



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización de la zona de impacto del Cráter de
Chicxulub por medio del reprocesamiento de las
secciones sísmicas y la aplicación de atributos
sísmicos

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A

YAMIL SALOMÓN ATALA MUÑOZ



DIRECTOR DE TESIS
DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

Ciudad Universitaria México D.F. 2015

AGRADECIMIENTOS

*A mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México
y al Instituto de Geofísica.*

*Por brindarme los conocimientos, enriquecer mi persona y poder tener el
orgullo de ser universitario.*

A mi director de tesis, Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi.

*Por todo el apoyo y conocimiento ofrecido para ser un mejor universitario y
persona.*

*Su ejemplo es una inspiración para abrazar el conocimiento de forma
apasionada.*

A mi jurado de examen

*Dr. Carlos Ortíz Alemán
Dr. Jorge Aguirre González
Ing. Ricardo Castrejón Pineda
Ing. Javier Arellano Gil*

*Por su disposición, apoyo y contribución que permitió la materialización de
esta tesis.*

A todos ustedes, gracias

*Gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación
Tecnológica (PAPIIT) por el apoyo brindado al desarrollo de este trabajo
y contribuir al enriquecimiento de mi formación académica.*

A mis padres, porque no hay palabras que describan mi eterno agradecimiento. Este logro es para ustedes, por su apoyo, su confianza, su amor incondicional, sus enseñanzas y por siempre impulsarme a dar lo mejor de mí a lo largo de toda esta aventura, la cual apenas comienza.

A Iaely, mi gran compañera durante estos maravillosos años, con quien he crecido y aprendido tantas cosas, quien siempre ha estado a mi lado, creído en mí, por su motivación para hacerme salir adelante, ser y dar lo mejor de mí en cada momento. A ti mi amor, muchísimas gracias.

A mi hermana Margarita, por su apoyo, guía y amor para alcanzar y superar mis metas.

A Javier y Mary, por su gran cariño, su confianza, por permitirme ser parte de su familia y brindarme su apoyo incondicional. Sin duda, unos excelentes maestros durante todo este tiempo.

A mis abuelos Lourdes y Godofredo, por el amor que siempre me brindan y su apoyo incondicional. Ustedes son el motor para seguir adelante y superarme día a día.

A Tere, Jorge y Aura, por su cariño y apoyo en cada etapa de mi vida.

A Rafael, por su gran apoyo en esta etapa, sus conocimientos y la gran amistad que se ha forjado. Gracias hermano.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería, en especial a Jazmín, Braulio, Chacón, Rodrigo, Peter, Alex y Sergio, por su amistad, apoyo, confianza y crecimiento a lo largo de esta maravillosa etapa.

A Dani, Beto y Toño, por su apoyo y amistad dentro y fuera del cubo.



ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS.....	iii
INDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II ÁREA DE ESTUDIO.....	3
II.1 Plataforma Carbonatada de Yucatán	3
II.1.1 Localización.....	3
II.1.2 Geología Regional	5
II.1.3 Geología Local.....	7
II.2 Cráter del Chicxulub	8
II.2.1 Los Cráteres de Impacto Terrestres	9
II.2.2 Características de los Cráteres de Impacto.....	10
II.2.3 Cráteres de Impacto y sus Anomalías Geofísicas	12
III MARCO TEÓRICO	13
III.1 Sísmica de Reflexión	13
III.2 Trazas Sísmicas (Gathers)	14
III.3 Apilamiento	15
III.4 Procesamientos Sísmicos.....	16
III.5 Transformada de Hilbert y la Traza Compleja.....	18
III.6 Atributos Sísmicos.....	19
III.7 Resolución.....	21
IV ADQUISICIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS	23
IV.1 Campaña de Adquisición 2005.....	24
V PROCESAMIENTO Y RESULTADOS.....	29
V.1 Análisis Espectral	32
V.2 Deconvolución	34
V.3 Ecualización de Frecuencias.....	37
V.4 Desarrollo de Atributos Sísmicos.....	39



V.4.1	Envolvente de Amplitud	40
V.4.2	Frecuencia Instantánea	42
V.4.3	Fase Instantánea	44
V.4.4	Coseno de la Fase	44
V.4.5	Suavizamiento Estructural.....	48
V.4.6	Polaridad Aparente.....	50
V.4.7	Gradiente de la Traza.....	52
V.4.8	Varianza	54
V.4.9	Caos	57
V.5	Caracterización de la Zona de Impacto.....	59
VI	CONCLUSIONES.....	68
ANEXO A:	Reprocesamiento Líneas Sísmicas	70
Chicx 05	.....	70
Chicx 06b	.....	71
Chicx 8a	.....	72
Chicx 08b	.....	73
Chicx 08c	.....	74
Chicx 15	.....	75
Chicx 16	.....	76
Chicx 17b	.....	77
Chicx 18	.....	78
Chicx 19	.....	79
Chicx 21	.....	80
Bibliografía	.....	81



INDICE DE FIGURAS

<i>Figura II.1. Localización y extensión geográfica de la plataforma carbonatada de Yucatán. (Modificado de Google Earth, 2014).</i>	3
<i>Figura II.2. Geomorfología de la Península de Yucatán. (Perry et al., 2003).</i>	4
<i>Figura II.3. Columna estratigráfica regional de la Península de Yucatán. (Modificado de López Ramos, 1975).</i>	6
<i>Figura II.4. Modelo esquemático del Cráter de Chicxulub. (Vermeesch & Morgan, 2008).</i>	8
<i>Figura II.5. Localización del impacto de meteorito Chicxulub con un diámetro aproximado de 10Km, formando un cráter de unos 200Km de diámetro aproximadamente. (Ocampo et al., 1996).</i>	9
<i>Figura II.6. Régimen de presión-temperatura post impacto para los efectos de metamorfismo de impacto en rocas graníticas y su comparación con el metamorfismo terrestre normal. (Grieve & Pesonen, 1992).</i>	10
<i>Figura II.7. Diagrama de formación de un cráter complejo. (Grieve & Pesonen., 1992).</i>	11
<i>Figura III.1. Esquema de la geometría de las ondas reflejadas y transmitidas. (Modificado de Kearey et al., 2002).</i>	13
<i>Figura III.2. Tipos de Gathers y sus variaciones en el ordenamiento de las trazas sísmicas (Chelotti et al., 2009).</i>	15
<i>Figura III.3. Proceso de apilamiento de las trazas sísmicas al realizar los procesamientos pertinentes para limpiar la información sísmica y acomodar los reflectores a su posición original. (Modificado de Schlumberger, 2009).</i>	16
<i>Figura III.4. Diagrama de flujo con las secuencias de procesamientos que se pueden aplicar a los datos a partir de su adquisición. (Modificado de Yilmaz, 2001).</i>	17
<i>Figura III.5. Representación de la traza compleja, compuesta por la traza sísmica (parte real) y la traza de cuadratura (parte imaginaria) las cuales son proyecciones de la traza compleja. (Modificado de Taner et al., 1995).</i>	19
<i>Figura III.6. Línea del tiempo del desarrollo de los atributos sísmicos y su relación con los avances en la tecnología de la exploración sísmica (Modificado de Barnes, 2001).</i>	21
<i>Figura III.7. Zona de Fresnel. La primera zona de Fresnel es la distancia horizontal abarcada por una longitud de onda de $\lambda/2$. (Sheriff, 1985).</i>	22
<i>Figura IV.1. Adquisición básica de datos sísmicos marinos. (Stoker et al., 1997).</i>	23
<i>Figura IV.2. Gráfica del análisis de intervalo de muestreo con el cual se busca evitar el fenómeno de aliasing. (Chelotti et al., 2009).</i>	24



Figura IV.3. Localización de los perfiles sísmicos adquiridos en la campaña de 2005. Las líneas en rojo representan los perfiles utilizados en esta tesis. 27

Figura V.1. Decaimiento de la señal sísmica en la sección Chicx 05. Como se puede apreciar, después de los 1000ms, la señal se atenúa hasta perder información sísmica. 30

Figura V.2. Flujo de Procesamiento empleado en las secciones sísmicas desarrolladas en ésta tesis. 31

Figura V.3. Sección sísmica migrada 09 de Chicxulub, a partir de la cual se realizó el reprocesamiento para el mejoramiento de la imagen. 32

Figura V.4. Espectro de potencia para Chicx 09 en el intervalo de los 0 – 1300 ms. 33

Figura V.5. Contenido de altas frecuencias en la sección Chicx 09. 33

Figura V.6. Contenido de bajas frecuencias en la sección Chicx 09. 33

Figura V.7. Parámetros empleados en la creación de la ondícula de fase cero para la realización de la deconvolución estadística. 35

Figura V.8. Mejoramiento de la sección sísmica Chicx 09 por medio de la deconvolución. Hay una considerable recuperación en los reflejos y su continuidad. 35

Figura V.9. Deconvolución estadística de la sección Chicx 09 presentada en el software HRS-Geoview® (Izquierda) y Petrel® (Derecha). 36

Figura V.10. Imagen comparativa de la sección Chicx 09 (Original-Deconvolucionada-Ecualizada). 37

Figura V.11. Ecualización de frecuencias para la sección Chicx 09. A partir de esta imagen se desarrollarán los atributos sísmicos y la caracterización de la zona. 38

Figura V.12. Con el atributo de envolvente se pueden delimitar los paquetes litológicos y las discontinuidades asociadas a las fallas. 40

Figura V.13. Aplicación del atributo de la envolvente de amplitud a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.). 41

Figura V.14. Con el atributo de frecuencia es posible delimitar las secuencias de depósito y distinguirlas del patrón caótico pertenecientes a las brechas. 42

Figura V.15. Aplicación del atributo de frecuencia instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.). 43

Figura V.16. El atributo de fase permite delimitar las discontinuidades de manera más detallada. 45

Figura V.17. El atributo del Coseno de Fase permite delimitar los horizontes de manera más detallada. 45



<i>Figura V.18. Aplicación del atributo de fase instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	46
<i>Figura V.19. Aplicación del atributo de coseno de la fase instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	47
<i>Figura V.20. Sección ecualizada (Izquierda) y con la aplicación del atributo de suavizamiento estructural (Derecha). Aunque no se puede apreciar una diferencia notable, este atributo brinda una mayor homogeneidad a los reflejos a lo largo de la sección.</i>	48
<i>Figura V.21. Aplicación del atributo de Suavizamiento Estructural a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	49
<i>Figura V.22. Con el atributo de polaridad es posible corroborar la delimitación de los horizontes y confirmar la continuidad del mismo.</i>	50
<i>Figura V.23. Aplicación del atributo de polaridad aparente a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	51
<i>Figura V.24. El atributo de Gradiente permite delimitar los principales cambios de litología. En este caso, delimita el contacto del Límite K/Pg con las brechas de impacto.</i>	52
<i>Figura V.25. Aplicación del atributo de gradiente de traza a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	53
<i>Figura V.26. El atributo de varianza delimita las secuencias de depósito y se aprecia la gran variabilidad existente por debajo del Límite K/Pg.</i>	55
<i>Figura V.27. Aplicación del atributo de varianza a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	56
<i>Figura V.28. EL atributo de Caos muestra la distribución de la textura a lo largo de la sección sísmica y se aprecian las zonas caóticas por debajo del Límite K/Pg y al Oeste por encima de éste.</i>	57
<i>Figura V.29. Aplicación del atributo de caos a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).</i>	58
<i>Figura V.30. Líneas sísmicas recortadas, empleadas en la construcción de los horizontes.</i>	59
<i>Figura V.31. Vista de los horizontes delimitados a lo largo de la sección sísmica de Chicx 09.</i>	61
<i>Figura V.32. Principales atributos empleados en la delimitación de los horizontes (Izq.) y la caracterización estructural interpreta de la sección Chicx 09 (Der.).</i>	62
<i>Figura V.33. Proyección de todas las superficies obtenidas a partir de los horizontes marcados en las secciones sísmicas.</i>	63
<i>Figura V.34. Proyección del Límite K/Pg a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.</i>	63



<i>Figura V.35. Proyección de la superficie Pg 1 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.</i>	64
<i>Figura V.36. Proyección de la superficie Pg 2 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.</i>	64
<i>Figura V.37. Proyección de la superficie Pg 3 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.</i>	65
<i>Figura V.38. Esquema del tendido sísmico usado en este trabajo superpuesto sobre un mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer. La línea amarilla muestra la orientación de la estructura de tipo peak ring con la que se asocian los altos calculados en las secciones sísmicas (Barton et. al, 2010).</i>	65
<i>Figura V.39. Proyección del Límite K/Pg.</i>	66
<i>Figura V.40. Proyección del horizonte Pg 1.</i>	66
<i>Figura V.41. Proyección del horizonte Pg 2.</i>	67
<i>Figura V.42. Proyección del horizonte Pg 3.</i>	67



INDICE DE TABLAS

Tabla III-1. Parámetros de adquisición sísmica de la campaña 2005. (U.T.I.G., 2013). _____ 25

Tabla III-2. Coordenadas geográficas de las líneas sísmicas empleadas en el desarrollo de esta tesis. _____ 26



RESUMEN

A partir de 1980, el cráter de impacto de Chicxulub ha sido objeto de numerosas investigaciones para conocer su origen, el cambio en las condiciones ambientales de esa época, su estructura, estratigrafía y caracterización litológica de la zona de impacto. Diversas técnicas geofísicas, estudios geológicos, análisis de pozos y campañas de adquisición sísmica han contribuido en el estudio y comprensión de dicha zona.

Para este estudio, secciones sísmicas adquiridas en el año de 2005 fueron tomadas para emplear la técnica de reprocesamiento sísmico. Este proceso plantea el análisis espectral y, a partir de este, elaborar mejor la relación señal – ruido para aplicar una posterior deconvolución y ecualización de los datos. Finalmente, se tomará la sección de mayor longitud, transversal al cráter de impacto, para aplicar una serie de atributos sísmicos y así caracterizar y analizar la calidad e interpretabilidad que se puede hacer en la sección sísmica Chicx 09. Con las demás secciones sísmicas reprocesadas se delimitarán los principales horizontes (Interfase K/Pg, antes conocida como K/T, y las secuencias carbonatadas del Cenozoico), para presentar una visualización en tercera dimensión de dichos horizontes.

Con el reprocesamiento de las secciones sísmicas se aprecia una recuperación en los reflectores, permitiendo una mejor visualización y caracterización de las principales unidades en el área del cráter a través de los atributos. Por lo que, el método aplicado en este trabajo puede servir como base para continuar el estudio y análisis en la caracterización sísmica de los perfiles ya adquiridos.



ABSTRACT

Since 1980, the Chicxulub impact crater has been the subject of researches to know its origin, the change in the environmental conditions, structure, stratigraphy and lithological characterization of the impact zone. Various geophysical techniques, geological studies, well analysis and seismic acquisition campaigns have contributed to study and understand this area.

For this study, seismic sections acquired in the year 2005 were taken to employ the technique of seismic reprocessing. This process raises the spectral analysis and develop better signal - noise ratio to apply a subsequent deconvolution and equalization of the data. Finally, the longest section, transverse to the impact crater, will be taken to implement a number of seismic attributes to characterize and analyze the quality and interpretability in the seismic section, Chicx 09. In addition with the other seismic sections reprocessed, major horizons were delimited (Boundary K/Pg, formerly known as K/T boundary, and Cenozoic carbonate sequences), to present a three-dimensional visualization of these horizons.

A substantial recovery on reflectors can be appreciated with the reprocessing of seismic sections, allowing a better visualization and characterization of the principal geological units in the area of the crater through the application of seismic attributes. Therefore, the method applied in this work can be used as a basis for further studies and analysis in the seismic characterization of the profiles already acquired.



I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la prospección sísmica en la actualidad ocupa un lugar importante para el desarrollo de la sociedad en muchos aspectos e intereses. Es por ello que para el geofísico es de suma importancia comprender los principios, aplicaciones y avances de este método para una mejor calidad de resultados, mucho más fiables y que nos permitan caracterizar objetivos de manera acertada, pronta, eficaz y contribuyan al desarrollo de la investigación y de la sociedad.

A partir de la sísmica, se pueden obtener parámetros de atributos sísmicos y de propiedades petrofísicas del subsuelo para caracterizar posibles zonas de interés con fines petroleros y/o de conocimiento geológico. La sísmica se apoya de manera importante de los registros de pozo para una mejor interpretación de la zona de estudio.

El desarrollo tecnológico ha permitido un mejoramiento sustancial en la prospección sísmica, desde su etapa de adquisición hasta la etapa de procesamiento e interpretación. Para datos sísmicos adquiridos en años anteriores se plantea un reprocesamiento sísmico con el objetivo de mejorar la calidad de la imagen sísmica, recuperando información y mejorando la relación señal-ruido.

En años recientes, se ha propuesto implementar la deconvolución post-migración como un procesamiento estándar para mejorar la resolución en los datos sísmicos, dicho método se emplea en este trabajo para evaluar la eficiencia en el mejoramiento de la señal sísmica. Cabe mencionar la importancia en la selección de los parámetros para que este mejoramiento no agregue artefactos a la información sísmica o produzca el fenómeno de aliasing y afecte su interpretabilidad.

El reprocesamiento sísmico de las secciones servirá como base para la comparación y la aplicación de los atributos sísmicos con el objetivo de obtener una mejor resolución y así poder aplicar las herramientas pertinentes que permitan realizar la caracterización adecuada por medio de los atributos sísmicos.

Los atributos sísmicos se han convertido en una herramienta analítica útil para la caracterización del medio, aunque estrictamente no se ha establecido una relación directa entre todos los atributos y las características geológicas-físicas de la Tierra (Taner M. T., 2001).



Las condiciones geológicas en el límite Cretácico-Paleógeno cambian drásticamente debido a la evolución tectónica ocurrida durante este periodo. Estratigráficamente se presenta una alteración en las secuencias de depósitos carbonatados, existiendo una brecha dentro de estas secuencias que se extiende ampliamente sobre el Sur del Golfo de México, alcanzando espesores de 700m. (Arenillas et al., 2006). Diversos estudios en la zona aportan evidencia de la existencia de un cráter de impacto de hasta 200km de diámetro, con lo que se ha planteado la teoría de que dichas características geológicas de la zona son producto del material eyectado por el impacto del meteorito.

La campaña de adquisición sísmica del año de 2005 buscó determinar la dirección y ángulo de impacto, mapear las deformaciones y fallas registradas en la corteza superior cerca del centro del cráter y modelar el colapso del cráter para estudiar los cambios geológico-ambientales, como efectos del impacto.

Al emplear estas herramientas para el análisis de los datos, se incrementa la eficiencia en la interpretación, por medio de la extracción de patrones relacionados con rasgos geológicos, brindando información de calidad y con una mayor confiabilidad.

II ÁREA DE ESTUDIO

II.1 PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN

II.1.1 Localización

Localizado unos kilómetros al Este de Puerto Progreso, se ubica entre los paralelos 16° y 22° de latitud Norte y los paralelos 86° y 91° de longitud Oeste con respecto al meridiano de Greenwich (Figura II.1). Tiene un extensión aproximada de unos 300 000 km², corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental y separa al Mar Caribe del Golfo de México.

Los límites geomorfológicos de esta plataforma se encuentran en el Norte y parte Noroeste del talud continental del Banco de Campeche, al Sur incluye el Petén de Guatemala y las montañas de Belice, al Oriente por el talud continental del mar del Caribe, al Oeste la planicie costera del Golfo de México.

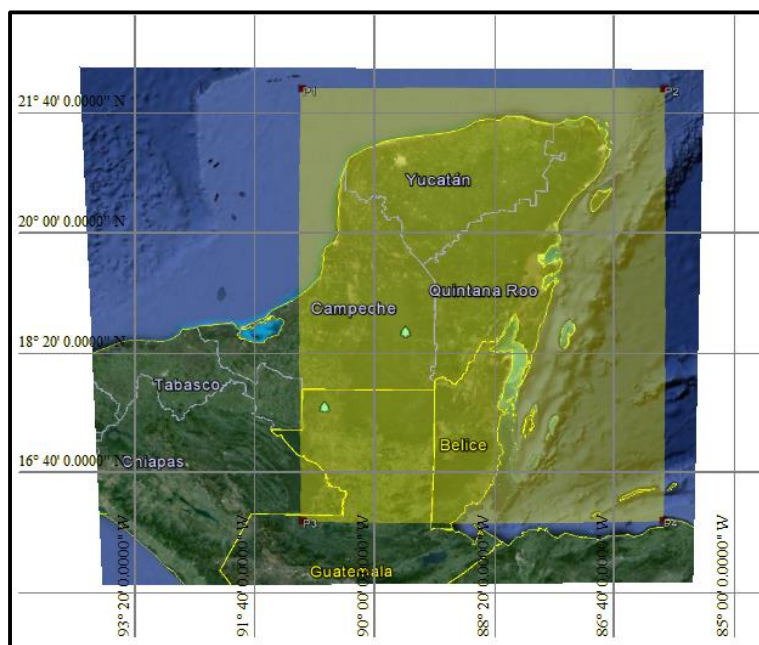


Figura II.1. Localización y extensión geográfica de la plataforma carbonatada de Yucatán.
(Modificado de Google Earth, 2014).

