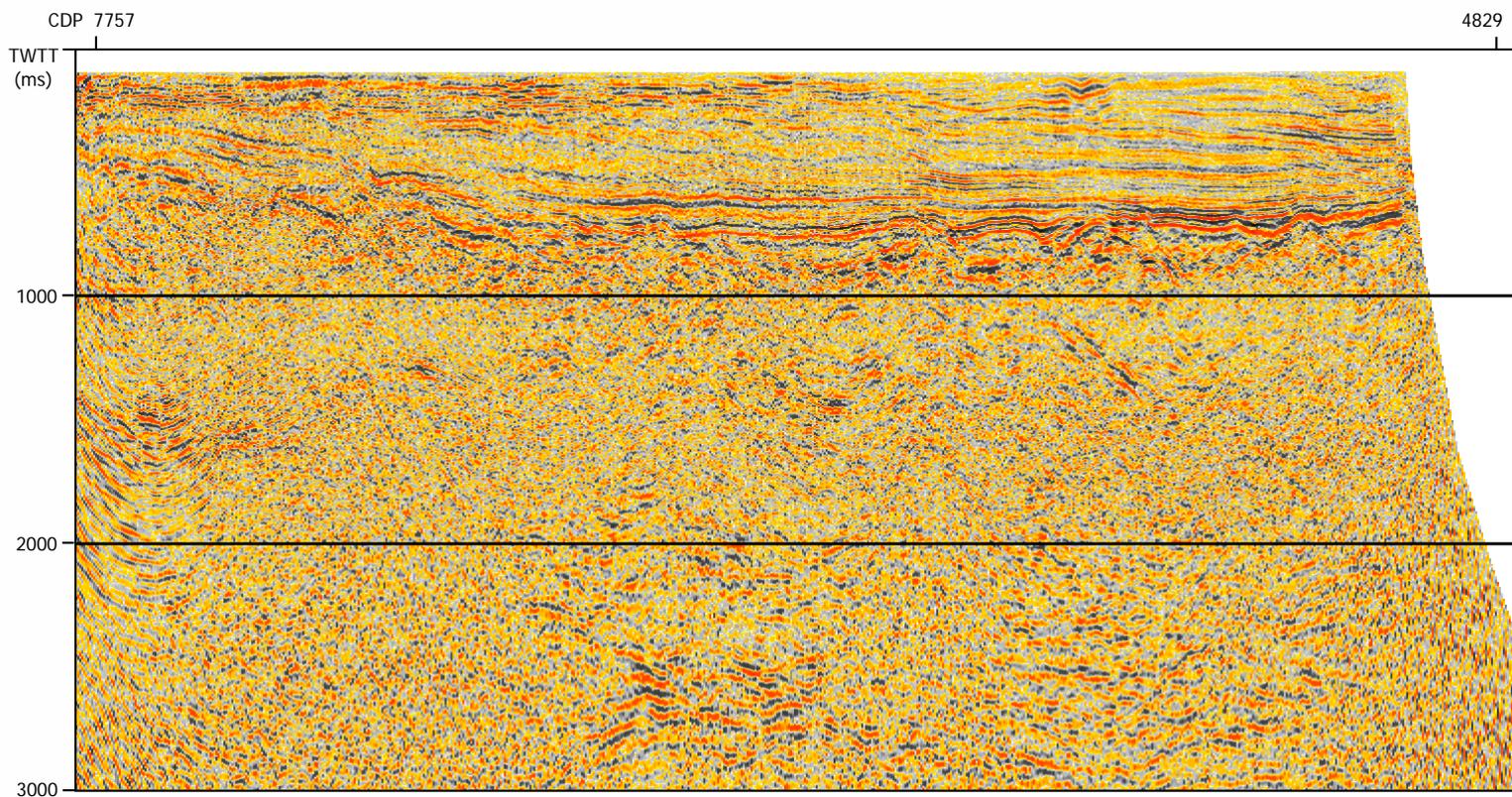


Figura 48. Sección Chicx- 8c migrada en tiempo. Los CDP se muestran en el eje horizontal. El doble tiempo de viaje en milisegundos se grafica en el eje vertical.