Su formación se debe a depósitos marinos que posteriormente emergieron; carece de drenaje superficial debido a que en su mayoría está formada por material calcáreo. Por esta razón, el escurrimiento fluvial es subterráneo,

originando un sistema de formas cársticas (cenotes y grutas de agua subterráneas) (Morgan & Warner, 1997; Vermeesch & Morgan, 2008).

El bloque de Yucatán es tectónicamente único, sin plegamientos o actividad volcánica. Se caracteriza por un relieve plano y suavemente ondulado de baja altitud y con una porción de ésta bajo el nivel del mar. La mayor parte de la Plataforma emergida se encuentra por abajo de los 50 m.s.n.m. y presenta un basculamiento ligero de Sur a Norte. La sierra de Ticul alcanza un relieve máximo de apenas 100 m.s.n.m. Su superficie está marcada por multitud de elementos cársticos y cubierta por una gruesa capa de caliche. Carece casi en lo absoluto de líneas de drenaje superficial, pues únicamente existe el Río Champotón-Río Escondido y otros de menor caudal en la parte sur, todos asociados con el sistema de fallas Bacalar o Río Hondo. Su parte sumergida bajo las aguas del Golfo de México tiene un ancho máximo de 180 km frente a las costas del norte de Yucatán (Figura II.2) (Perry et al., 2003).

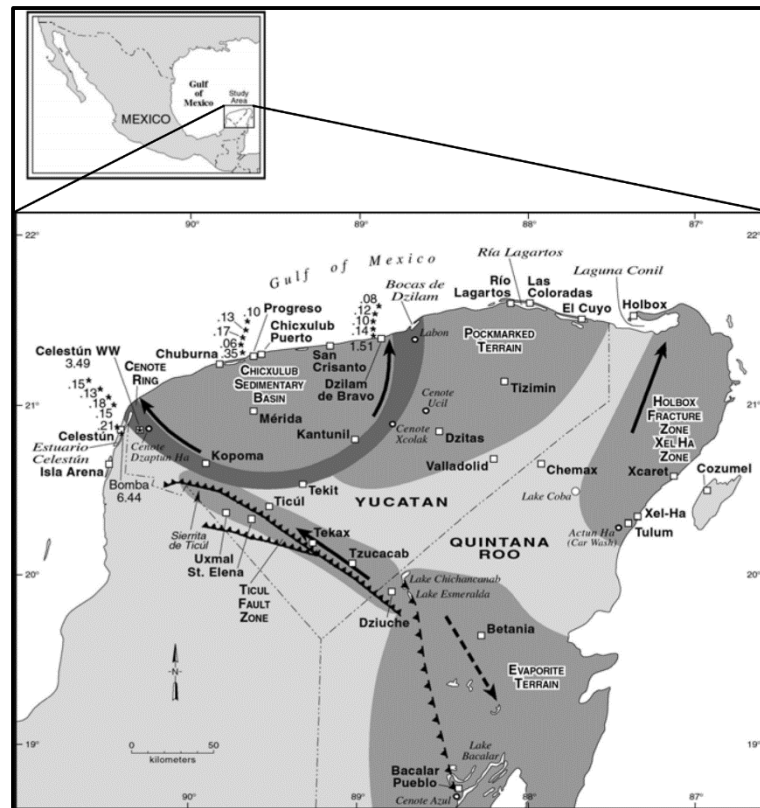


Figura II.2. Geomorfología de la Península de Yucatán. (Perry et al., 2003).



II.1.2 Geología Regional

La Plataforma de Yucatán es un extenso banco carbonatado cuyo desarrollo inicia en el Mesozoico. La estratigrafía regional se describe como un Basamento cristalino-volcánico Pan-Africano, depósitos clásticos y, posteriormente, un predominio de facies carbonatadas y evaporíticas durante el Cretácico y Cenozoico. El basamento de esta plataforma aflora solamente en la parte Sureste de Belice, en la zona de las montañas Mayas. En México se ha identificado y fechado mediante el análisis de muestras de pozos realizados en la zona.

Durante el Paleozoico Tardío se acumuló una capa gruesa de sedimentos marinos. Estos consisten en lechos rojos continentales que descansan directamente sobre el basamento Paleozoico. A partir de las reconstrucciones paleográficas para el Mesozoico Temprano, se establece que el bloque de Yucatán se localizaba en la parte Norte y se separó de la unidad Luisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México. La correlación regional con unidades semejantes al SE de México (Formación Todos los Santos) les asigna una edad del Jurásico Medio – Tardío (Padilla-Sánchez, 2007).

De manera discordante sobre estas rocas continentales reposa una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas del Cretácico, interrumpida abruptamente por los depósitos del límite K/Pg asociados con el impacto de Chicxulub (Formación Chicxulub). Salvo esta interrupción catastrófica, en la sedimentación del Cretácico Superior se encuentran una serie de carbonatos fuertemente dolomitizados y evaporitas, con una delgada capa de arenisca, cuya fauna pertenece desde el tipo lagunar hasta depósitos post-arrecife (Álvarez, 1966).

En el Cenozoico se puede apreciar la Formación Icaché, del Paleoceno-Eoceno inferior. Dicha formación se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas, o bien, simplemente recrystalizadas, lo que explica la ausencia de fósiles (Álvarez, 1966).

Para el Eoceno Medio y Superior se tiene la Formación Chichen Itzá. Las rocas de esta formación son calizas con abundante fauna, presentan ligeras variaciones litológicas lo que permite dividirla en tres miembros: Miembro Xbacal, Miembro Pisté y Miembro Chumbec; fue depositada sobre una base casi plana, por lo que no ofrece grandes variaciones en los ambientes de depósito y sólo se diferencia a través de su microfauna (Álvarez, 1966).

Para el Oligoceno Inferior los depósitos son de calcarenitas con espesores de 1 a 1.5 m. El Oligoceno Superior está constituido por calizas y calcarenitas coquinoideas, con abundantes restos de moluscos, briozoarios, algas y miliólidos (Álvarez, 1966).

La formación Bacalar pertenece al Mioceno Inferior y consiste de calizas blandas, pero con nódulos duros que pueden formar verdaderos niveles, éstas pasan a margas blancas en los niveles inferiores y a veces se presentan finas capas de yeso. (López Ramos, 1975).

Los depósitos del Pleistoceno y Holoceno corresponden a calizas coquiníferas masivas. Su fauna comprende sobretodo moluscos. Las calizas consolidadas son correlacionadas con el Pleistoceno, mientras que las capas superiores más blandas y costeras pertenezcan a un periodo más reciente. El Cuaternario igualmente está representado por carbonatos aunque carente de evaporitas.

La figura II.3 describe de manera regional la estratigrafía que predomina en la Plataforma de Yucatán.

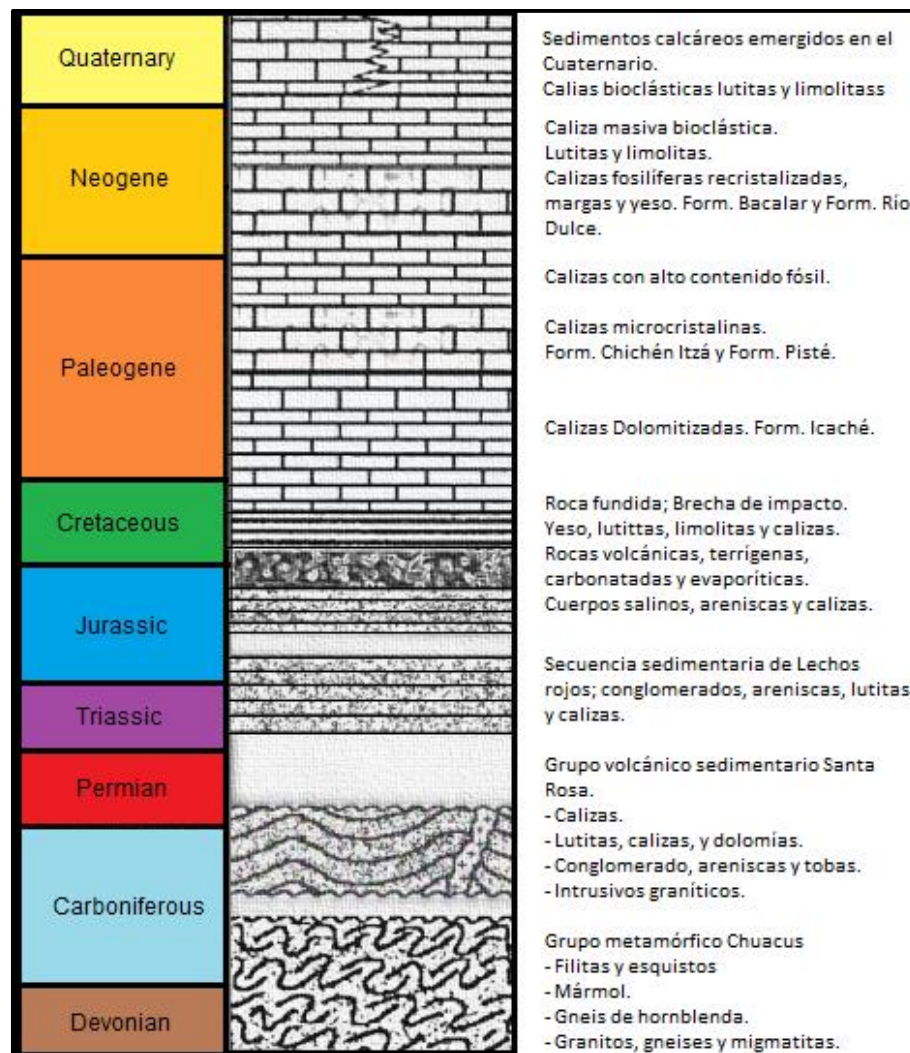


Figura II.3. Columna estratigráfica regional de la Península de Yucatán. (Modificado de López Ramos, 1975).



II.1.3 Geología Local

A través del análisis de pozos, principalmente de los pozos Yaxcopoil-1, Yucatán-6 y Quintana Roo-1, y de diversos estudios geofísicos realizados en la zona, se ha establecido un modelo esquemático estratigráfico (Figura II.4), el cual ha permitido correlacionar la información de los estudios geofísicos con la geología que se encuentra en la zona de impacto del cráter Chicxulub. Sin embargo, se reconoce que es una proyección lejana de los datos estratigráficos, especialmente dada la variación estratigráfica sísmica observada en las diferentes direcciones de estudio.

Las secuencias catalogadas a través de estos estudios se describen a continuación.

Basamento. Esta unidad es cristalina metamorfizada, rica en cuarzo (granitos y gneisses graníticos) con pocos sulfatos. Yace debajo de la secuencia Mesozoica con profundidad de alrededor a 30km (López Ramos, 1975) y corresponde al Precámbrico-Paleozoico.

El granito se encuentra mayormente en la parte superficial, alrededor de 3000m, (moreno-Hertz, 1988), de acuerdo con núcleos del pozo Quintana Roo-1. El gneiss granítico figura en mayor proporción hacia el basamento, constituido por feldespato alcalino (80%), cuarzo (10%), a más de 4700m de profundidad (Sharpton, et al., 1992).

Secuencia Carbonatada Mesozoica (C). Esta secuencia tiene un espesor aproximado de 3km, está compuesta por aproximadamente 35-40% de dolomitas, 25-30% de calizas, 25-30% anhidritas y 3-4% de areniscas y lutitas. (Ward et al., 1995).

Secuencia Carbonatada Cenozoica (Pg1, Pg2, Pg3). Ésta unidad era considerada anteriormente como la secuencia carbonatada Terciaria pero, debido al arreglo en la carta cronoestratigráfica en años recientes, ha sido catalogada como Cenozoica o, más específicamente, Paleógena (Pg) (Arenillas et al., 2006).

Está compuesta principalmente de calizas, carbonatos y calcarenitas con diferentes grados de dolomitización y algunos horizontes fosilíferos (Rebolledo et al., 2000).

Roca de Fusión "Melt" (M). Es una roca ígnea de fusión por impacto, completamente cristalina constituida por piroxenos, en cristales de hasta 70 micras de largo, plagioclasas, en cristales de hasta 200 micras de diversa morfología, feldespatos alcalinos y cuarzo; además de los minerales accesorios magnetita, ilmenita, epidota, titanita, pirita, apatita, calcopirita y aluminosilicatos

hidratados ricos en hierro y magnesio (Lounejeva, 2001). La composición de esta roca es similar a la corteza continental (Hildebrand et al., 1991).

Brecha tipo Bunte (B). La matriz está compuesta principalmente de carbonato, calizas cristalinas (dolomita y evaporita) y anhidrita. Los clastos tienen la misma composición que la matriz, su distribución es altamente heterogénea y con un tamaño de gravo hasta bloque (superior a 25cm) (Rebolledo et al., 2000).

Brecha tipo Suevita (S). Tiene la composición de la matriz similar a la de sus clastos, los cuales contienen basamento cristalino, roca de fusión, vidrio de impacto y ocasionalmente carbonatos. El tamaño de los clastos varía de gravo a bloque (superior a 5 cm de diámetro) y su forma es angular o semiredonda (Rebolledo et al., 2000; Schuraytz et al., 1994).

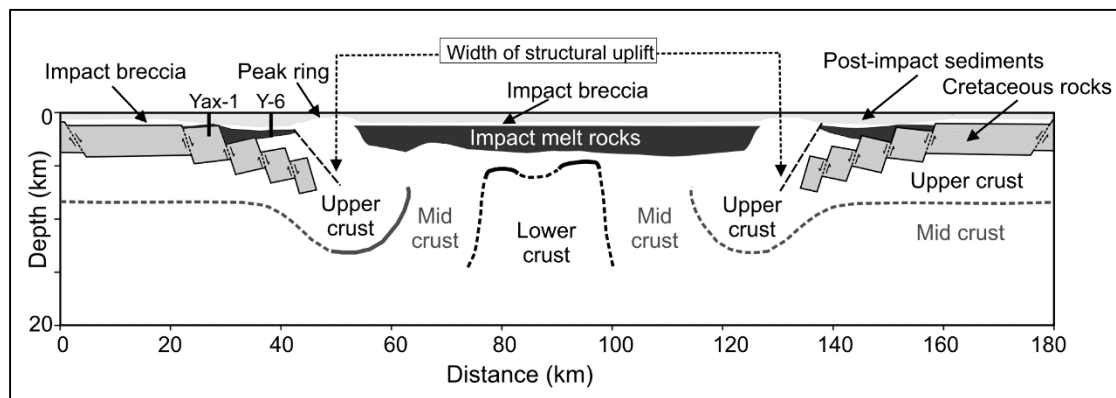


Figura II.4. Modelo esquemático del Cráter de Chicxulub. (Vermeesch & Morgan, 2008).

II.2 CRÁTER DEL CHICXULUB

A partir de estudios geofísicos, geológicos y de registros de pozos se ha logrado documentar un cráter de grandes dimensiones al Noroeste de la Península de Yucatán. Dicho cráter yace por debajo del nivel del mar y contiene información del final de la Era Mesozoica.

La teoría de la extinción masiva del Cretácico-Paleógeno fue propuesta en 1980 por L. Álvarez, W. Álvarez, F. Asaro, y H. Michel quienes sugirieron que la extinción se debió a los efectos de un meteorito de grandes dimensiones (unos 10 kilómetros de diámetro). A partir de esta teoría se han desarrollado múltiples investigaciones para analizar y comprobar dicha teoría.

El cráter de la península de Yucatán tiene unos 200 kilómetros de diámetro (Figura II.5), con su centro cercano a Chicxulub, y por sus dimensiones, el cráter

de Chicxulub representa el registro de uno de los mayores impactos ocurridos en los últimos mil quinientos millones de años.

Los estudios realizados sobre la estructura del cráter han permitido estimar la edad del impacto, la geometría y características del cráter, así como sus relaciones con depósitos Cretácico-Paleógeno (K/Pg) en las regiones adyacentes al Golfo de México y Mar Caribe. (Ortiz Alemán et al., 2002).



Figura II.5. Localización del impacto de meteorito Chicxulub con un diámetro aproximado de 10Km, formando un cráter de unos 200Km de diámetro aproximadamente. (Ocampo et al., 1996).

II.2.1 Los Cráteres de Impacto Terrestres

La formación de cráteres por impacto es un proceso geológico en el que una gran cantidad de energía es liberada sobre una región de área pequeña, en un tiempo muy corto. La magnitud de la energía liberada depende principalmente de la velocidad y el tamaño del objeto impactante. Esta energía se convierte en presiones que pueden sobrepasar los 100 GPa y temperaturas que pueden alcanzar varios miles de grados centígrados. (Grieve R. , 1990). Estas condiciones propician los procesos de metamorfismo por impacto las cuales dependen de la velocidad y ángulo de impacto (Figura II.6).

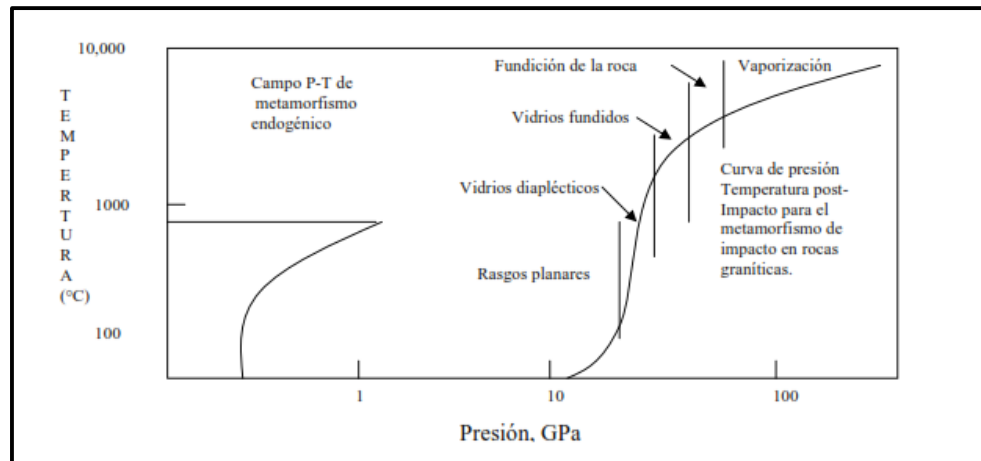


Figura II.6. Régimen de presión-temperatura post impacto para los efectos de metamorfismo de impacto en rocas graníticas y su comparación con el metamorfismo terrestre normal. (Grieve & Pesonen, 1992).

En la petrogénesis del cráter de Chicxulub, con base en estudios mineralógicos de dos facies de impactitas tomadas a una profundidad de 1400m, se ha reportado roca-blanco sometida a una presión dinámica de 5 a 50GPa y temperaturas residuales de hasta 1700°C (Lounejeva, 2001).

II.2.2 Características de los Cráteres de Impacto

Las dos formas básicas de los cráteres de impacto se conocen como simple y compleja. El diámetro y la profundidad del cráter simple varían dependiendo de la naturaleza de la roca objetivo. Se ha observado que los cráteres en rocas sedimentarias llegan a medir hasta 2km mientras que, en rocas cristalinas, los cráteres llegan a tener diámetros de hasta 4km (Dence, 1972).

Los cráteres con diámetros mayores a cuatro kilómetros exhiben los rasgos característicos de los cráteres complejos. Estos cráteres llegan a ser cientos de veces más anchos que profundos. Los cráteres complejos poseen un levantamiento central circundada por una depresión anular y un borde fracturado siguiendo patrones de fallamiento normal. Entre la estructura central y el borde existen varios materiales colisionados (Grieve R. , 1990). En la Figura II.7, se muestra un esquema geológico de un cráter complejo donde se incluyen sus principales rasgos estructurales.

Los subgrupos morfológicos principales de cráteres de impacto complejos se clasifican de acuerdo a su diámetro y son:

- Cráteres de cresta central.
- Las cuencas con cresta central y con un anillo circundante.
- Las cuencas con cresta anular con solamente un anillo.
- Las cuencas multianilladas.

La formación de los cráteres complejos se puede clasificar en cuatro etapas: excavación, levantamiento, colapso y su forma final. Durante la excavación se forma una cavidad de transición similar a la de los cráteres simples. El colapso de la cavidad, sin embargo, es mucho más severo e involucra un volumen importante de rocas exteriores a la cavidad. La modificación de la cavidad sucede simultáneamente con el levantamiento de su piso (efecto rebote) y forma una estructura central, que posteriormente colapsa para adoptar una forma en equilibrio con relieve positivo en el centro. El levantamiento en el centro de un cráter complejo llega a ser de aproximadamente una décima parte del diámetro final del cráter (Grieve R. , 1990). El borde final del cráter está delimitado estructuralmente por fallas normales y se ubica muy por fuera del diámetro de la cavidad de transición. Entre la estructura central y el borde existen varios materiales transformados por el impacto: rocas fundidas, brechas y material fragmentado. (Grieve & Pesonen, 1992).

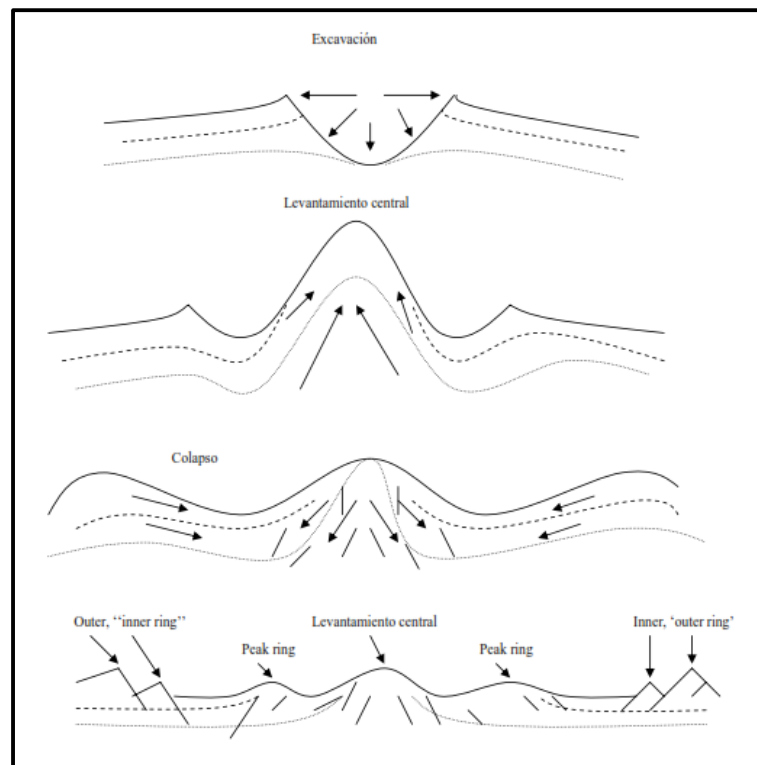


Figura II.7. Diagrama de formación de un cráter complejo. (Grieve & Pesonen., 1992).



II.2.3 Cráteres de Impacto y sus Anomalías Geofísicas

Los cráteres terrestres poseen un conjunto de características geofísicas que son principalmente resultado del paso de una onda de choque y del fracturamiento inducido por el impacto. Este conjunto incluye bajos gravimétricos, magnéticos y disminuciones en la velocidad de las ondas sísmicas (Ortíz Alemán et al., 2002). En los grandes cráteres complejos, se ha observado una anomalía gravimétrica con un alto central, muy probablemente debido al levantamiento central, y anomalías magnéticas centrales de corta longitud de onda relacionadas a diferentes procesos (Pilkington & Hildebrand, 2000). La anomalía gravimétrica para ambos tipos de cráteres puede ser modelada utilizando parámetros morfométricos conocidos para estructuras de impacto.

Las anomalías magnéticas tienen un patrón complejo. El efecto dominante es un bajo magnético debido a una reducción en la susceptibilidad. Las estructuras grandes, de diámetros mayores a los 40 km, tienden a exhibir anomalías centrales de alta amplitud, debido a cuerpos con magnetización remanente en las rocas golpeadas. Las fuentes de estos cuerpos son diversas e incluyen efectos de choque, calor y alteración química (Pilkington et al., 1994). Algunos estudios con métodos eléctricos en cráteres de impacto muestran bajos resistivos que coinciden con la extensión de las anomalías de campo potencial y se relacionan con el fracturamiento (Campos-Enriquez et al., 1997).

Los métodos sísmicos, particularmente de reflexión, han proporcionado detalles acerca de la estructura de los cráteres de impacto (Morgan & Warner, 1999). En sus análisis se presentan reflexiones incoherentes y velocidades sísmicas reducidas debidas al brechado y fracturamiento (Christeson et al., 1999).

III MARCO TEÓRICO

Los fundamentos teóricos para el análisis de una señal sísmica radican en la Teoría de la elasticidad, la cual establece que la propagación de las ondas sísmicas depende de las características elásticas del medio por el cual atraviesa la energía en su viaje a través del subsuelo, y la Teoría de las ondas acústicas, la cual establece que la onda es susceptible a ser reflejada y transmitida a través del medio.

Este análisis considera al subsuelo como un medio homogéneo e isótropo y a las ondas sísmicas como pulsos de energía que se propagan a través de éste, para así poder tener una simplificación matemática y un significado que permita entender el comportamiento de la onda en el medio por el cual se propaga.

III.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN

El principio de Huygens considera a las interfases con diferentes propiedades como fuentes secundarias generadoras de frentes de onda, donde la trayectoria de rayo será la del mínimo tiempo de recorrido (Principio de Fermat).

La Ley de Snell toma estos principios para establecer la relación entre el ángulo de incidencia del frente de onda y los ángulos de las ondas generadas al interactuar el frente de onda con un medio de diferente impedancia. Donde el desplazamiento de una onda a través de un punto (A), en un medio con velocidad v_1 , al interactuar con una interfase de velocidad distinta (v_2), genera una onda reflejada y una onda transmitida (Figura III.1), lo que modificará la trayectoria y, por lo tanto, también el tiempo de recorrido de la onda a través del medio.

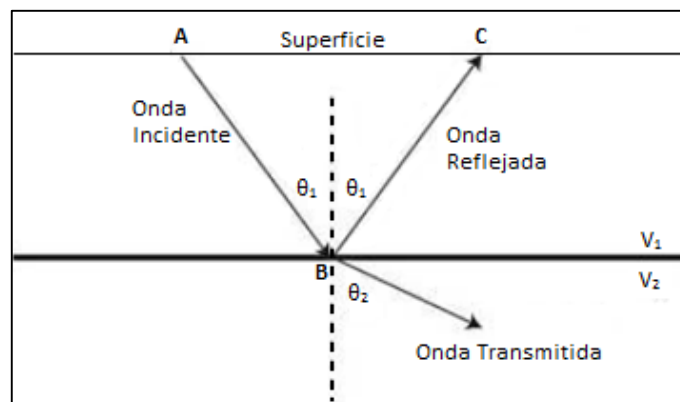


Figura III.1. Esquema de la geometría de las ondas reflejadas y transmitidas. (Modificado de Kearey et al., 2002).

La relación entre el ángulo de incidencia (θ_1) y el ángulo de transmisión (θ_2), está dado por la ecuación:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad \text{Ec. III.1}$$

Partiendo de la figura III.1 se define el tiempo total de trayectoria como el tiempo transcurrido para recorrer la distancia de la superficie (punto A) a la capa reflectora (punto B) y la distancia de este punto a otro punto en la superficie (punto C), con una velocidad promedio de propagación entre la superficie y la capa reflectora.

III.2 TRAZAS SÍSMICAS (GATHERS)

Las trazas sísmicas contienen las amplitudes de los reflejos producidos por la incidencia del frente de onda en las distintas capas del medio y su posterior arribo a la superficie. El conjunto de trazas sísmicas es conocido como gather sísmico y a partir de este se puede realizar el estudio de atributos, características petrofísicas y del comportamiento de la amplitud a través del medio.

En el gather se puede obtener información de las ondas P y S mientras que, una vez apilado, solamente se tiene información de la onda P.

Los gathers pueden tener diferentes arreglos (Figura III.2), ya sea que se encuentren en el dominio del CSP (Common Shot Point) donde el conjunto de trazas es ordenado respecto a una misma fuente, en el dominio del CMP (Common Mid Point) donde las trazas sísmicas son ordenadas respecto a un mismo punto imaginario en la superficie que representa la distancia media entre la fuente y el receptor, CDP (Common Depth Point) el cual es ordenado de la misma manera que el CMP pero el punto imaginario sobre el cual se agrupan el conjunto de trazas se ubica en la superficie de la primera capa reflectora. Y, mucho menos frecuentes, los gathers pueden ser ordenados en el dominio del CRP (Common Receiver Point) donde se agrupan todas las trazas registradas en el mismo receptor, o en el dominio de COP (Common Offset Point) donde el conjunto de trazas tienen el mismo espaciamiento (offset) fuente/receptor (Vermeer, 2012).

El acomodo de las trazas sísmicas en el gather sufre un ligero desfaseamiento en la posición del reflejo dependiendo del tipo de gather. Es vital tener presente el tipo de arreglo con el que se dese trabajar para, posteriormente, realizar su corrección pertinente y que el registro de las trazas pertenezcan a un mismo evento y no se distorsione la información del subsuelo.

Idealmente, la traza sísmica registrada es la convolución de la ondícula sísmica, la cual viaja de la fuente a través del subsuelo, con la serie de coeficientes de reflexión, derivados de las propiedades (en particular la densidad y la velocidad sísmica) de las diferentes capas de roca que atraviesa la energía sísmica.

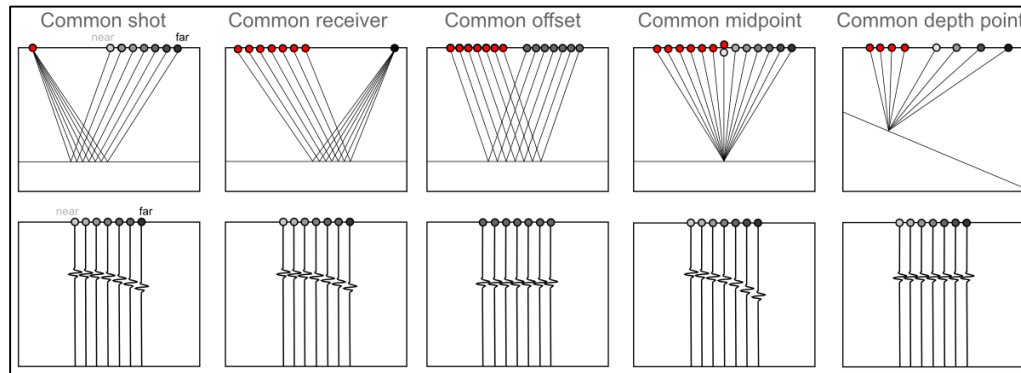


Figura III.2. Tipos de Gathers y sus variaciones en el ordenamiento de las trazas sísmicas (Chelotti et al., 2009).

III.3 APILAMIENTO

Es la suma del conjunto de trazas sísmicas, que pertenezcan a un mismo punto de reflexión, para formar una nueva traza singular que represente una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo (Figura III.3) y, matemáticamente, se puede representar como si todas las trazas sísmicas fueran adquiridas con un offset cero.

En función de proveer una relación señal/ruido mejorada, la sísmica requiere información acertada sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidad. Este proceso se realiza sobre un conjunto de gathers determinados. El resultado del análisis es un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica. Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente.

El número de trazas que han sido sumadas durante el apilamiento es llamado "fold".

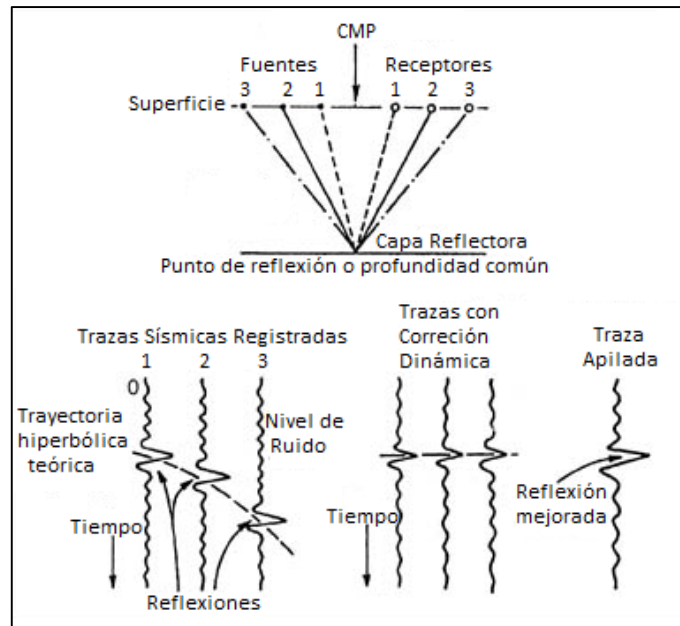


Figura III.3. Proceso de apilamiento de las trazas sísmicas al realizar los procesamientos pertinentes para limpiar la información sísmica y acomodar los reflectores a su posición original. (Modificado de Schlumberger, 2009).

III.4 PROCESAMIENTOS SÍSMICOS

El propósito del procesamiento sísmico es manipular los datos adquiridos con el objetivo de incrementar la resolución, mejorar la relación señal – ruido, y mostrar los eventos sísmicos en su posición espacial correcta. Consiste en aplicar una serie de rutinas computacionales (Flujo de Procesamiento) a los datos, estos procesamientos se apoyan en fundamentos teórico – matemáticos que ayudan a conceptualizar el comportamiento del frente de ondas en su propagación a través del subsuelo.

Los procesamientos sísmicos generalmente tienen como objetivo:

- Mejorar la señal sísmica disminuyendo todas las afectaciones que puedan estar presentes en los datos.
- Proveer información acerca de la velocidad del medio.
- Colapsar las difracciones y posicionar los eventos en su verdadera locación del subsuelo (migración).
- Incrementar la resolución de la imagen sísmica.
- Un flujo de procesamiento es un conjunto

Con base en las características del medio, los parámetros iniciales de las fuentes de energía, la sofisticación del equipo que registre los datos, el arreglo geométrico empleado, etc., se seleccionan los procesamientos y sus parámetros pertinentes para la corrección y mejoramiento de la imagen sísmica.

En la figura III.4 se puede apreciar la secuencia de procesamiento. Sin embargo, las secuencias de procesamiento no cuentan con una metodología a seguir, por lo que, dependen de las características que se buscan sobresaltar y de la calidad que presenten los datos para discernir sobre cuáles son los procesos matemáticos más convenientes a realizar para que la imagen sísmica tenga una mejor resolución pero sin perder/inventar información que altere las características y/o atributos del medio.

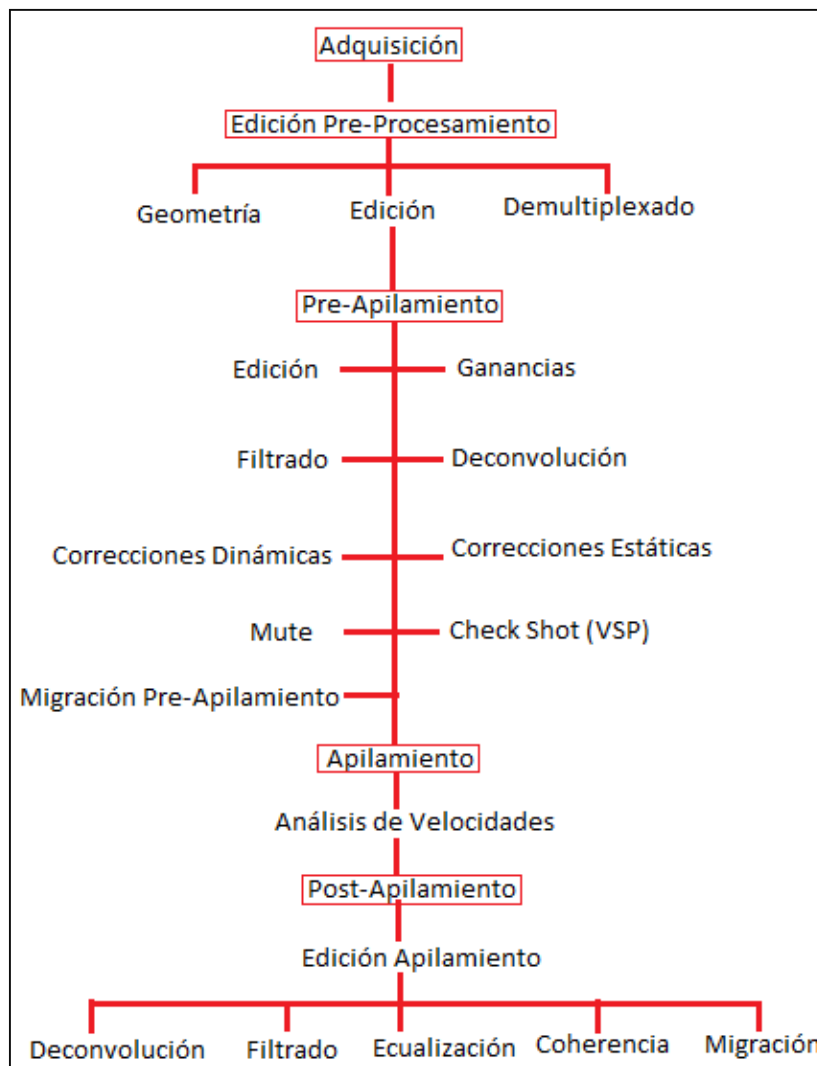


Figura III.4. Diagrama de flujo con las secuencias de procesamientos que se pueden aplicar a los datos a partir de su adquisición. (Modificado de Yilmaz, 2001).

III.5 TRANSFORMADA DE HILBERT Y LA TRAZA COMPLEJA

La transformada de Hilbert realiza un cambio de fase de -90° sobre las trazas sísmicas, es decir, convierte las ondas cosenoidales en ondas senoidales. Esta transformación puede ser realizada tanto en el dominio del tiempo (por medio de una convolución), como en el dominio de la frecuencia (sumando un cambio de fase constante de -90° al espectro de fase). Con este procedimiento matemático se puede separar la información proporcionada por la amplitud de la proporcionada por la fase.

La transformada de Hilbert puede ser vista como la parte imaginaria de la traza compleja, donde la traza sísmica representa la parte real, por lo que se le conoce como filtro de cuadratura.

$$C_t = s_t + jh_t = \text{Traza Compleja} \quad \text{Ec. III.2}$$

Donde:

$$j = \sqrt{-1}$$

s_t = traza sísmica en el tiempo t

h_t = Transformada de Hilbert de s_t , también llamada "Traza de Cuadratura"

La manera convencional de representar a la traza sísmica es como un punto en el eje horizontal del tiempo. Sin embargo, la traza compleja se considera como un punto en una gráfica de dos dimensiones, eje real e imaginario (Figura III.5).

Otra forma de representar a la traza compleja es como un vector de rotación, el cual está compuesto por una longitud y un ángulo (Forma polar). La interpretación física de la longitud del vector es la amplitud de la traza sísmica (A_t) y el vector del ángulo es la fase instantánea de la traza sísmica (φ_t).

$$A_t = \sqrt{(s_t^2 + h_t^2)} = \text{Ecuación de la Amplitud Envolvente} \quad \text{Ec. III.3}$$

$$\varphi_t = \arctan\left(\frac{h_t}{s_t}\right) = \text{Ecuación de la Fase Instantánea} \quad \text{Ec. III.4}$$

Por lo tanto, la ecuación de la traza compleja en forma polar es:

$$C_t = A_t \exp(j\varphi_t) \quad \text{Ec. III.5}$$

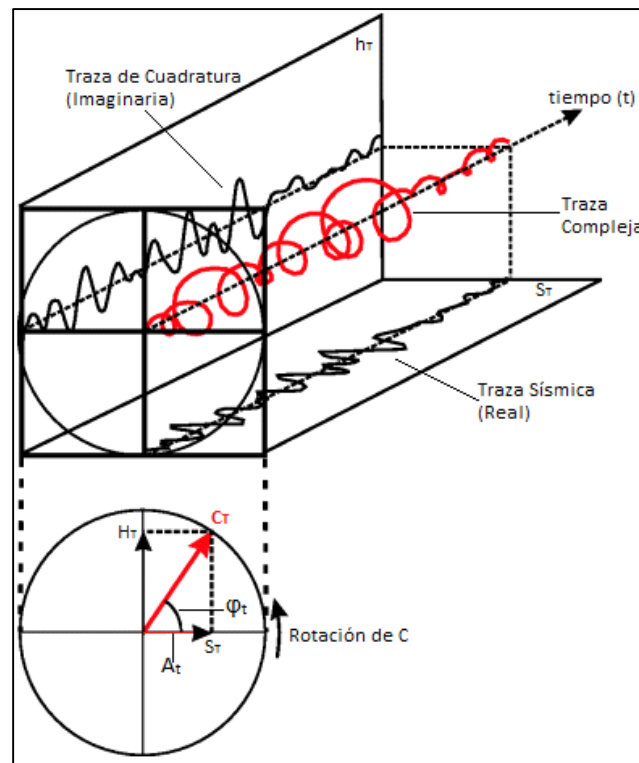


Figura III.5. Representación de la traza compleja, compuesta por la traza sísmica (parte real) y la traza de cuadratura (parte imaginaria) las cuales son proyecciones de la traza compleja.
(Modificado de Taner et al., 1995).

III.6 ATRIBUTOS SÍSMICOS

Un atributo sísmico es la medición cuantitativa de una característica de interés extraída de la información de los datos sísmicos. El propósito de éstos es inferir propiedades petrofísicas a partir de los datos sísmicos. Turhan Taner es considerado el padre de los atributos sísmicos, siendo de las primeras personas en reconocer su importancia y desarrollar su potencial.

El comienzo de los atributos sísmicos se presenta con el análisis de la traza compleja, considerando a la onda sísmica como un vector rotatorio al eje del tiempo (fasor) en el espacio (Taner et al., 1995), a partir del cual surgen los primeros atributos conocidos como atributos instantáneos y que sirven, en la mayoría de los casos, como base para el desarrollo de otros nuevos atributos. Las propiedades fundamentales del procesamiento de datos parten de la variación temporal y espacial de la amplitud de reflexión, la fase de reflexión y de la frecuencia de la ondícula (Taner et al., 1979).