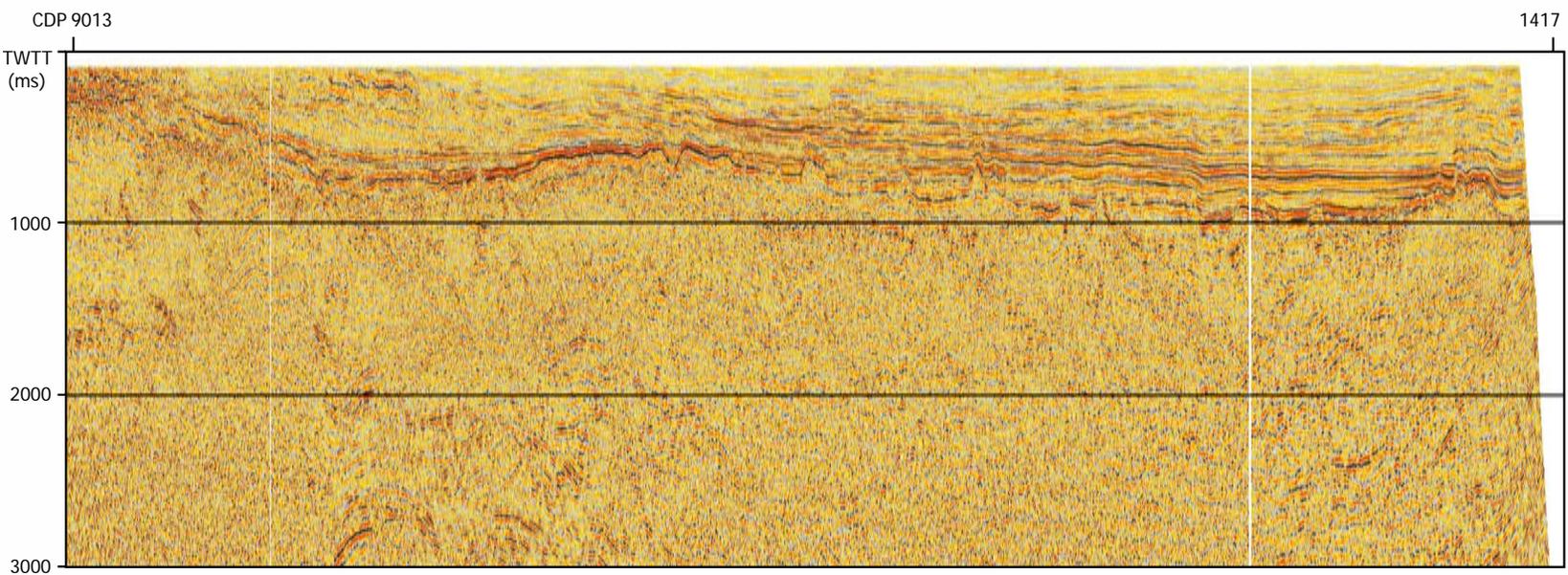


Figura 49. Perfil Chicx-9 migrado en tiempo. El eje horizontal muestra el primer y último CDP. El eje vertical es el doble tiempo de viaje en milisegundos.