Los análisis de atributos sísmicos más utilizados son aquellos que logran separar la información de la amplitud de la información de la fase (Barnes A. , 2007).

Debido al constante avance tecnológico-computacional y a la particularidad que presentan ciertas áreas de investigación, el número de atributos sísmicos desarrollados continúa en crecimiento (Figura III.6). Diversas clasificaciones se han propuesto, ya sea con base en las características dominantes que resaltan, rasgos petrofísicos o geológicos a los que respondan, características físicas o geométricas o bien, en el dominio en el que se aplique el análisis de atributos (pre-post apilamiento con/sin migración).

En los atributos pre apilamiento, la información sobre la cual se trabaja es a partir de las trazas sísmicas (gathers), cuyo contenido de información abarca también la dirección azimutal y la distancia entre fuentes y receptores (Offset) analizando la variación de la amplitud de las trazas en relación con su tiempo y posición de registro. Mientras que, en los atributos post apilamiento, la información puede estar apilada (supresión de los efectos azimutales y de offset) o migrada en tiempo, teniendo en cuenta que la información mantiene las relaciones temporales, azimutales y físicas propias de las trazas sísmicas. Para secciones migradas en profundidad, se reemplaza la frecuencia por el número de onda, que es función de la velocidad de propagación. El análisis de atributos post apilamiento es muy útil en las etapas finales de la interpretación (Chopra & Marfurt, 2005).

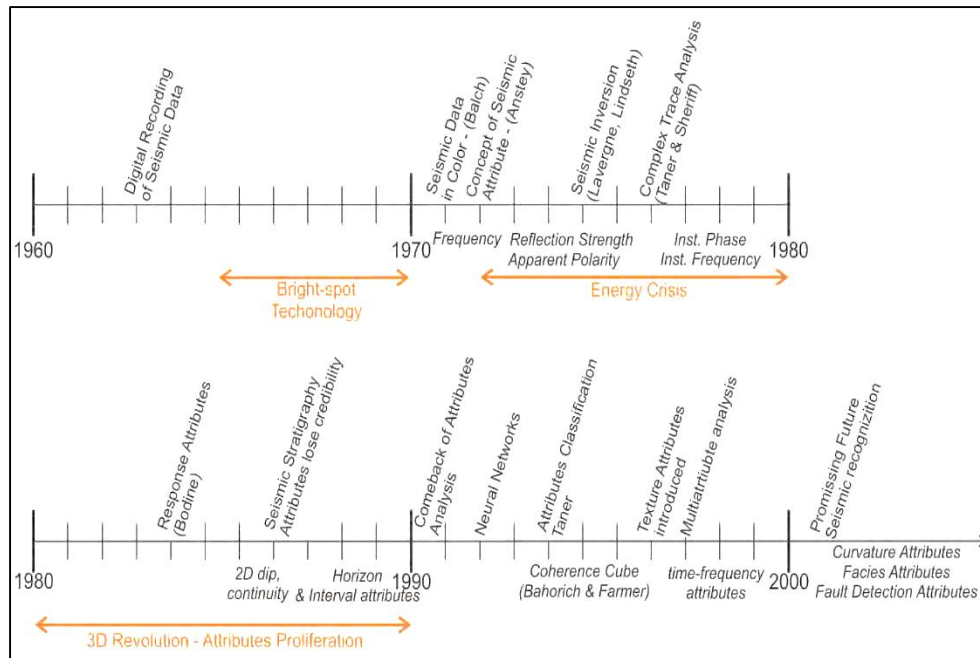


Figura III.6. Línea del tiempo del desarrollo de los atributos sísmicos y su relación con los avances en la tecnología de la exploración sísmica (Modificado de Barnes, 2001).

III.7 RESOLUCIÓN

Se refiere a qué tan cerca pueden estar dos puntos y seguir siendo distinguibles, es decir, el tamaño mínimo del reflector que se puede detectar. Existen dos tipos de resolución: vertical y lateral. Ambos son controlados por su ancho de banda espectral.

El criterio para la resolución vertical es la longitud de onda dominante, la cual es la velocidad de onda dividida entre su frecuencia dominante. La deconvolución intenta incrementar la resolución vertical por medio de la ampliación del espectro y así comprimir la ondícula sísmica.

El valor de la resolución sísmica vertical se deriva de la ecuación de longitud de onda:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{Ec. III.6}$$

Donde:

v : Representa la velocidad de la onda en un cierto medio.

f : Representa la frecuencia de la onda.

El criterio empleado para la resolución lateral se basa en la zona de Fresnel, un área circular en un reflector cuyo tamaño depende en la profundidad del reflector, la velocidad por encima del reflector y la frecuencia dominante. La migración mejora la resolución lateral disminuyendo el ancho de la zona de Fresnel, por lo tanto, separa las características que se encuentran ocultas en la dirección lateral.

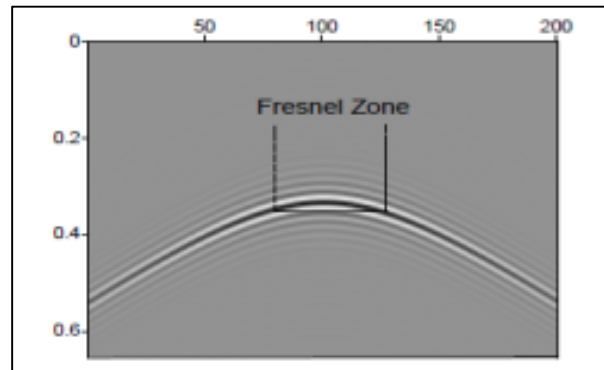


Figura III.7. Zona de Fresnel. La primera zona de Fresnel es la distancia horizontal abarcada por una longitud de onda de $\lambda/2$. (Sheriff, 1985).

IV ADQUISICIÓN DE LOS DATOS SÍSMICOS

La adquisición de datos para el análisis sísmico de una región consiste en producir, por medio de una explosión, impacto, vibración, implosión en agua, etc., microsismos que generen un frente de onda. Para la adquisición de datos sísmicos marinos estándar, un barco especialmente diseñado se utiliza para remolcar una o más fuentes de energía y uno o más grupos de hidrófonos (Figura IV.1) en un cable de arrastre. El equipo es remolcado por el buque a una velocidad constante con la fuente lo más cercana al navío, aproximadamente de 5 a 15 metros de profundidad y el cable de arrastre con un desplazamiento cerca de la fuente (Sheriff & Geldart, 1995). El cable sísmico detecta el bajo nivel de energía de la reflexión que viaja desde la fuente sísmica a través de la capa de agua, las capas de rocas en el subsuelo y que regresa a la superficie, donde son registrados por los hidrófonos.

Los hidrófonos son dispositivos sensibles a la presión que convierten estas señales de presión en energía eléctrica, que son entonces digitalizadas y transmitidas a lo largo del cable sísmico al sistema de grabación. Las diferentes señales recopiladas, llamadas trazas sísmicas, se procesan y se reordenan en puntos de reflectores comunes (CDP), los cuales contienen la información de las reflexiones. Una vez que todas las trazas de un mismo punto común se han agrupado, se suman para obtener una sola traza de punto común, que es una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se observan en forma de líneas negras de mayor/menor amplitud y definen capas reflectoras que posteriormente se asociaran a estructuras geológicas por medio del procesamiento de estos datos.

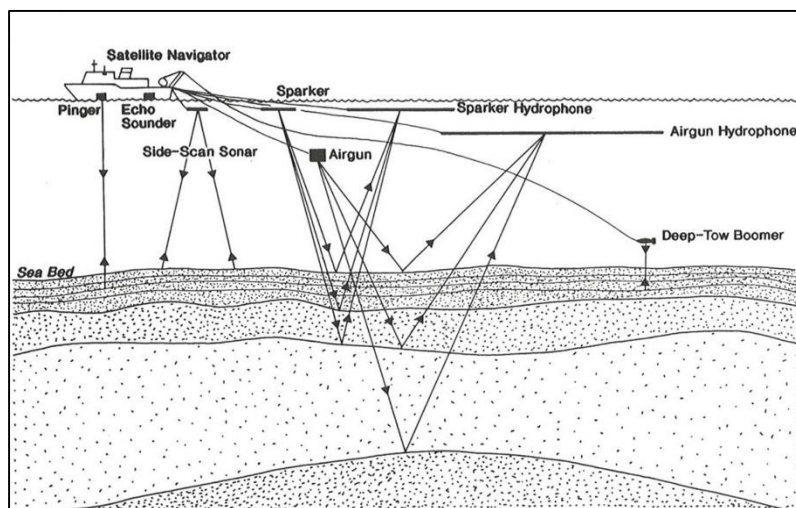


Figura IV.1. Adquisición básica de datos sísmicos marinos. (Stoker et al., 1997).

Esta energía viajará a través del medio a una velocidad determinada, variando de acuerdo a las propiedades acústicas y elásticas que este tenga (Vermeer, 2012), las ondas serán reflejadas y los tiempos de arribo se registrarán por medio de geófonos (hidrófonos para el caso marino) y serán ordenados de manera matricial y así, posteriormente, realizar el trabajo de procesamiento e interpretación.

Las nuevas técnicas de adquisición buscan el mejoramiento de la resolución sin que exista la pérdida de información, es decir, que los reflejos se puedan distinguir claramente pero que conserven la información de sus atributos sísmicos y sus propiedades petrofísicas. Sin embargo, en la adquisición de datos se registran señales que enmascaran y atenúan a las señales provenientes de los reflejos primarios por medio de la absorción o dispersión de energía. Estas señales que afectan nuestro registro (gathers) se conoce como "ruido".

El intervalo de muestreo debe ser tal que no limite el valor de la frecuencia máxima, es decir, que no presente valores coligados (aliasing). Esto surge de la ecuación de Nyquist según la cual $\Delta t = \frac{1}{2 f_{\max}}$. (Figura IV.2)

Usualmente el intervalo empleado es de 4ms y, en la actualidad, con el avance tecnológico en los sistemas computacionales, el intervalo de muestreo puede llegar a ser de hasta 2ms.

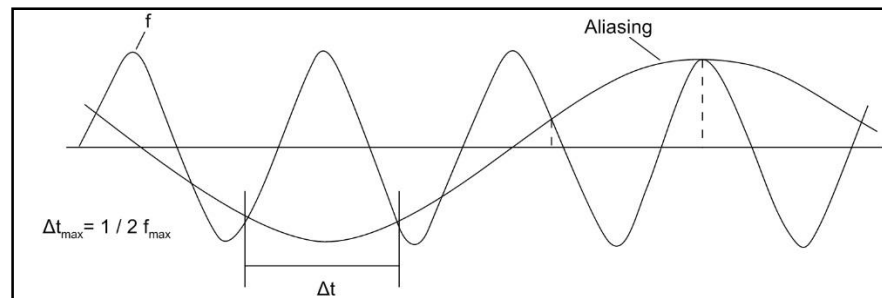


Figura IV.2. Gráfica del análisis de intervalo de muestreo con el cual se busca evitar el fenómeno de aliasing. (Chelotti et al., 2009).

IV.1 CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN 2005

En el año de 2005 se realizó un programa conjunto entre la Universidad de Texas, la Universidad Nacional Autónoma de México, el Imperial College y la Universidad de Cambridge para obtener perfiles sísmicos y así, poder estudiar la zona del cráter de Chicxulub y aportar información científica que ayude a describir las características de los eventos acontecidos.



Es importante recordar que la calidad de los datos depende de la profundidad a la que se sitúe el tendido de las pistolas neumáticas (fuentes) y el tendido de los hidrófonos (receptores) (Fontana, 2006). Situación a considerar para el diseño de la geometría de adquisición de los datos de reflexión.

La fuente de energía empleada fue conformada por un arreglo de 20 pistolas neumáticas, disparadas en sincronía a intervalos de 50m. La amplitud generada por la burbuja es proporcional al volumen del aire liberado (Fontana, 2006). Se generaron señales con una frecuencia dominante de aproximadamente 40Hz, con lo que se tuvo una resolución vertical cercana a 15.5m para profundidades menores a 1km. El tendido tuvo una extensión de 6km de con 480 canales espaciados cada 12.5m. El intervalo de muestreo fue de 2ms y se rastrearon estructuras hasta los 14s doble tiempo de viaje.

Número de canales registrados	480
Espaciamiento entre canales	12.5 m
Extensión del tendido	6Km
Tipo de fuente	Pistola de aire: Bolt 1500
Número de fuentes	20
Antena a la fuente	55.3 m
Volumen de la fuente	6,947 in ³
Presión de la fuente	138 bares
Profundidad de la fuente	6 +/- m
Tipo de receptor	Hidrófono Streamer
Profundidad del cable	7 m
Control de disparo	Distancia
Intervalo de disparo	50 m
Intervalo de muestreo	2 ms
Duración del registro	14 s (Doble tiempo de viaje)
Retraso del registro	No
Sistema de procesamiento	Paradigm Geophysical Focus

Tabla IV-1. *Parámetros de adquisición sísmica de la campaña 2005. (U.T.I.G., 2013).*



Se adquirieron 29 perfiles sísmicos de reflexión (1822Km de líneas sísmicas) categorizados en un perfil concéntrico y 3 perfiles radiales a los largo de la estructura del cráter. La figura IV.3 muestra la ubicación geográfica de los perfiles adquiridos. En la tabla IV-2, se presentan las coordenadas de los perfiles sísmicos que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo, de acuerdo a los diferentes objetivos que se plantearon con dichas líneas sísmicas.

Línea	Latitud N	Longitud W	Longitud del tendido (Km)
5	21°31'12.61"	90°11'43.37"	58.87
	21°38'13.37"	89°38'20.51"	
6b	21°32'18.45"	89°58'57.30"	29.93
	21°35'51.82"	89°41'54.97"	
8a	21°33'23.82"	89°41'15.20"	34.4
	21°37'34.25"	89°21'45.64"	
8b	21°31'22.26"	89°50'43.01"	14.89
	21°33'08.11"	89°42'16.98"	
8c	21°26'55.17"	90°11'20.47"	33.52
	21°30'59.17"	89°52'23.41"	
9	21°25'06.14"	90°14'16.94"	91.81
	21°35'59.81"	89°22'21.04"	
15	21°39'28.37"	90°08'49.47"	35.72
	21°20'27.01"	90°04'49.44"	
16	21°39'32.54"	90°04'11.81"	27.9
	21°24'41.25"	90°01'05.73"	
17b	21°35'53.72"	89°58'55.12"	19.34
	21°25'37.18"	89°56'43.46"	
18	21°39'14.66"	89°55'01.16"	18.36
	21°29'28.19"	89°52'58.5"	
19	21°39'14.66"	89°55'01.16"	8.15
	21°29'28.19"	89°52'58.50"	
21	21°45'52.62"	89°42'41.73"	28.85
	21°30'47.57"	89°39'31.57"	

Tabla IV-2. Coordenadas geográficas de las líneas sísmicas empleadas en el desarrollo de esta tesis.

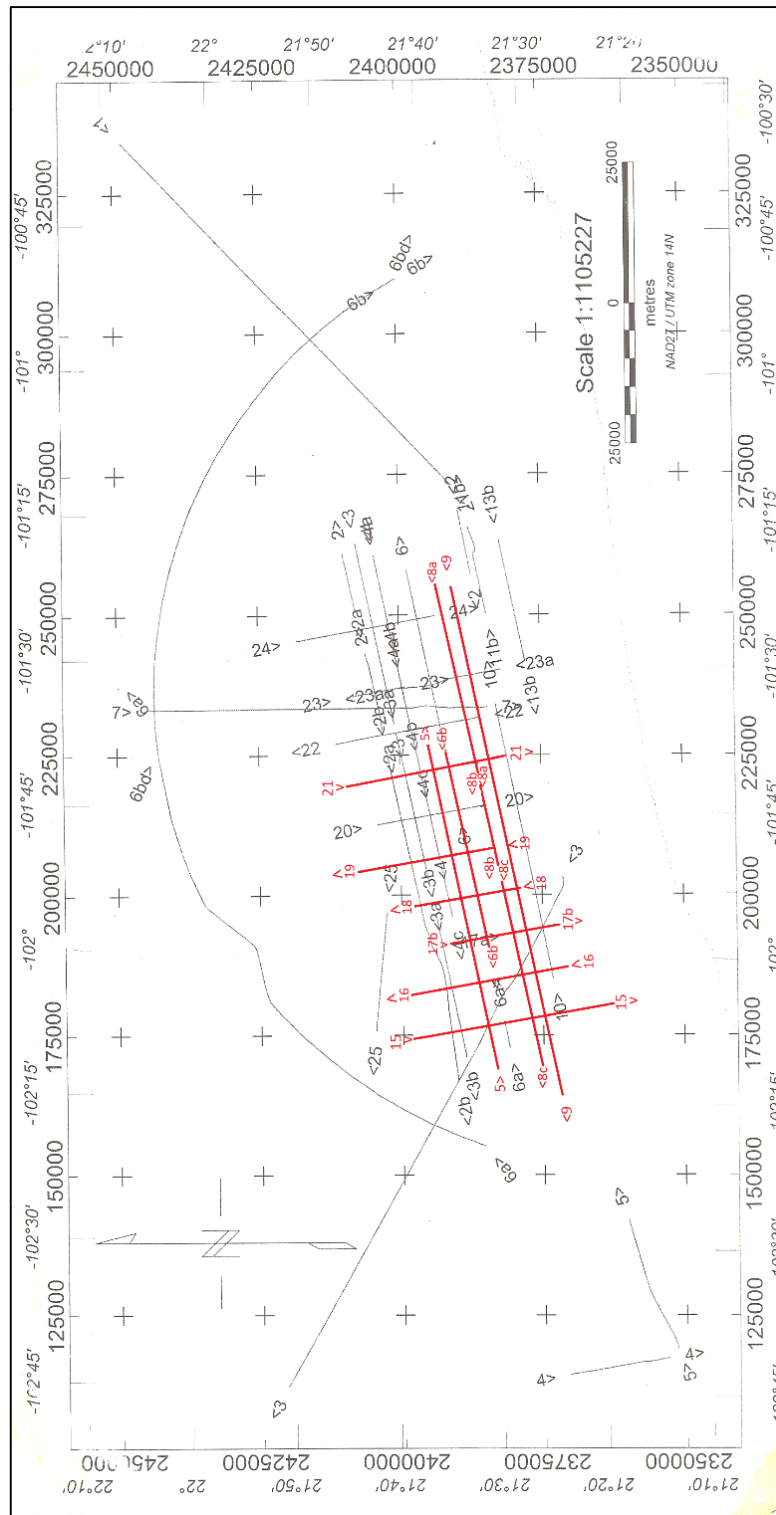


Figura IV.3. Localización de los perfiles sísmicos adquiridos en la campaña de 2005. Las líneas en rojo representan los perfiles utilizados en esta tesis.



Los datos sísmicos se registraron en formato SEG-Y y cuentan con un procesamiento pre-apilamiento realizado por el Instituto de Geofísica de la Universidad de Texas (UTIG, por sus siglas en inglés) con el programa FOCUS 5, desarrollado por la empresa Paradigm. A continuación se describe la secuencia del procesamiento:

Se realizó el demultiplexado y edición de las trazas de cada canal para eliminar aquellas que con un alto contenido de ruido. Asimismo, a cada traza se le aplicó un escalamiento (ganancia) para contrarrestar la pérdida de la amplitud de la señal causada por la divergencia esférica.

Se aplicó una secuencia de filtros, pasabandas y F-K, así como una deconvolución a razón de limpiar la señal y separar la serie de reflectividad.

El arreglo de los gathers fue de tipo CMP (Common Mid Point) con 120 trazas en cada uno de estos gathers. Este arreglo se corrigió por la distorsión parabólica que se tiene al recopilar la información en los receptores (Normal Move Out).

Se realizó el picado de los eventos más coherentes que representan las velocidades a las que se desplazan las ondas elásticas en el medio y así obtener la velocidad de cada intervalo.

Finalmente se procedió a realizar el apilamiento de las trazas y se efectuó una migración Kirchhoff en tiempo.

Después de todos los procesos a los que fueron sometidos los datos, en el capítulo siguiente se mostrará el procesamiento que se aplicó a los perfiles sísmicos seleccionados con el objetivo de mejorar la imagen sísmica para, posteriormente, describir estructuras geológicas que caractericen a la zona de impacto del cráter.



V PROCESAMIENTO Y RESULTADOS

El procesamiento sísmico post-migración intenta mejorar la calidad de imagen en la sección sísmica y eliminar los artefactos causados por el mismo método sísmico. El resultado final debe ser una sección más interpretable. La selección de los parámetros y el procesamiento de los datos sísmicos se basaron en los principios físicos del procesamiento de señales con el objetivo de obtener una imagen resolutive, con una mejor continuidad lateral en los eventos y que brinde información óptima para una interpretación geológica.

En este capítulo se describe el procesamiento aplicado a las secciones sísmicas elegidas, tomando a la sección "Chicx-09" (Figura V.3) para ilustrar y discutir los resultados de los procesamientos, así como para desarrollar la caracterización estructural y estratigráfica en la sección sísmica, que es la de mayor longitud en el estudio, la más cercana al cráter de impacto y que, por su orientación en el tendido sísmico, corta transversalmente la estructura del cráter de impacto. Posteriormente, a través de los atributos sísmicos se busca resaltar ciertos rasgos de la información sísmica que se pueden atribuir a diferentes propiedades del medio y ayudar en la caracterización de la zona. En el anexo A se encuentran las demás secciones sísmicas para comparar la imagen original con la imagen final procesada. Finalmente, se integraran las demás secciones sísmicas procesadas para la caracterización de los principales horizontes.

El intervalo para el procesamiento y la aplicación de los atributos se estableció hasta los 2000ms. Esto en función de los límites estratigráficos descritos por medio de los estudios de pozo realizados en el área de Yaxcopoil y con base en interpretaciones realizadas en estudios previos (Salguero-Hernández E. , 2008; Canales-García, 2013). Asimismo, la información sísmica en las secciones sufre un decaimiento abrupto en la señal aproximadamente a partir de los 1500ms, o bien, la información que proporciona la señal en intervalos posteriores a los 2000ms se ve afectada por la huella de adquisición, afectación del frente de onda a la información sísmica (Figura V.1). Por lo que, el intervalo se estableció en función de mantener la coherencia en la información sísmica a lo largo de un intervalo constante, así como delimitar la zona de interés.

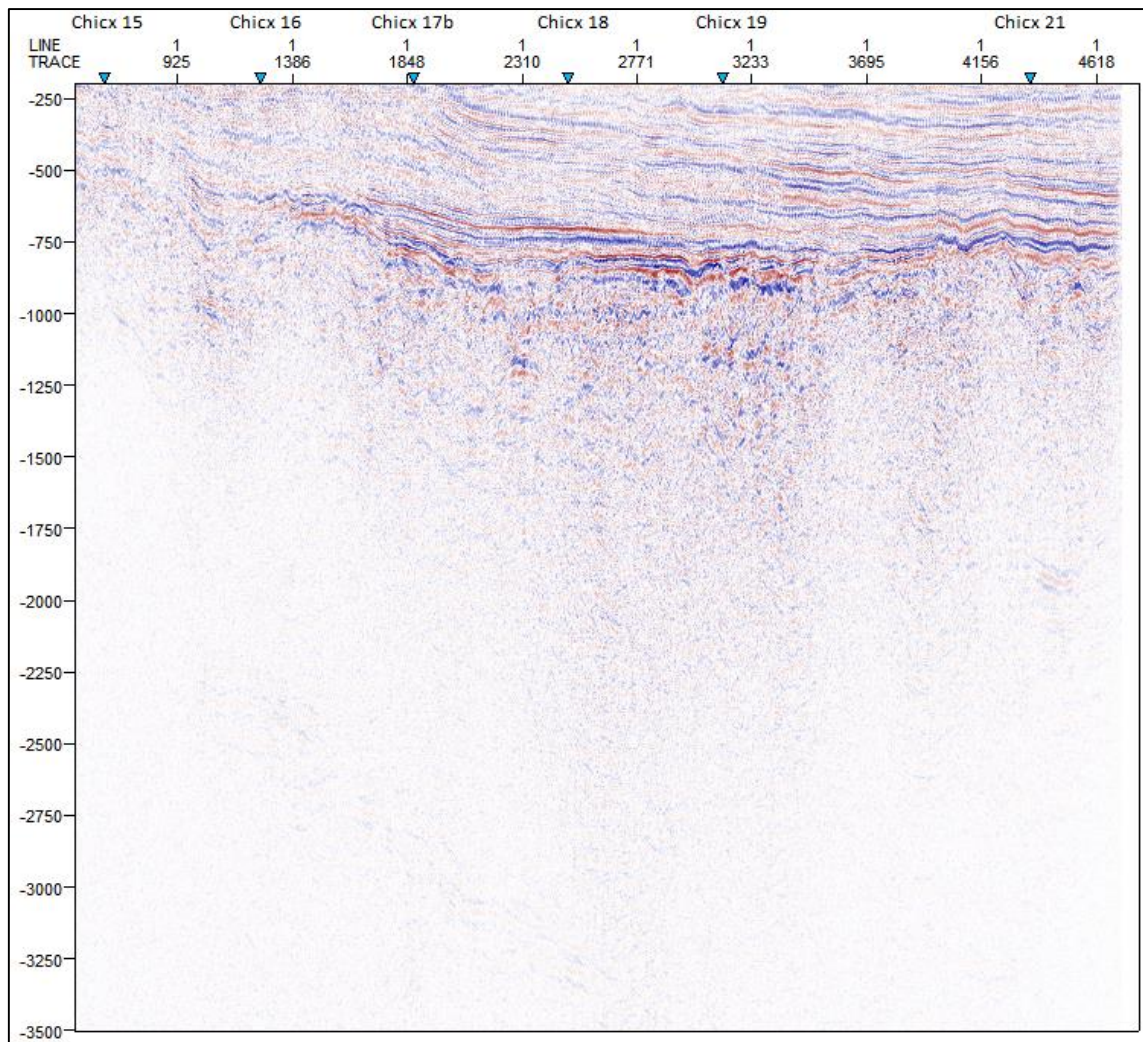


Figura V.1. Decaimiento de la señal sísmica en la sección Chicx 05. Como se puede apreciar, después de los 1000ms, la señal se atenúa hasta perder información sísmica.

La secuencia para la optimización de las secciones sísmicas migradas consistió en: a) por medio del análisis espectral aplicar un filtro pasabandas, b) con base en la información de la señal sísmica, crear una ondícula para deconvolucionar la sección sísmica, c) realizar una ecualización de frecuencias y, por último, d) la aplicación de los atributos sísmicos para el mejoramiento y caracterización de las secciones sísmicas (Figura V.2).

Por medio de los softwares HRS-Geoview® y Petrel® desarrollados por las empresas CGG y Schlumberger, respectivamente, fue posible desarrollar el procesamiento y la aplicación de los atributos sísmicos a las secciones sísmicas de este trabajo.

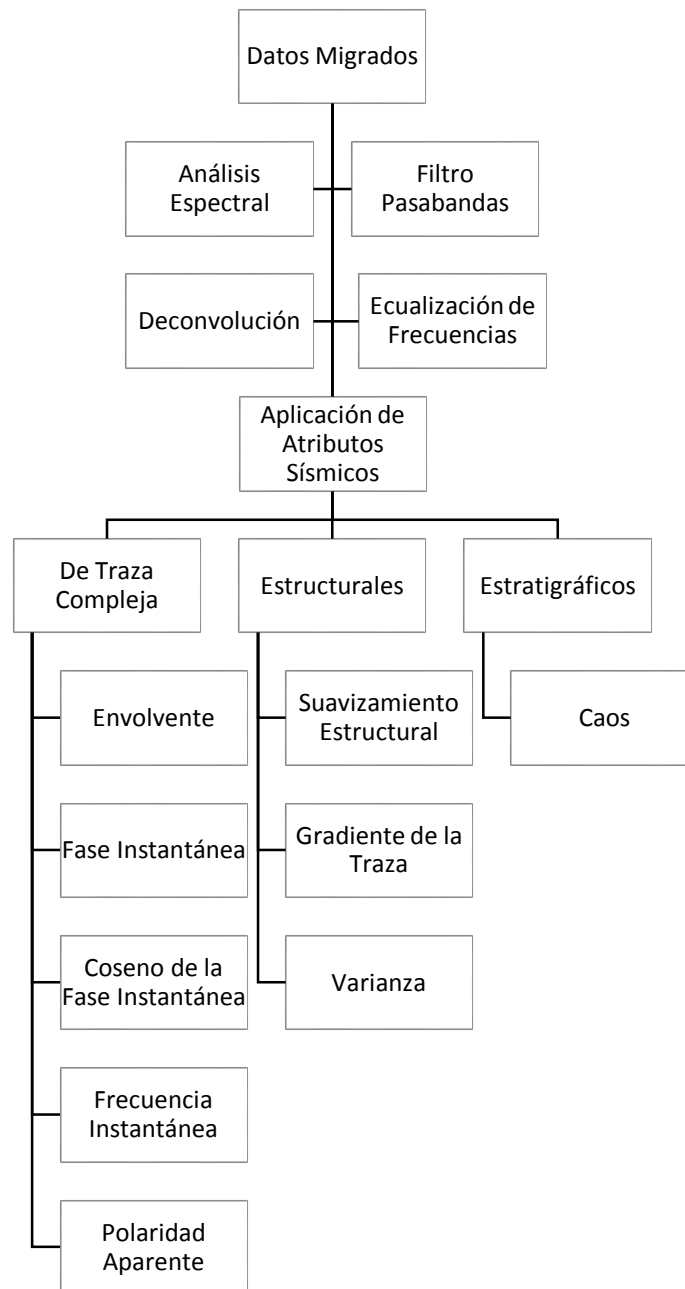


Figura V.2. Flujo de Procesamiento empleado en las secciones sísmicas desarrolladas en ésta tesis.

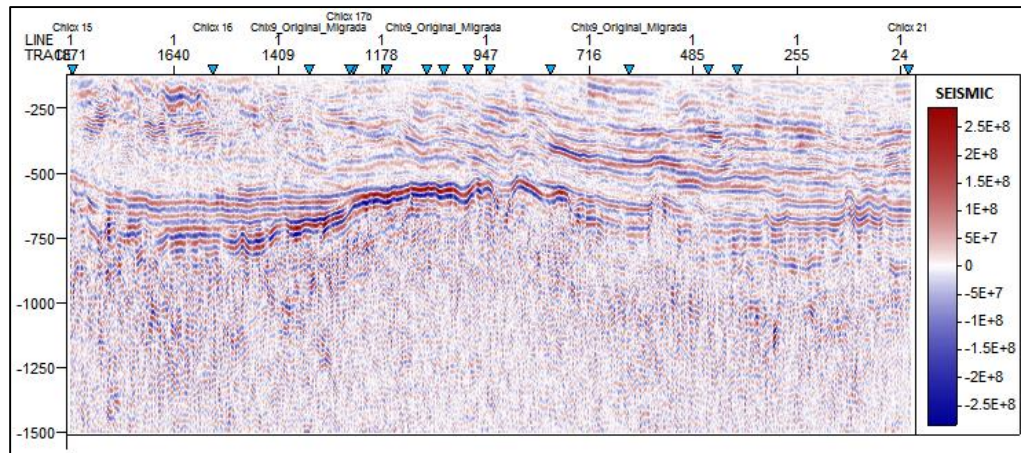


Figura V.3. Sección sísmica migrada 09 de Chicxulub, a partir de la cual se realizó el reprocesamiento para el mejoramiento de la imagen.

V.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

Una vez que los datos han sido migrados por lo general se aplica un filtro pasabandas para mejorar la claridad de la imagen mediante el aumento de la relación señal-ruido. Esto es necesario ya que las frecuencias más altas a menudo se pierden en las secciones más profundas debido a varios mecanismos de atenuación y, sin el procesamiento de filtrado, la claridad de la sección más profunda se reduce por la presencia de ruido de alta frecuencia. Es normal dejar pasar las frecuencias más altas en la parte más somera de la sección y filtrar las frecuencias altas en la parte más profunda.

Este procesamiento excluye frecuencias por encima de un cierto valor (frecuencia de corte mayor) y por debajo de un valor menor (frecuencia de corte menor) para retener la parte de la señal con la más alta relación señal – ruido.

Se calculó el espectro de amplitud en el intervalo de estudio (Figura V.4) para ver las contribuciones de las frecuencias en las amplitudes de las trazas. A través de este análisis espectral se delimitaron dos contribuciones principales, una en el rango de las bajas frecuencias, 08 – 30 Hz, y otra en el rango de las altas frecuencias, 45 – 60 Hz, que sirvieron como parámetros para la elaboración de los filtros pasabandas.

Al realizar el filtro para conservar las frecuencias altas se pudo observar que la sección sísmica no presenta una continuidad lateral (Figura V.5) y, si bien las frecuencias altas proporcionan información de la parte más somera, al realizar el filtro pasabandas de baja frecuencia (Figura V.6), la sección sísmica presenta una continuidad lateral sobre los mismos horizontes donde se tiene la presencia de

las altas frecuencias. Con base en este análisis, se decidió ajustar el filtro pasabandas para conservar bajas frecuencias, añadiendo una porción de las frecuencias altas que brindaran una mayor resolución y continuidad a los horizontes.

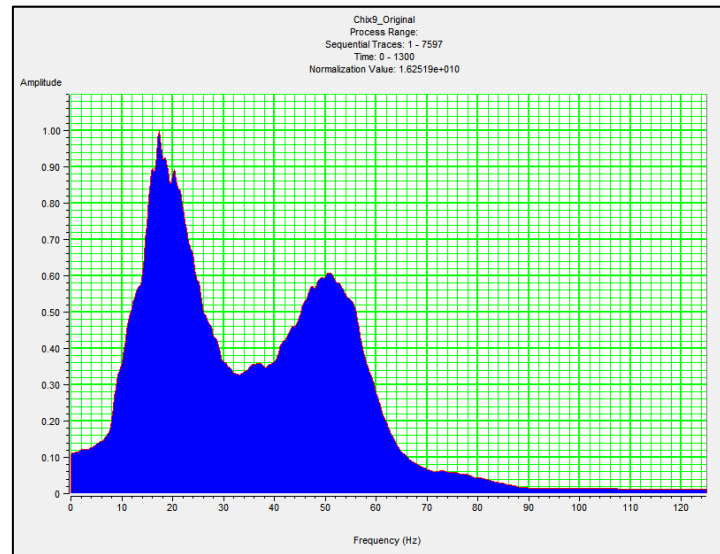


Figura V.4. Espectro de potencia para Chicx 09 en el intervalo de los 0 – 1300 ms.

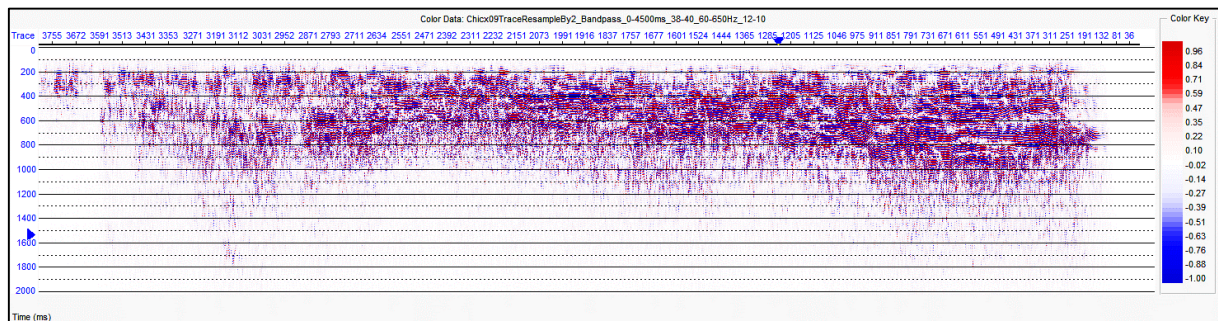


Figura V.5. Contenido de altas frecuencias en la sección Chicx 09.

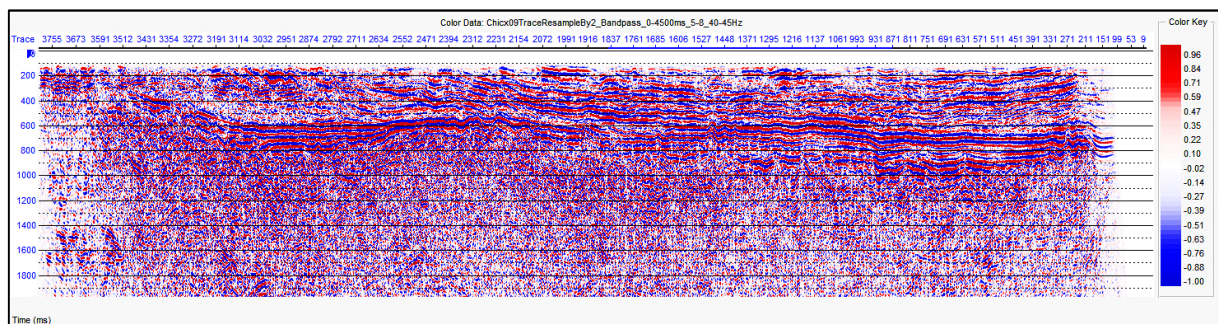


Figura V.6. Contenido de bajas frecuencias en la sección Chicx 09.



V.2 DECONVOLUCIÓN

El concepto de aplicar la deconvolución después de la migración es relativamente nuevo (Bancroft et al., 2011), con opiniones encontradas respecto a su aplicación o no después del proceso de migración.

Las consideraciones para realizar este procesamiento a los datos sísmicos son:

- a) La migración es un proceso de transposición que se aproxima a la inversión. Una verdadera inversión incluye la deconvolución como parte del algoritmo (Bancroft et al., 2011).
- b) La migración reduce el contenido de ruido, el cual permite que la relación señal-ruido se extienda a frecuencias más altas y más bajas (Bancroft et al., 2011).
- c) Con el proceso de deconvolución se recupera el ancho de banda de la señal que se pudo perder por la aplicación de algún filtro o procesamiento anteriormente aplicado.

El criterio empleado para realizar la deconvolución se basó en la generación de una ondícula de fase cero (extracción estadística de la ondícula), apoyándose en el espectro de potencia de los datos filtrados. De esta forma, se puede obtener una ondícula sin un modelo para las reflexiones.

Debido a que se tienen buenos contenidos de frecuencia en las secciones sísmicas, el objetivo del procesamiento de deconvolución después de la migración es brindar una mayor coherencia y resolución a la reflectividad de los horizontes a lo largo del ancho de banda propuesto en la creación de la ondícula

Se propuso una ondícula de fase cero, con parámetros de frecuencias entre 0 – 45 Hz y una longitud de 200ms (Figura V.7). Cabe señalar que, al no conocer todos los parámetros empleados en los procesamientos previos que tuvieron las secciones sísmicas, el rango de frecuencias se mantuvo dentro de las frecuencias conocidas en el análisis espectral y filtrado de la sección. Esto con el objetivo de no generar el fenómeno de aliasing en los datos, ni crear artefactos en dichas secciones.

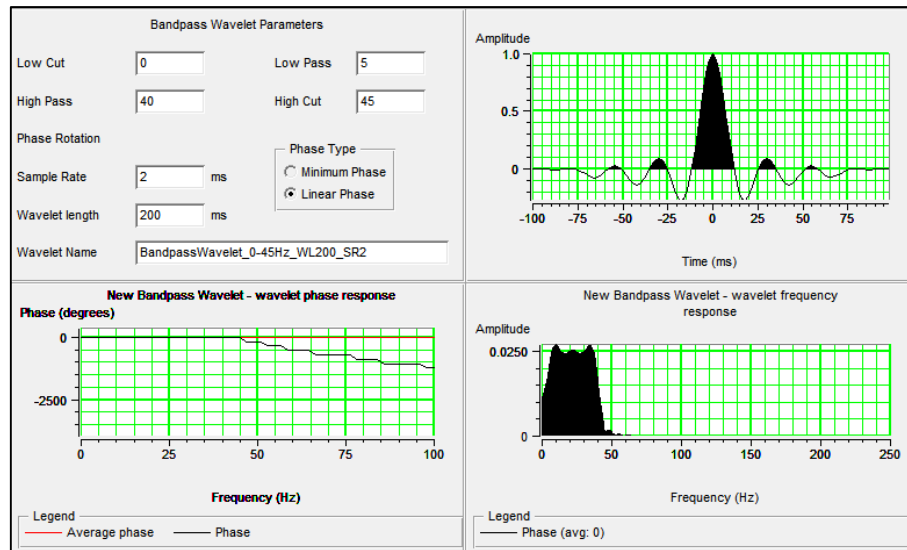


Figura V.7. Parámetros empleados en la creación de la ondícula de fase cero para la realización de la deconvolución estadística.

La sección obtenida (Figura V.8) es una distribución en función de los cambios de velocidad y densidad producidos en el subsuelo y de la posición relativa de la fuente y el receptor. La energía que retorna no puede exceder la energía de entrada, de manera que la energía de la ondícula recibida decae con el tiempo conforme se produce una separación posterior en las interfases.