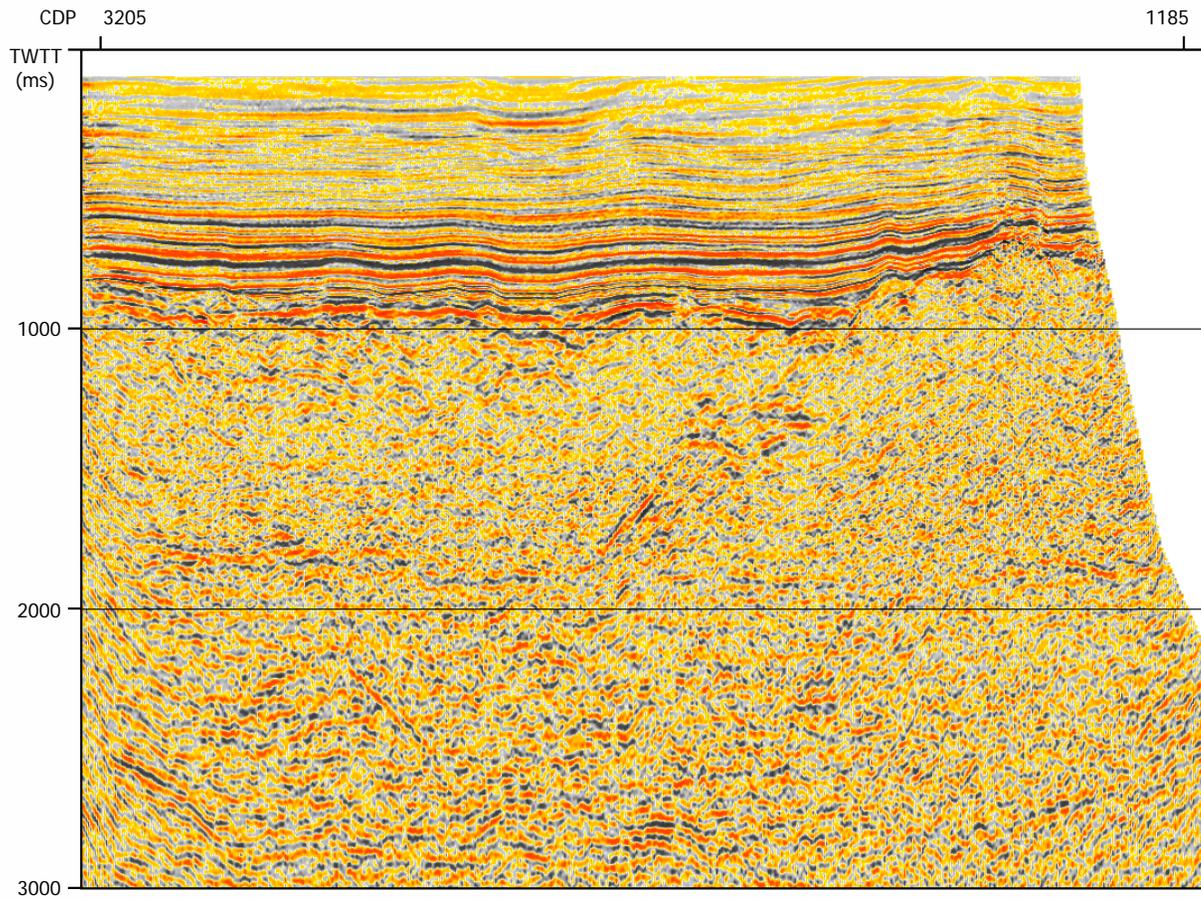


Figura 50. Perfil Chicx-13 migrado en tiempo. Los CDP se muestran en el eje horizontal. El doble tiempo de viaje en milisegundos se grafica en el eje vertical.

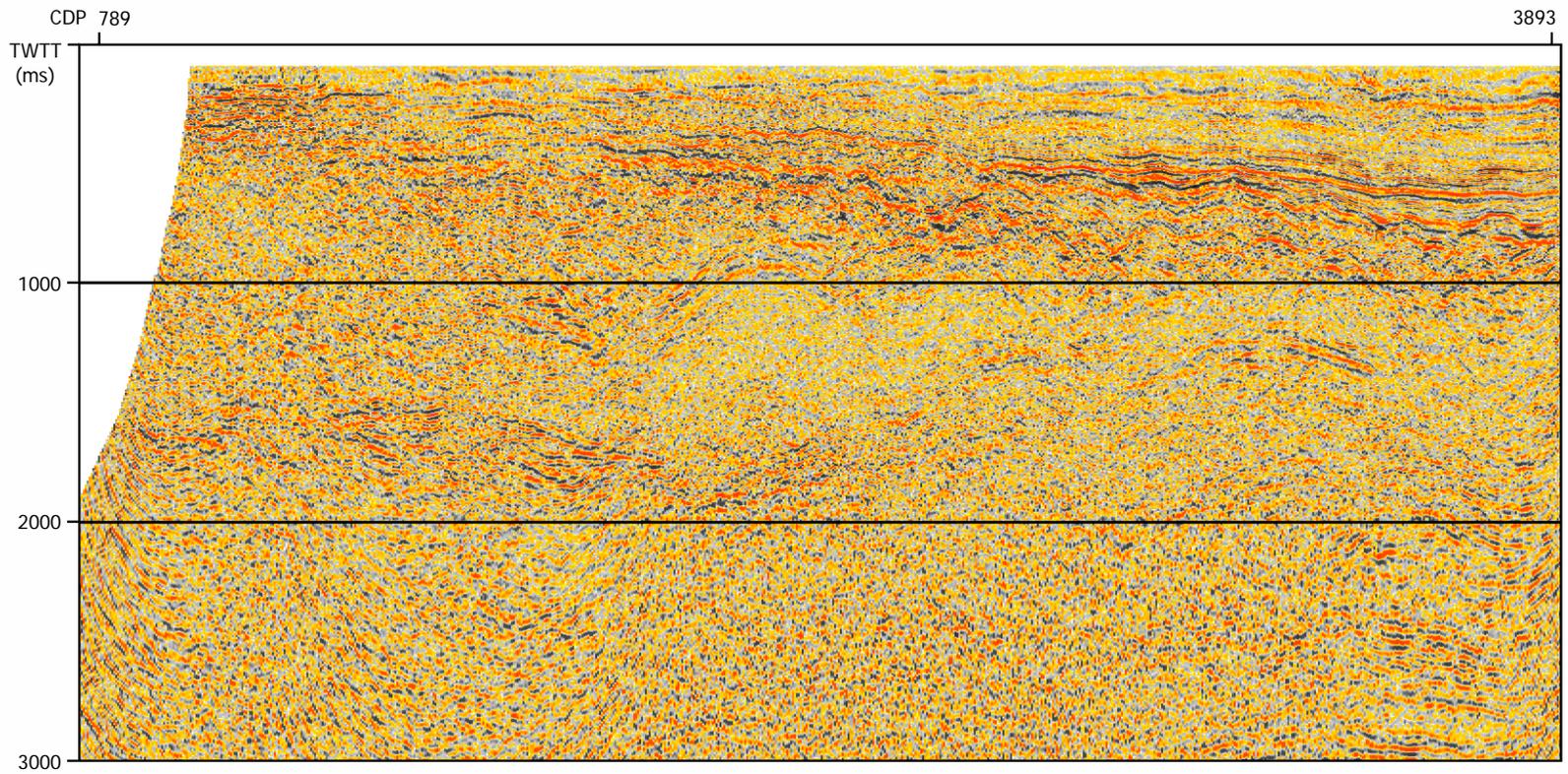


Figura 51. Perfil Chicx-15 migrado en tiempo. EL eje horizontal muestra el primer y último CDP. El eje vertical es el doble tiempo de viaje en milisegundos.

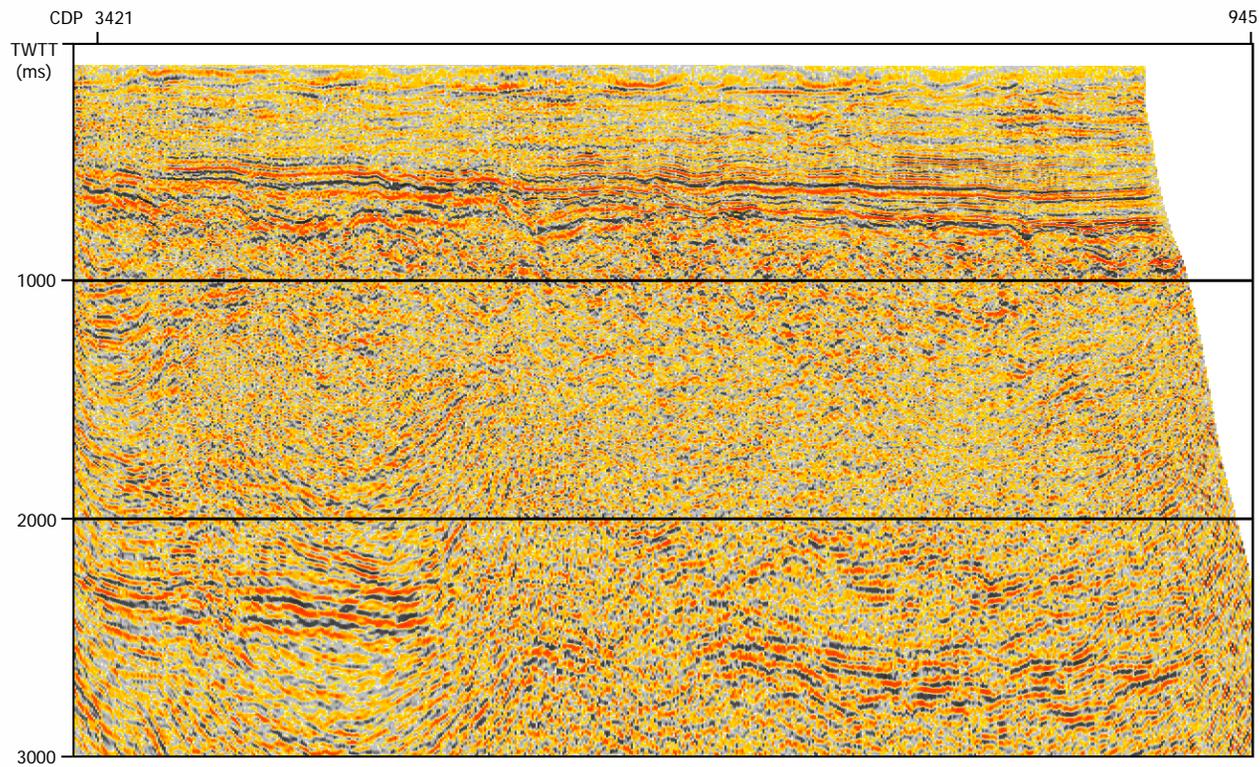


Figura 52. Perfil Chicx- 16 migrado en tiempo. Los CDP inicial y final se muestran en el eje horizontal. El doble tiempo de viaje en milisegundos se grafica en el eje vertical.