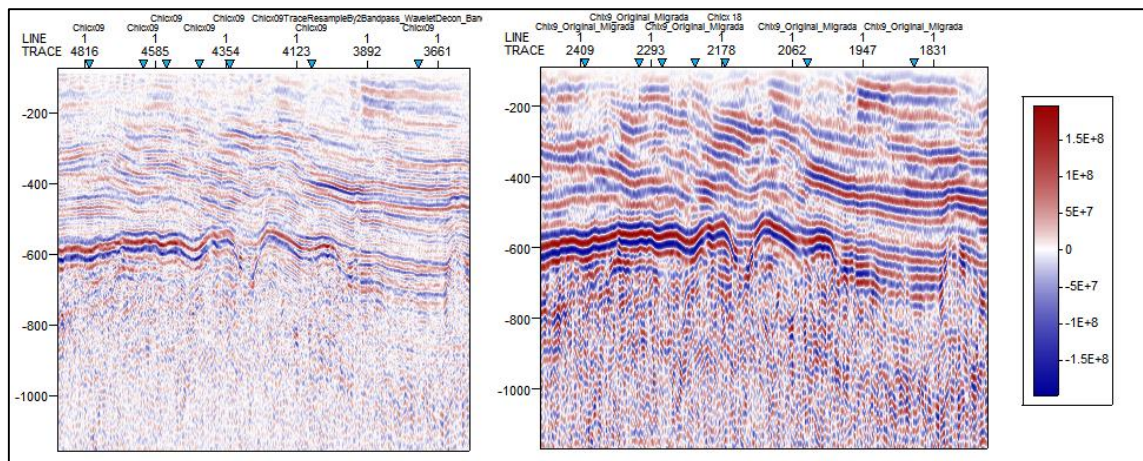


Figura V.8. Mejoramiento de la sección sísmica Chicx 09 por medio de la deconvolución. Hay una considerable recuperación en los reflejos y su continuidad.

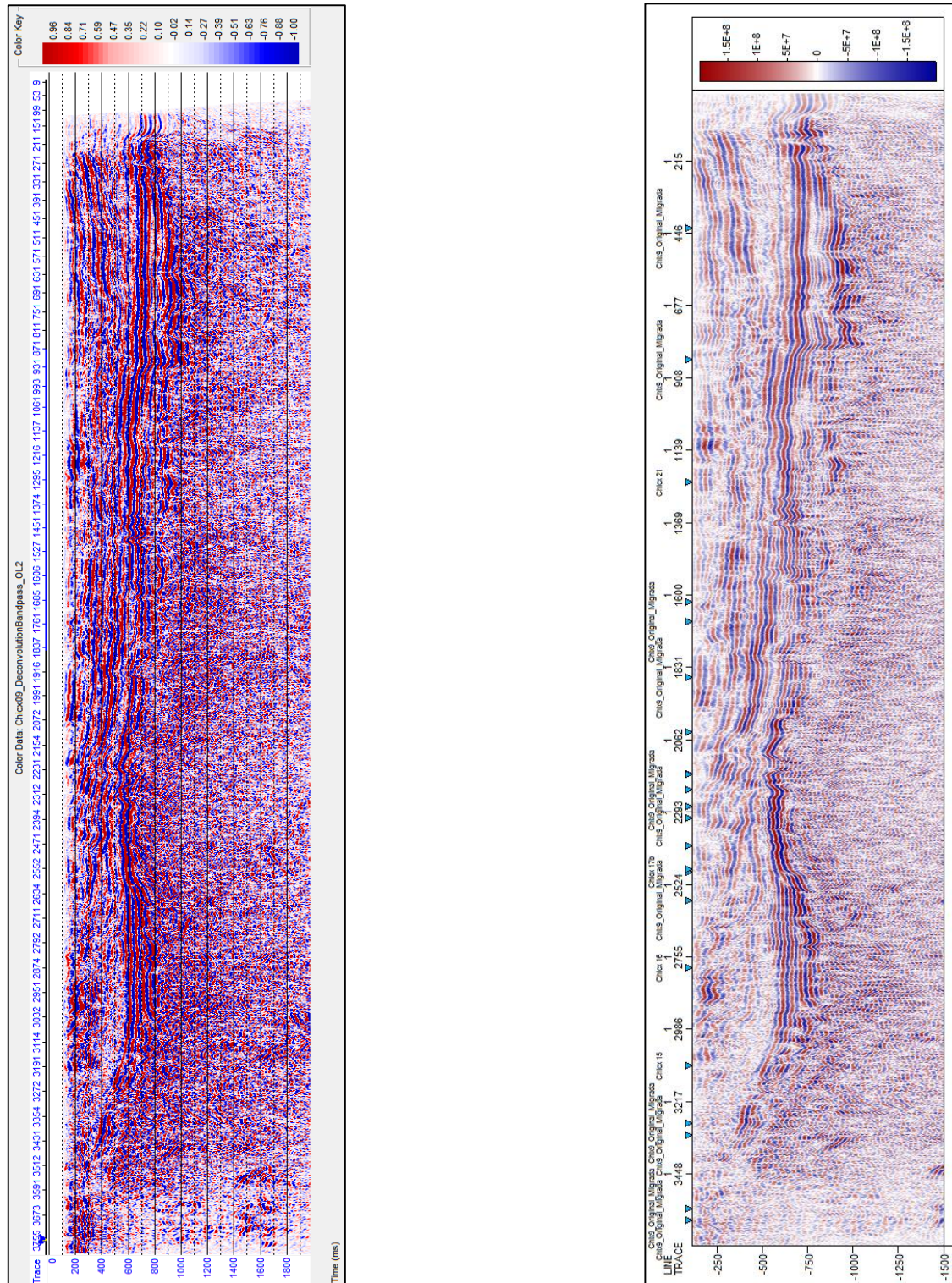


Figura V.9. Deconvolución estadística de la sección Chicx 09 presentada en el software HRS-Geoview® (Izquierda) y Petrel® (Derecha).

V.3 ECUALIZACIÓN DE FRECUENCIAS

La aplicación de este procesamiento permite atenuar o incrementar ciertas frecuencias, o intervalo de frecuencias, con el objetivo de mejorar la relación señal – ruido y la continuidad de los reflectores.

La ecuación que rige este procesamiento es:

$$F(\omega) = W(\omega) * |A_{\omega}|e^{i\varphi(\omega)} \quad \text{Ec. V.1}$$

Donde $W(\omega)$ es la función ponderada de la frecuencia, linealmente interpolada, A es el coeficiente de magnitud, φ el ángulo de fase y, ω es la frecuencia en radianes.

La ecualización de frecuencias se desarrolló con el objetivo de dar una mayor nitidez a los reflectores sísmicos, ya mejorados por la deconvolución. Por lo que, éste procesamiento, simplemente brinda una mayor coherencia a las frecuencias, en especial a aquellas que se vieron afectadas en la aplicación del filtro pasabandas, brindando mayor continuidad (Figura V.11).

La comparación de la imagen sísmica ecualizada permite apreciar el mejoramiento sustancial en la resolución y, en especial, la continuidad de los eventos. Con esto, el desarrollo y la aplicación de los atributos sísmicos permitirán ofrecer una mayor coherencia en la información que proporcionen y un mejor análisis para la interpretación y caracterización de la zona (Figura V.10).

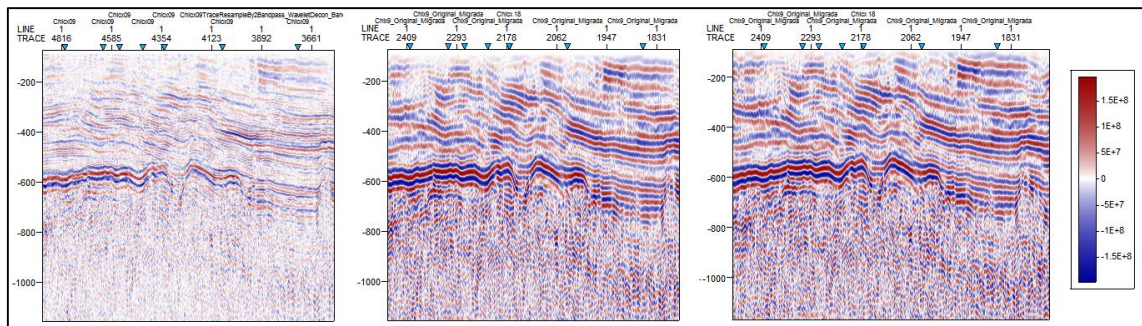


Figura V.10. Imagen comparativa de la sección Chicx 09 (Original-Deconvolucionada- Ecualizada).

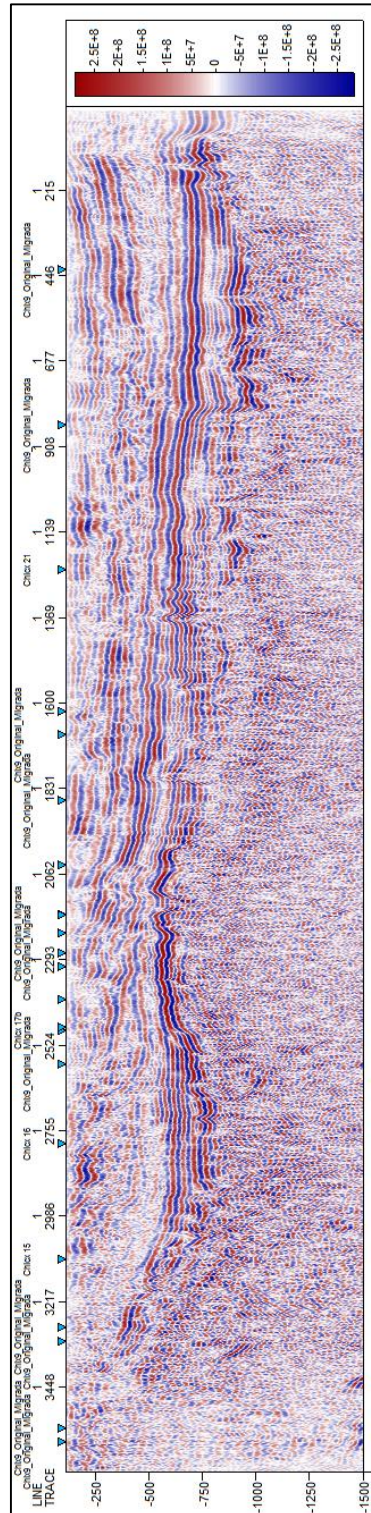


Figura V.11. Ecualización de frecuencias para la sección Chicx 09. A partir de esta imagen se desarrollarán los atributos sísmicos y la caracterización de la zona.



V.4 DESARROLLO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

Generalmente calculamos los atributos de datos sísmicos en tiempo, más que en profundidad. Los atributos calculados a partir de secciones migradas en tiempo tienen la certeza de tener los eventos en su verdadera posición, y suelen ser más apropiados para la interpretación sísmica.

Seleccionar un conjunto de atributos no es una tarea sencilla. Cada método requiere hacer la suposición de una posible relación entre el atributo y el parámetro geofísico medido (Chambers & Yarush, 2002). De este modo se consideró todo atributo para ser aplicado en los datos sísmicos en función de su significado o en relación con las características del cráter, clasificado como un impacto meteorítico de gran orden que transformó la mineralogía, deformó, fracturó, fragmentó y emplazó toda la roca objetivo.

La zona de estudio está formada por alto, medio y nulo fallamiento (inner, outer and exterior rings) con contrastes de impedancia debido a la diferencia petrofísica entre las rocas formadas por el impacto (brechas y rocas de fusión) y las rocas que no fueron transformadas por las condiciones de presión y temperatura (carbonatos del Mesozoico y basamento) (Brittan et al., 1999).

Los atributos sísmicos se clasificaron de acuerdo con la funcionalidad que éstos desarrollaban para con los datos sísmicos (Atributos de la traza compleja, estructurales y estratigráficos).

Los atributos de la traza compleja surgen con el desarrollo de la Transformada de Hilbert y la caracterización de la señal sísmica en una traza compleja con parte real y parte imaginaria (capítulo III.5). Los atributos estructurales están enfocados a contribuir con el proceso de interpretación de la geología estructural. Se encargan de aislar y remarcar las variaciones estructurales locales en los patrones de las reflexiones sísmicas, como es la continuidad de eventos, orientaciones y echados de las capas y/o discontinuidades. Los atributos estratigráficos se relacionan con la identificación de secuencias estratigráficas, variaciones laterales y verticales de litología y en la distribución de facies.

V.4.1 Envolvente de Amplitud

La envolvente de la amplitud instantánea es el módulo de la función compleja de la traza analítica que representa la energía instantánea total, la cual varía aproximadamente entre 0 y la amplitud máxima de la traza.

La envolvente es independiente de la fase y se relaciona directamente con los contrastes de impedancia acústica de la interfase individual o la respuesta combinada de varias interfases, dependiendo del ancho de banda sísmica.

La traza envolvente es un atributo físico y que puede ser utilizado como un discriminador eficaz para los límites de secuencias, principales cambios de litología y/o en el ambiente de depósito, así como cambios laterales atribuidos a inconformidades y/o fallas.

Calibrar la ventana de tiempo para la aplicación de este atributo ayuda a distinguir características más finas dentro de la sección sísmica, resaltando el límite entre la roca del Paleógeno y la roca de fusión a todo lo largo de la cuenca de impacto (Figura V.12).

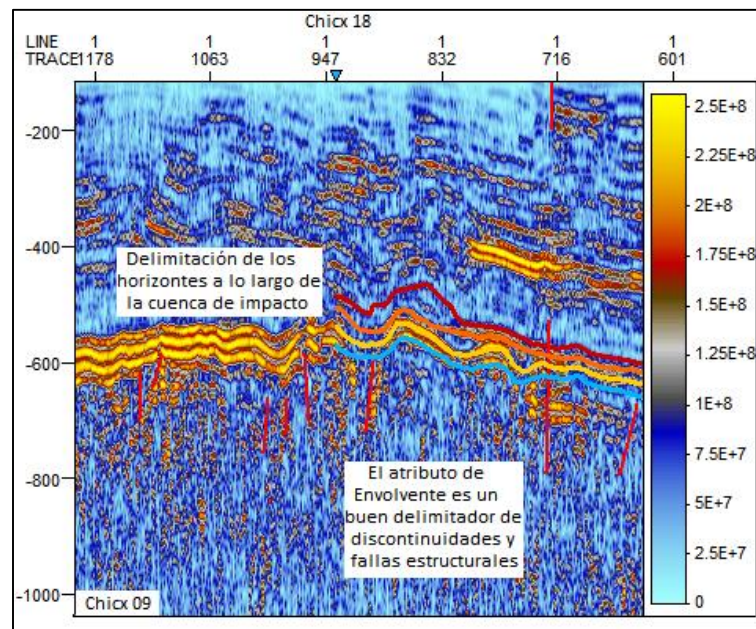


Figura V.12. Con el atributo de envolvente se pueden delimitar los paquetes litológicos y las discontinuidades asociadas a las fallas.

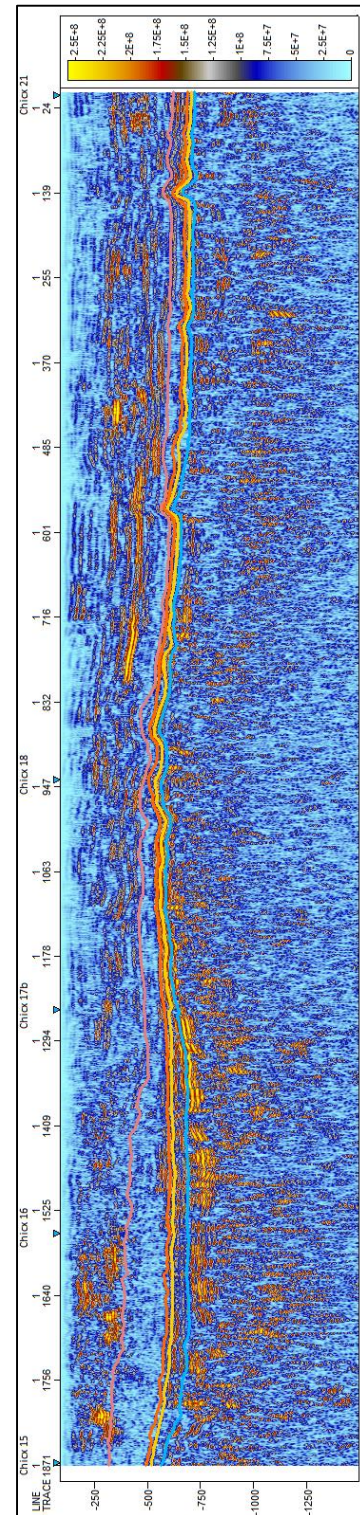
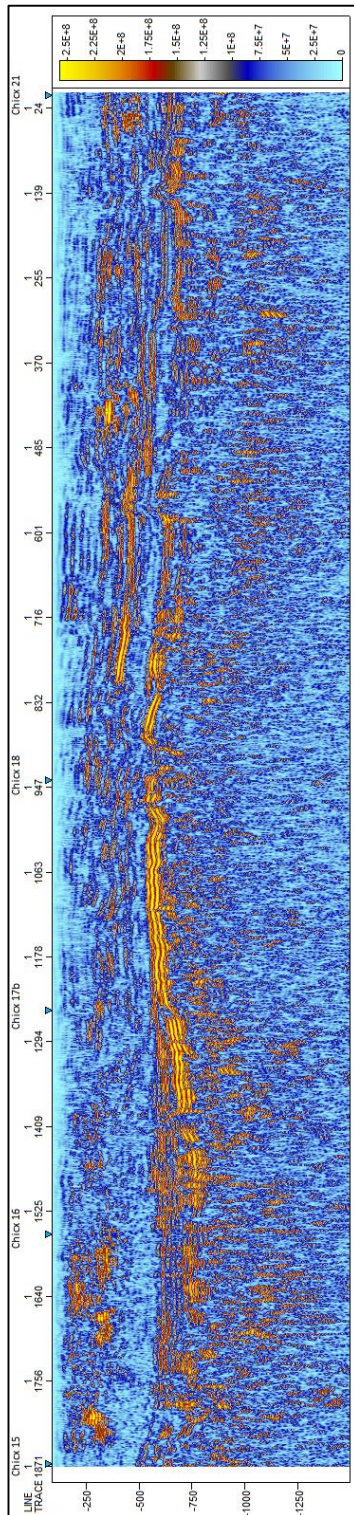


Figura V.13. Aplicación del atributo de la envolvente de amplitud a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.4.2 Frecuencia Instantánea

Es descrito como la tasa de cambio en tiempo de la fase instantánea sobre una ventana determinada de tiempo determinada. Es un atributo independiente de la amplitud y de la fase y representa la frecuencia central o frecuencia promedio del espectro de frecuencia (Taner et al., 1979).

La mayoría de las reflexiones registradas en los datos sísmicos no son producidas por un solo reflector geológico, sino son producidas por la suma de reflexiones de diversos reflectores estrechamente espaciados que llegan a tener pequeñas variaciones en su impedancia acústica, con lo que se produce un patrón de frecuencia que los caracteriza. Por lo que, este atributo, provee información acerca de la frecuencia característica de los eventos presentes en el medio (Figura V.15).

Usualmente, es usado para resaltar variaciones laterales y verticales de litologías. Este método permite detectar fallas y fracturas debido a que éstas causan un efecto de absorción, mostrados como valores bajos en el atributo de frecuencia instantánea (Taner et al., 1979).

El Atributo de Frecuencia contiene información de detalle capaz de identificar diferencias entre los bloques calcáreos y las brechas de impacto (Figura V.14).

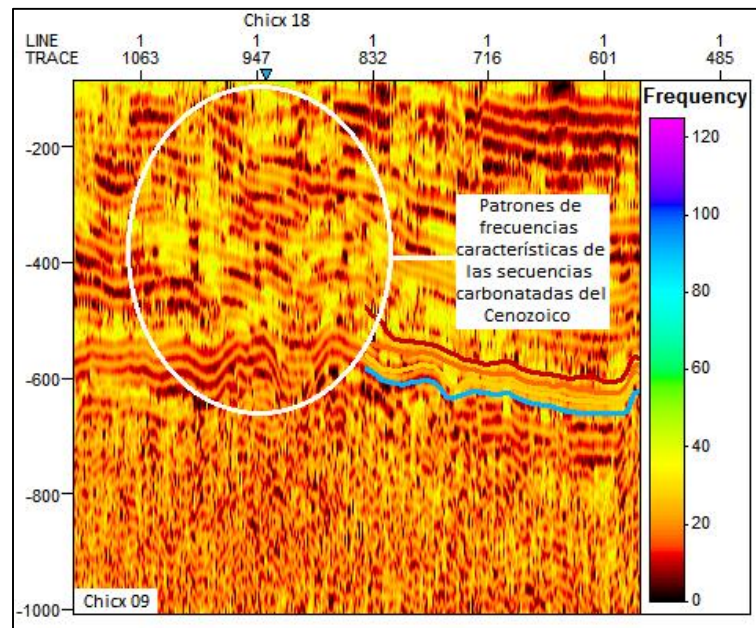


Figura V.14. Con el atributo de frecuencia es posible delimitar las secuencias de depósito y distinguirlas del patrón caótico pertenecientes a las brechas.