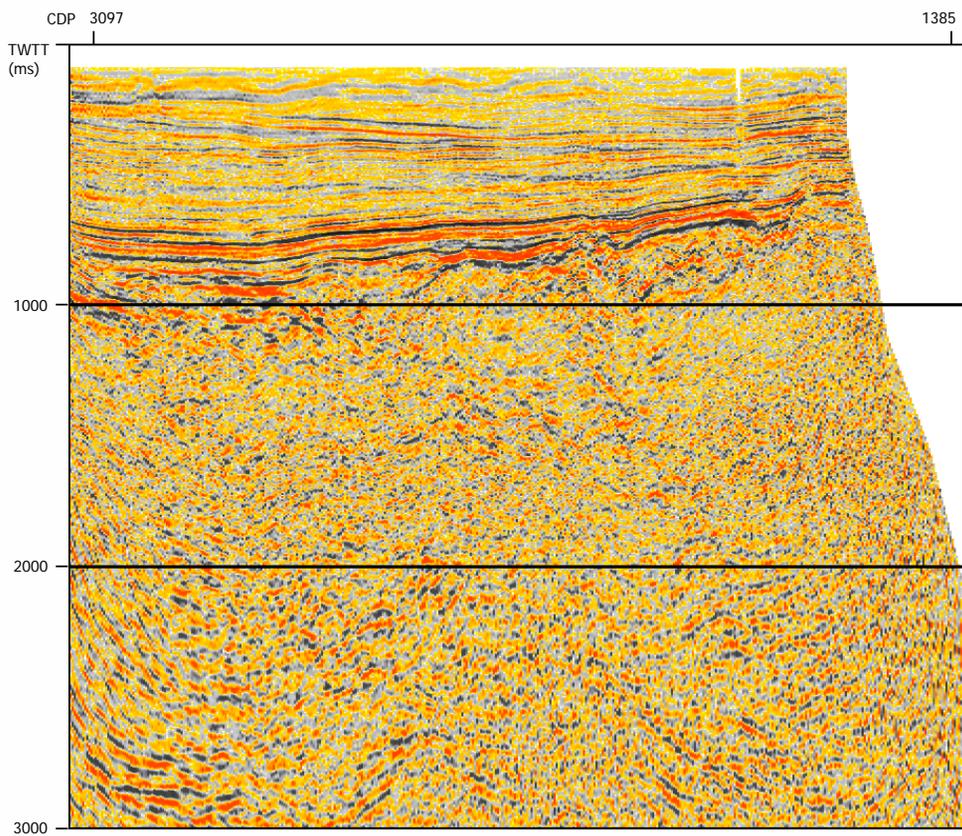


Figura 53. Perfil Chicx-18 migrado en tiempo. El eje horizontal muestra los CDP. El eje vertical es el doble tiempo de viaje en milisegundos.

APÉNDICE E  
 SUBROUTINA DE PROCESAMIENTO

Subrutina para deconvolución y ordenamiento de trazas

Sort job

```
*JOB CHIX CHIX10
*CALL DSKRD
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.1.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.2.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.3.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.4.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.5.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.6.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.7.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.8.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.9.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.10.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.11.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.12.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.13.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.14.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.15.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.16.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.17.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.18.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.19.dsk14336
NAMOFIL /disk/ew04_3/chix_nb/focus/chix10.20.dsk14336
```

```
*CALL HDRMATH
DEFINE WBXTIME FLOAT 4
HCSUB WDEPTH13 WBXTIME
HCPOW WBXTIME 2 WBXTIME
HCADD WBXTIME 8100 WBXTIME
DEFINE WBTIME FLOAT 4
HSQRT WBXTIME WBTIME
HCMUL WBTIME 2 WBTIME
HCDIV WBTIME 1520 WBTIME
*CALL PROFILE CHIX10 480 480
*CALL IEDIT CHIX10
```

```
*CALL EDIT shot chan
SEL 189 1184 KILL
14 31 312 341 343 402 463
```