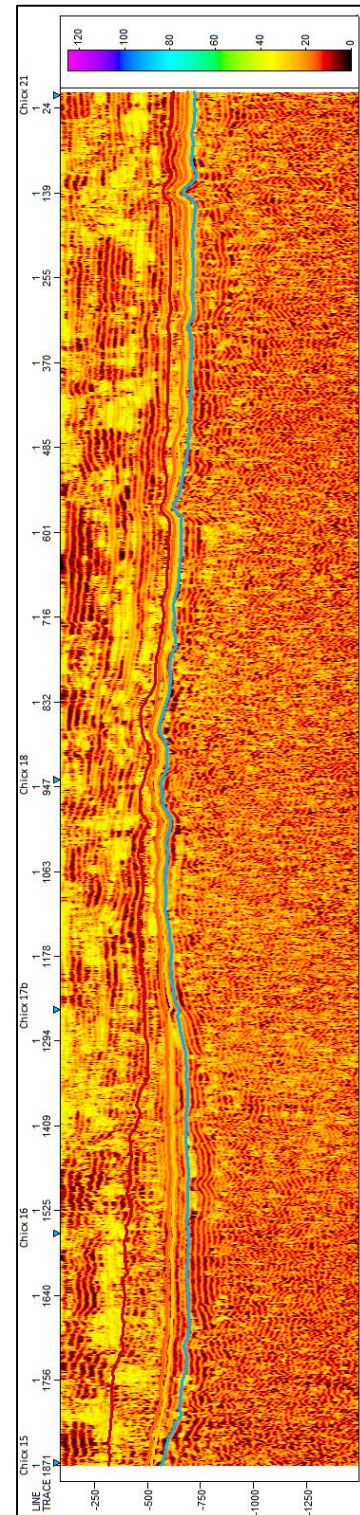
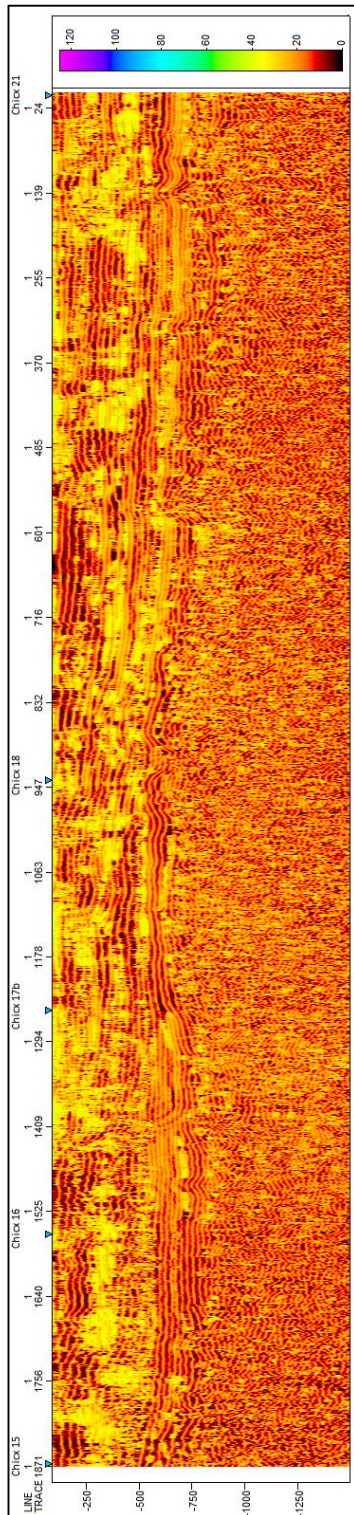


Figura V.15. Aplicación del atributo de frecuencia instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).



V.4.3 Fase Instantánea

El atributo de fase también es un atributo físico y puede ser utilizado eficazmente como un discriminador para las clasificaciones de forma geométrica. Debido a que la fase no depende de la fuerza de la reflexión, los eventos que eran poco apreciables se vuelven identificables. Por lo que este atributo es un buen indicador de la continuidad lateral, representando la mayoría de los eventos del medio y ayuda a describir los procesos sedimentarios ocurridos en la zona, delimitando las secuencias y las configuraciones de las capas (Figura V.18).

El atributo de Fase Instantánea muestra la continuidad lateral y geometría de los horizontes del Cenozoico (rocas carbonatadas) y se diferencian de los horizontes discontinuos y sin geometría del Mesozoico (brechas y roca de fusión). Las zonas de fallamiento se observan como horizontes discontinuos (Figura V.16).

V.4.4 Coseno de la Fase

También conocido como amplitud normalizada, el cálculo de este atributo, consiste en aplicar una función coseno a la fase instantánea para dar más consistencia a los reflectores sísmicos, resaltar límites estratigráficos, fallas y otros caracteres estructurales.

Debido al mejoramiento en la continuidad de los reflectores este atributo es excelente para realizar una primera aproximación interpretativa de los horizontes (Figuras V.17 y V.19).

El análisis estratigráfico y el reconocimiento de patrones sísmicos es uno de los más difíciles e importantes para inferir el régimen de depósito del área. Con lo cual este atributo representa una herramienta muy útil para realizar este análisis.

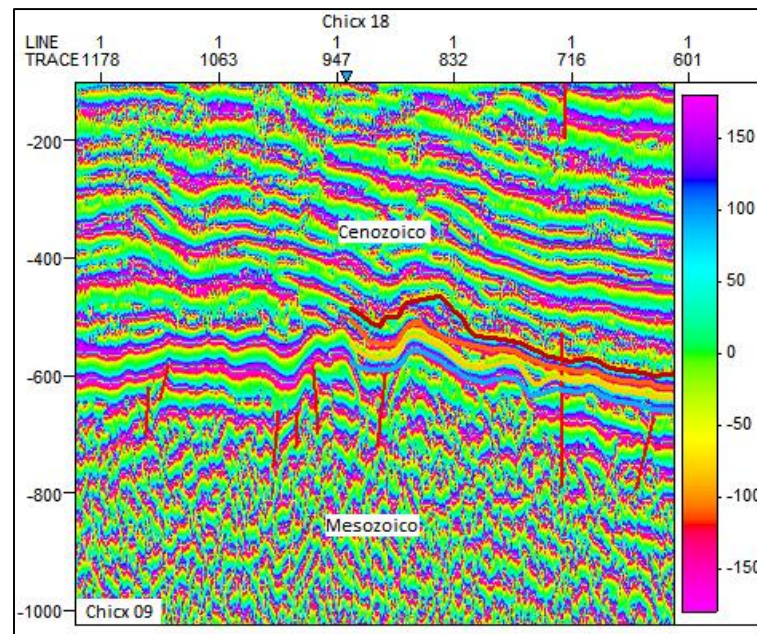


Figura V.16. El atributo de fase permite delimitar las discontinuidades de manera más detallada.

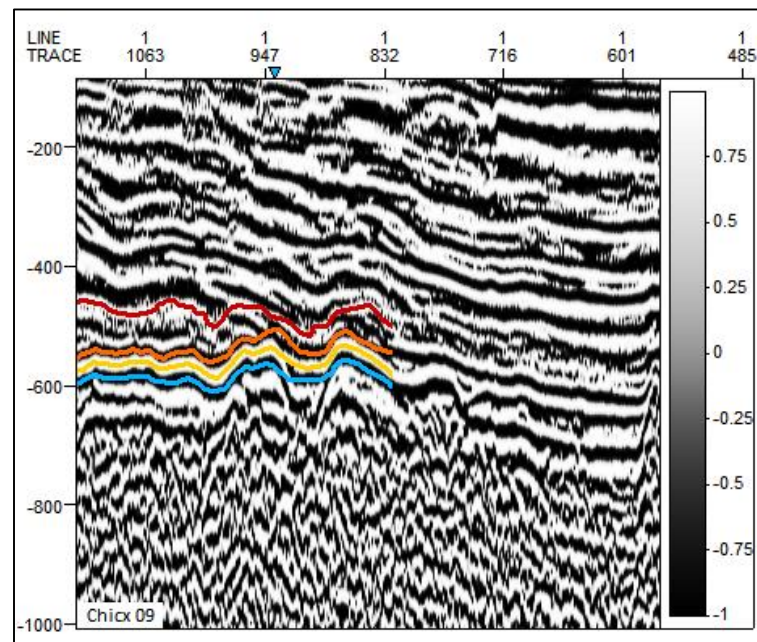


Figura V.17. El atributo del Coseno de Fase permite delimitar los horizontes de manera más detallada.

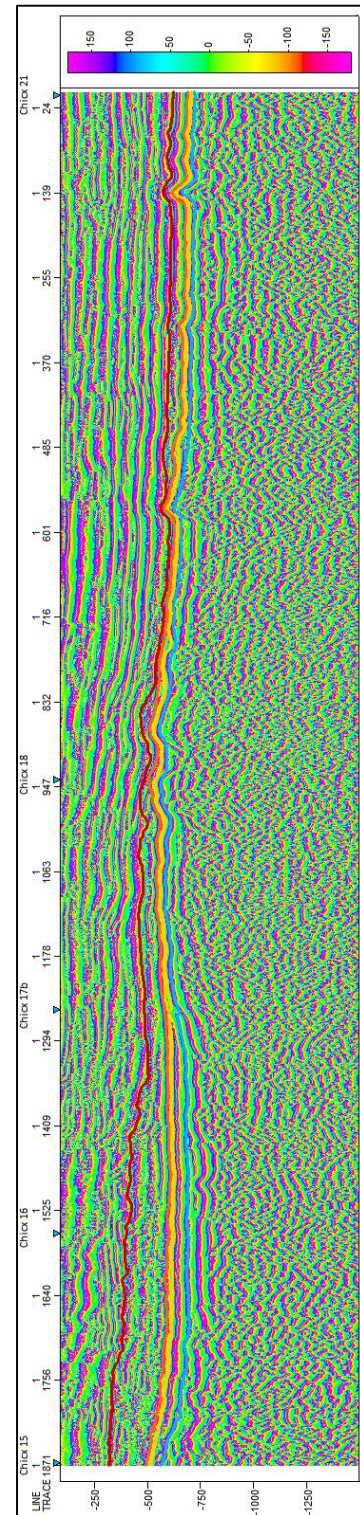
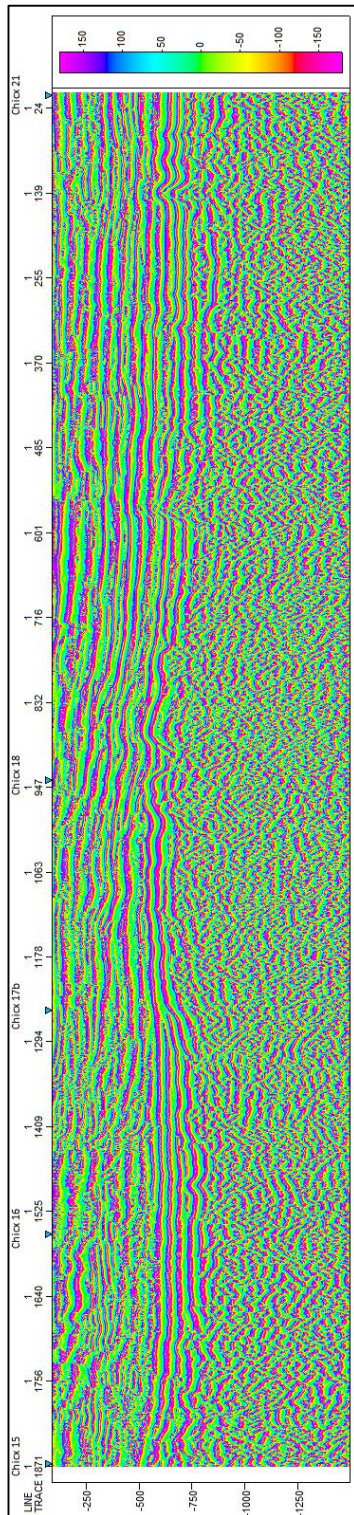


Figura V.18. Aplicación del atributo de fase instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

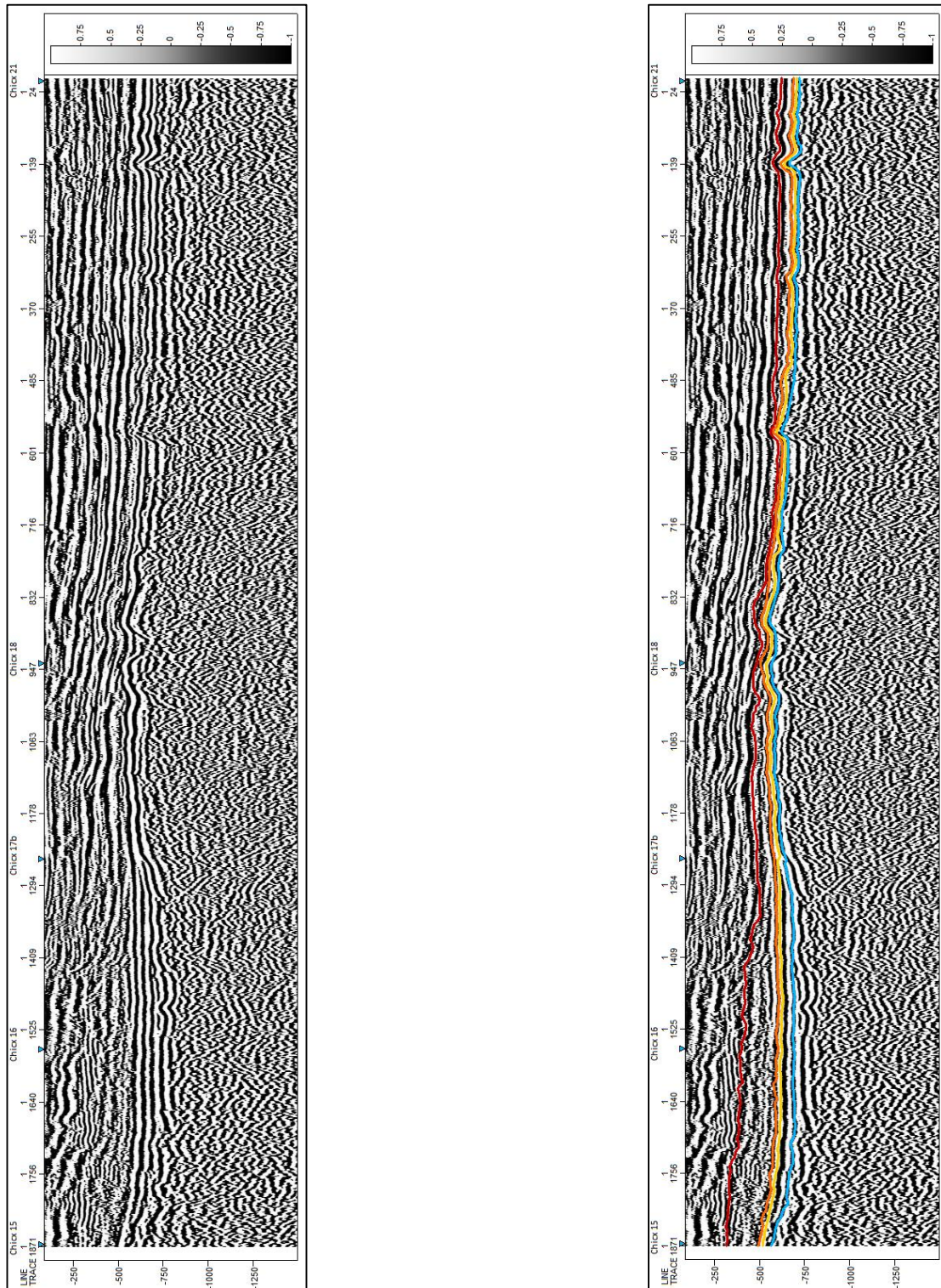


Figura V.19. Aplicación del atributo de coseno de la fase instantánea a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.4.5 Suavizamiento Estructural

Este atributo aplica un filtro gaussiano a los datos de entrada para reducir el contenido de ruido sin perder información relacionada con los bordes dentro de los datos, por lo que funge como un filtro estructuralmente-orientado para brindar mayor continuidad a los eventos.

El operador de suavizamiento gaussiano tiene la expresión (Iske & Randen, 2005):

$$h_G(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{k^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{Ec. V.2}$$

Donde σ determina el ancho del filtro de suavizamiento.

Es decir, el suavizamiento estructural brinda una mejor continuidad en los eventos a lo largo de los reflectores, sin alterar la información contenida en la señal sísmica, por lo que, la visualización de la sección sísmica se ve favorecida para la interpretación estructural y estratigráfica (Figura V.20).

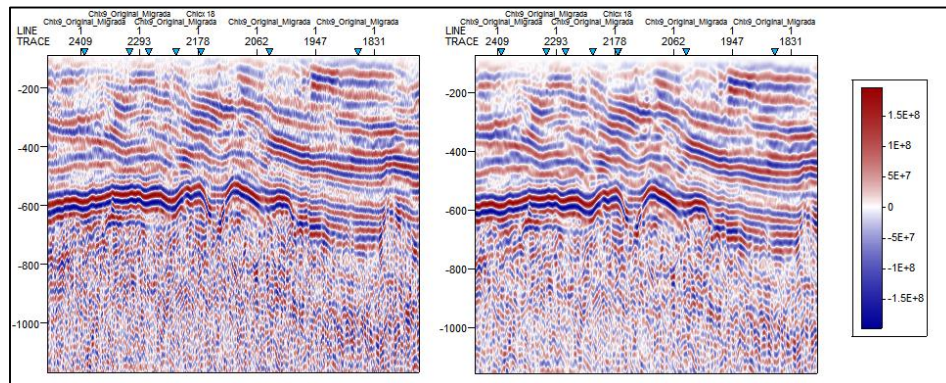


Figura V.20. Sección ecualizada (Izquierda) y con la aplicación del atributo de suavizamiento estructural (Derecha). Aunque no se puede apreciar una diferencia notable, este atributo brinda una mayor homogeneidad a los reflejos a lo largo de la sección.

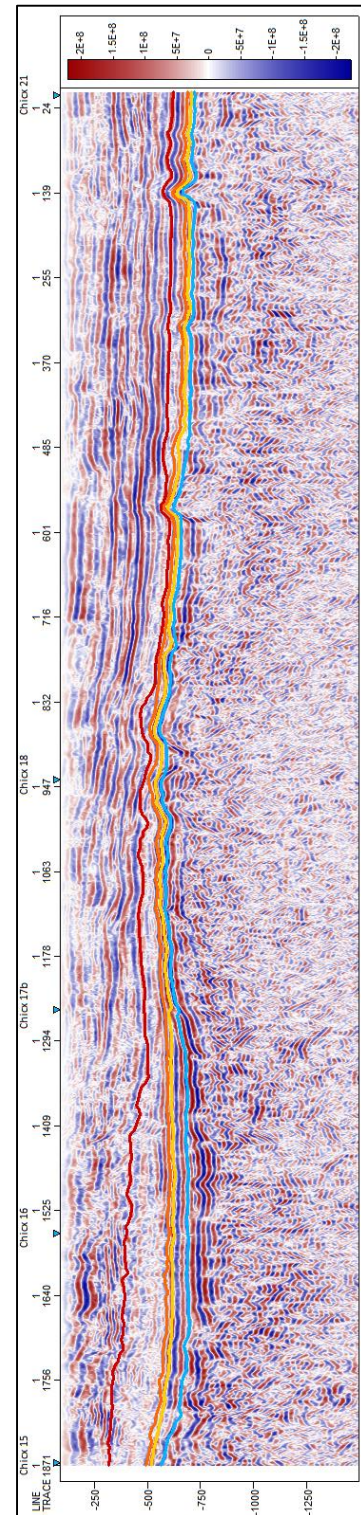
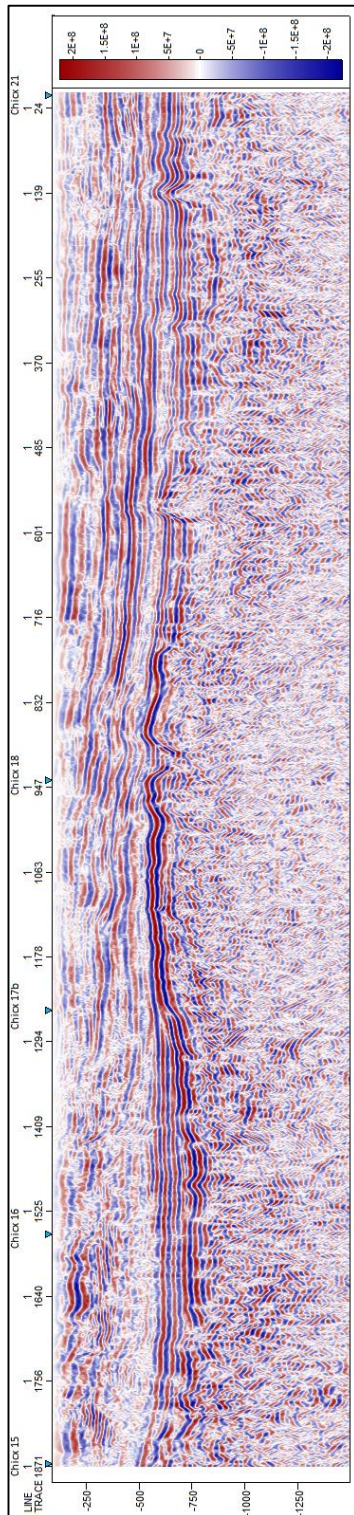


Figura V.21. Aplicación del atributo de Suavizamiento Estructural a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