Trazas editadas

```
*CALL FILTER shot ZERO
BAND 151
14000 3 8 75 100
```

```
*CALL GAIN shot EXP
SPHDIV 0 1
```

Parámetros para la corrección por divergencia esférica

```
*CALL FKBUILDfkbuild
DIP
-25 -7
TAPER COSINE 7
DESIGN REJECT
SAVE fkbuild
*CALL FKAPPLYfkbuild
```

Parámetros para la aplicación de filtro F-K

```
*CALL MCDECON
5
KEYDEF 1 180 6180
```

Parámetros para la deconvolución

```
GAP 143 POINTS 30 0.1
500 14336 8000 14336 0 2000 0 7000
3000 7000 7000 11000 4000 14000 9500 14000

*CALL SPEQ 250
FGATES
7 8 9 10 31
SPECOUT
3 0 8 1 75 1 100 0
```

```
DESCALE
*CALL DESCSCALE SPEQ
*CALL SORT 120 57601 DISK Ordenamiento en CMP
MAJOR cdp
MINOR offset
*CALL BALANCE cdp chan
GATES 1 1 0 14336 0
*CALL DSOUT OVERWRT
LABEL chix10.fkdeconsort_steffenspeq75
*END
```

**Picking velocities job** Subrutina para análisis de velocidades

```
*JOB CHIX CHIX10
*CALL DSIN
LABEL chix10.fkdeconsort_steffenspeq75
FILEID 0000400500900bc1.000000.0000000c
RANGE 1075 4625 50 100
*CALL HDRMATH
DEFINE WBXTIME FLOAT 4
HCSUB WDEPTH013 WBXTIME
HCPOW WBXTIME 2 WBXTIME
HCADD WBXTIME 8100 WBXTIME
DEFINE WBTIME FLOAT 4
HSQRT WBXTIME WBTIME
HCMUL WBTIME 2 WBTIME
HCDIV WBTIME 1520 WBTIME
*CALL BALANCE cdp
GATES 100 1 0 14336 0
*CALL AGC
*CALL VELDEF cdp CHX10FIX chix10
```

```
HANDVEL 1100
0 1520 112 1518 216 1586 296 1872
440 2322 532 2481 644 2640 816 2971
940 3331 1264 4067 1424 4305 1800 4714
3876 5463 4960 5756 5860 5931 9524 6329
14332 6949
```

Picado de velocidades para el CMP 1100 de la línea CHICX10

**Stack job** Subrutina para el apilamiento

```
*JOB CHIX CHIX10
*CALL DSIN
LABEL chix10.fkdeconsort_steffenspeq75
FILEID 0000400500900bc1.000000.0000000c
PKEYLST
753 4973
*CALL BALANCE cdp
GATES 753 1 0 14336 0
*CALL NMO CHX10FIXchix10
```

```
*CALL MUTE cdp
DBMUTEchix10 CHX10FIX
```

```
*CALL STACK 120
*CALL DSOUT OVERWRT
LABEL CHX10_STACK_SPEQ
```

Apilamiento de trazas

```
*END
```

#### Post stack FK Filter job

Subrutina para filtrado post apilamiento

```
*JOB CHIX CHX10
*CALL DSIN
LABEL CHX10_STACK_SPEQ
FILEID 000008500900bc1.000000.000000d
PKEYLST
753 4973
*CALL COLLECT 4221 753
*CALL FKFLT C10PFKF_FCMP5 chix10
*CALL SPLIT 1 753 1
*CALL FILTER cdp
KEYDEF 1
BAND 143
```

```
0 750 3 8 75 100
1250 1750 3 8 45 65
2250 14000 3 8 30 40
```

Parámetros de filtro TVF

```
*CALL MUTE ONTIME OFFSET
ON 0
0 0
ON 5000
5000 5000
*CALL DSOUT OVERWRT
LABEL CHX10_POSTFKF_SPEQ75
*END
```

#### Migration job

Subrutina para migración

```
*JOB CHIX CHX10
*CALL DSIN
LABEL CHX10_POSTFKF_SPEQ75
FILEID 000008500900bc1.000000.000000e
PKEYLST
```

```
753 4973
*CALL MIGTX 4221 C10PS8 12.5 MUTE
```

Migración en tiempo

```
*CALL DSOUT OVERWRT
LABEL CHX10_MIG_SPEQ_PS8
*END
```