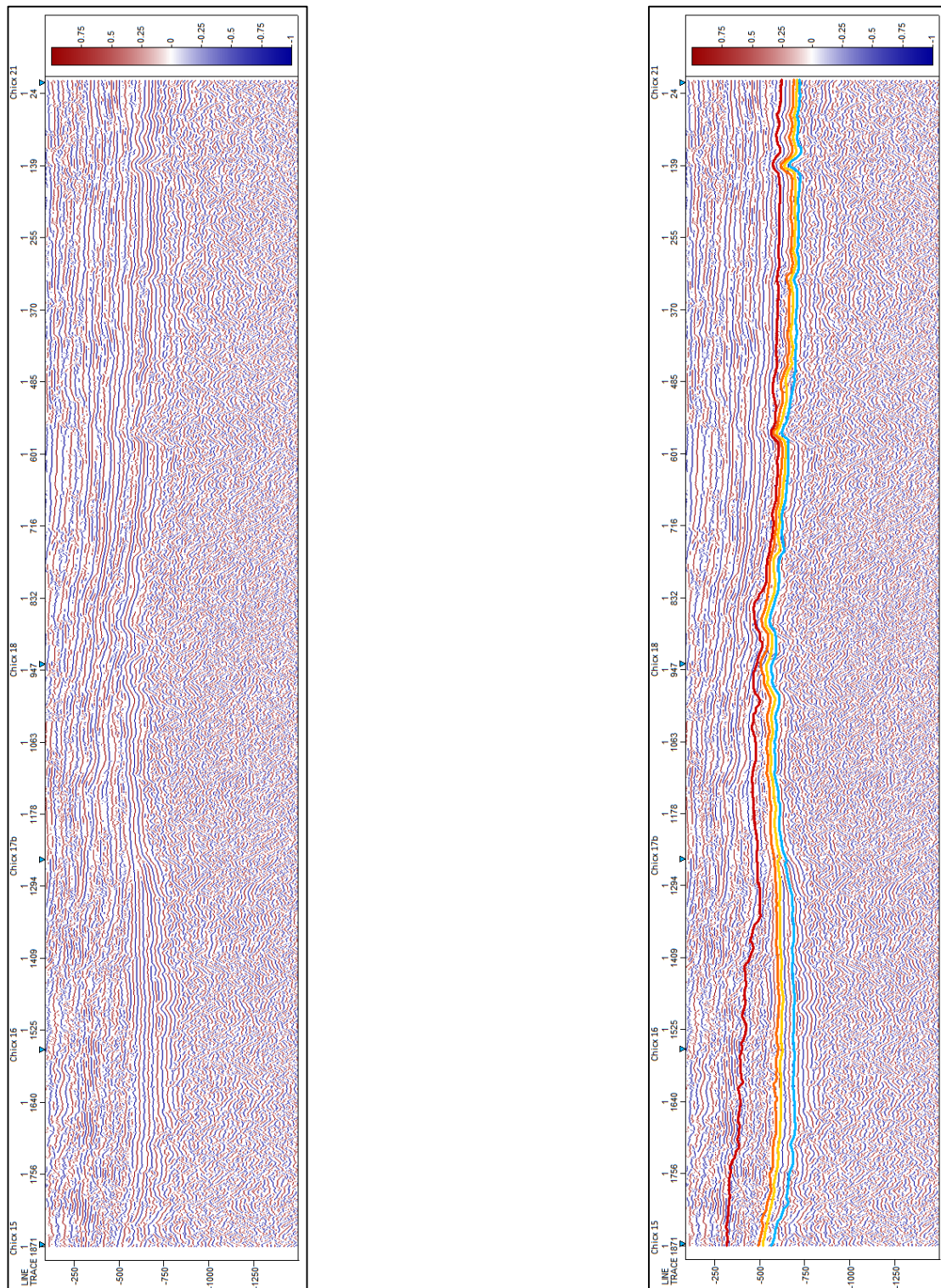


Figura V.23. Aplicación del atributo de polaridad aparente a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.4.7 Gradiente de la Trazo

El atributo del gradiente de la trazo calcula, como su nombre lo indica, el gradiente a lo largo de la trazo entre un cierto número de muestras consecutivas (K).

$$\text{Gradiente de Trazo} = f(t + K) - f(t - K) \quad \text{Ec. V.3}$$

El atributo de gradiente de trazo (Figura V.25) permite identificar las principales diferencias en la impedancia acústica del medio. Valores elevados del gradiente de trazo se relacionan con grandes cambios en la amplitud, permitiendo distinguir cambios abruptos en la litología.

Los altos valores en la diferencia de amplitudes del gradiente de trazo se aprecian como horizontes en color blanco, mientras que, las mínimas diferencias en la amplitud se denotan con el color negro.

Con este atributo se delimita el límite K/Pg a lo largo de la cuenca de impacto (Figura V.24).

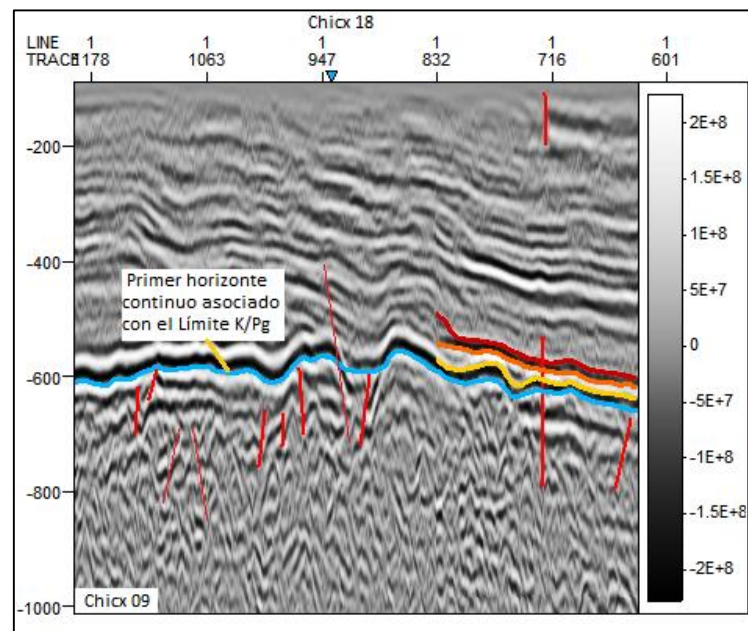


Figura V.24. El atributo de Gradiente permite delimitar los principales cambios de litología. En este caso, delimita el contacto del Límite K/Pg con las brechas de impacto.

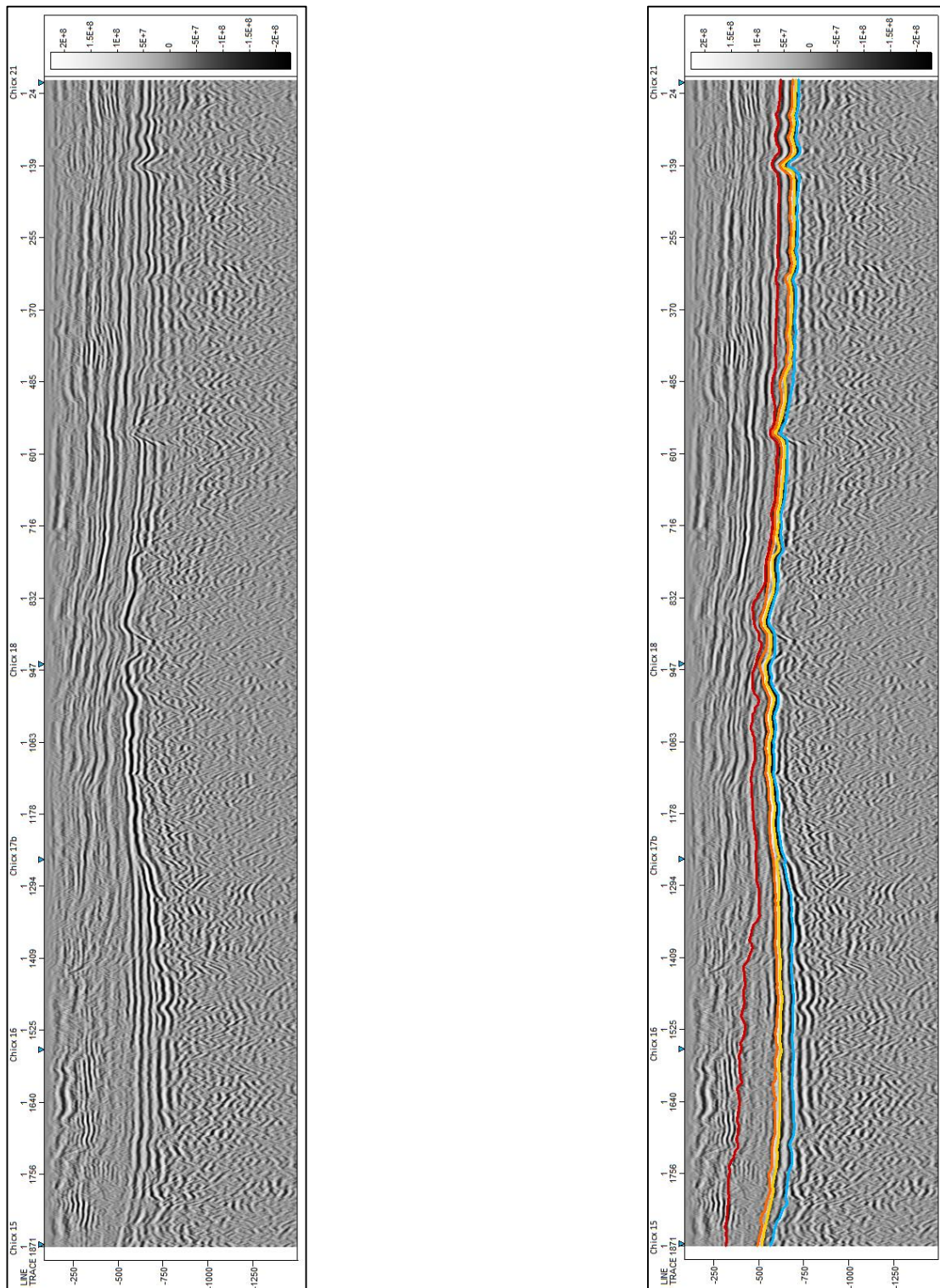


Figura V.25. Aplicación del atributo de gradiente de traza a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.4.8 Varianza

La varianza es la medición de qué tan dispersos se encuentran un conjunto de valores alrededor de un valor promedio (Ec. V.4).

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ec. V.4}$$

Tomando ésta definición, Petrel® introduce un algoritmo para calcular la varianza poblacional normalizada con un suavizamiento vertical ponderado (United States Patente nº 615155, 2000), el cual calcula la varianza local de la señal de entrada a través de una ventana multi-trazas, que puede ser ajustada.

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{j=t-L/2}^{j=t+L/2} w_{j-t} \sum_{i=1}^l (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{\sum_{j=t-L/2}^{j=t+L/2} w_{j-t} \sum_{i=1}^l x_{ij}^2} \quad \text{Ec. V.5}$$

Donde x_{ij} es el valor de la muestra en su posición horizontal (i), y en su posición vertical en tiempo (j). w_{j-t} es el suavizamiento vertical aplicado sobre la ventana de tiempo L .

El algoritmo de varianza presenta la ventaja de calcular directamente las diferencias a partir de un valor promedio, por lo que es un buen visualizador e indicador de discontinuidades.

Cabe mencionar que el tamaño de la ventana es un parámetro crítico para discretizar dichas discontinuidades. Ventanas muy grandes remueven eventos verticales y, ventanas muy cortas, eventos horizontales.

Para el desarrollo de este atributo se utilizó una ventana de tiempo corta, permitiendo un análisis estructural y estratigráfico, con el cual se aprecian las secuencias de depósito y discontinuidades, representadas por los valores cercanos a 1 (Figuras V.26 y V.27).

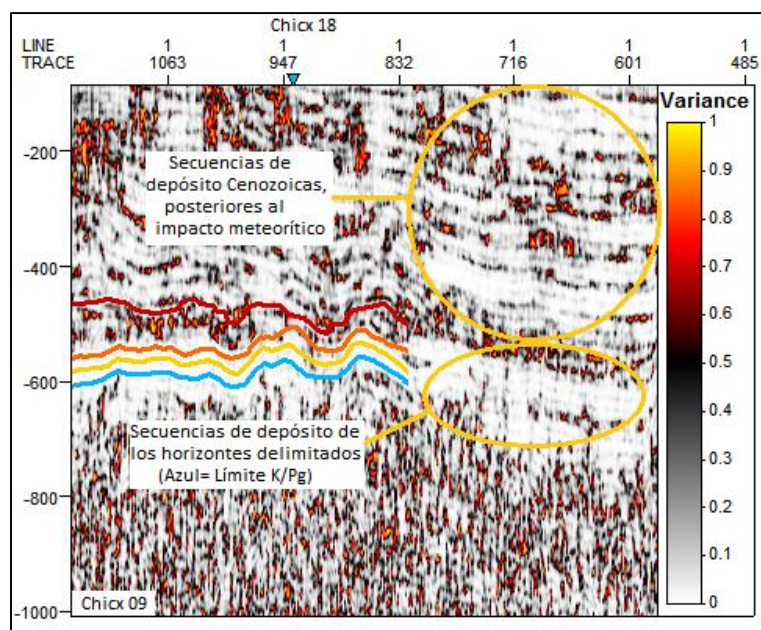


Figura V.26. El atributo de varianza delimita las secuencias de depósito y se aprecia la gran variabilidad existente por debajo del Límite K/Pg.

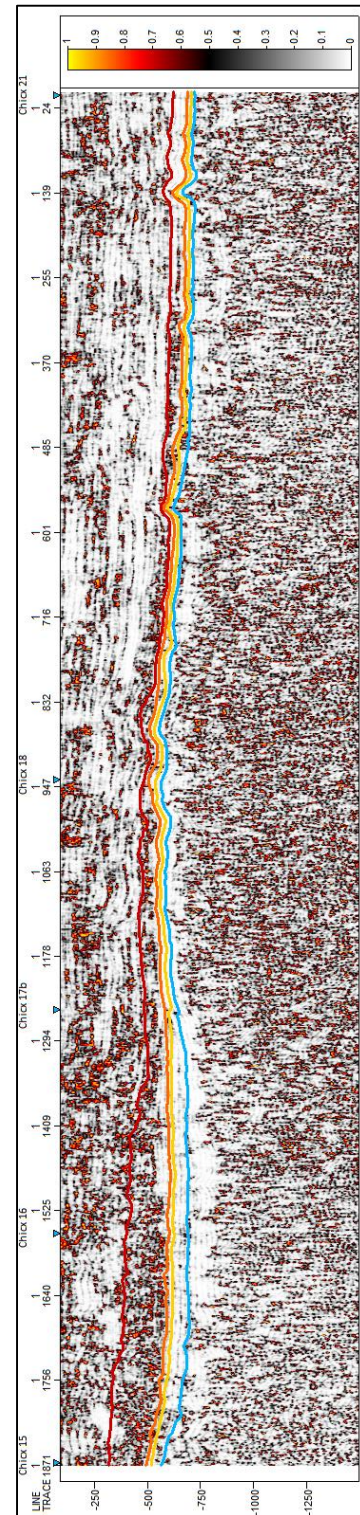
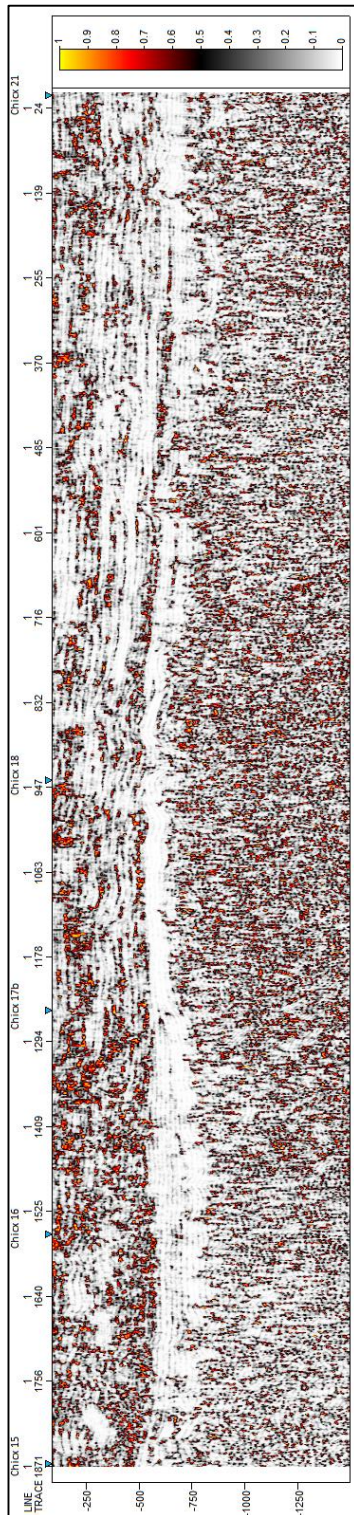


Figura V.27. Aplicación del atributo de varianza a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.4.9 Caos

Como su nombre dice, el atributo de caos se relaciona con la falta de organización dentro de una ventana. Las áreas con una consistencia baja corresponden a regiones con patrones de señal caóticos. Un aspecto importante de este atributo es su invariancia en orientación y amplitud., Por lo tanto, el método tendrá la misma respuesta sin importar si son regiones de alta o baja amplitud, con o sin un buzamiento.

El atributo de caos es muy útil para distinguir tres características principales: a) fallas/discontinuidades, b) cuerpos de sal y c) texturas caóticas dentro de los reflectores (Schlumberger, 2009).

En la figura V.29 se puede apreciar el comportamiento caótico por debajo del límite K/Pg, estando este perfectamente delimitado a través de este atributo. El flanco Oeste por encima de la cuenca de impacto también presenta una distribución caótica entre horizontes de depósitos calcáreos (Pg2 y Pg 3) (Figura V.28).

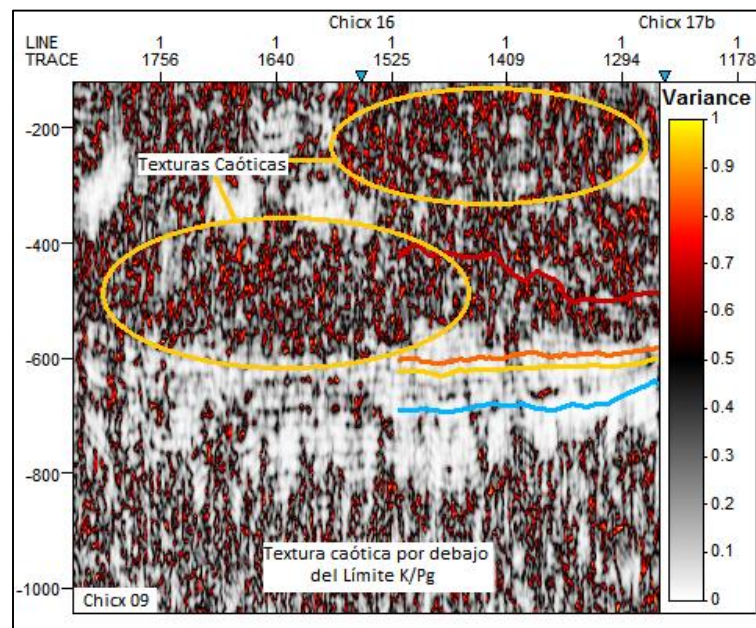


Figura V.28. EL atributo de Caos muestra la distribución de la textura a lo largo de la sección sísmica y se aprecian las zonas caóticas por debajo del Límite K/Pg y al Oeste por encima de éste.

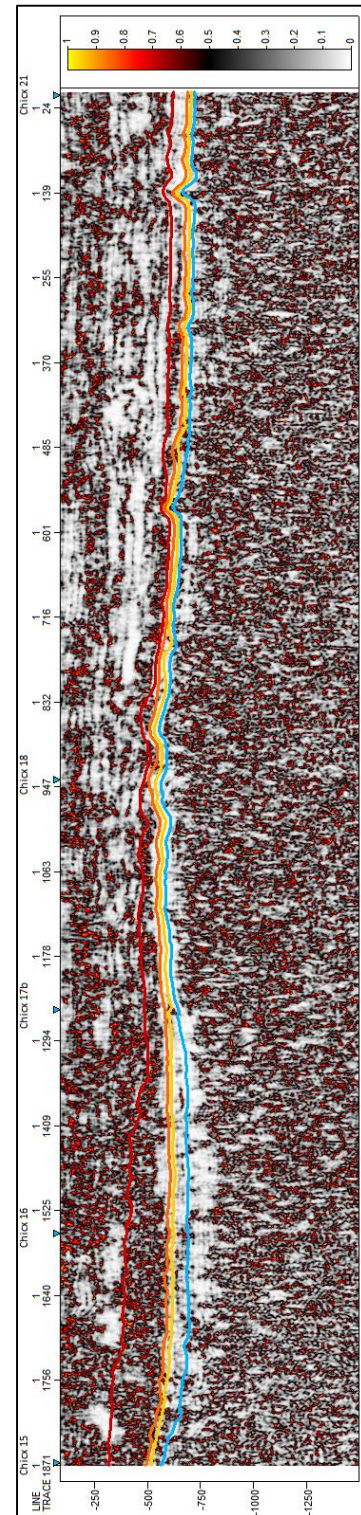
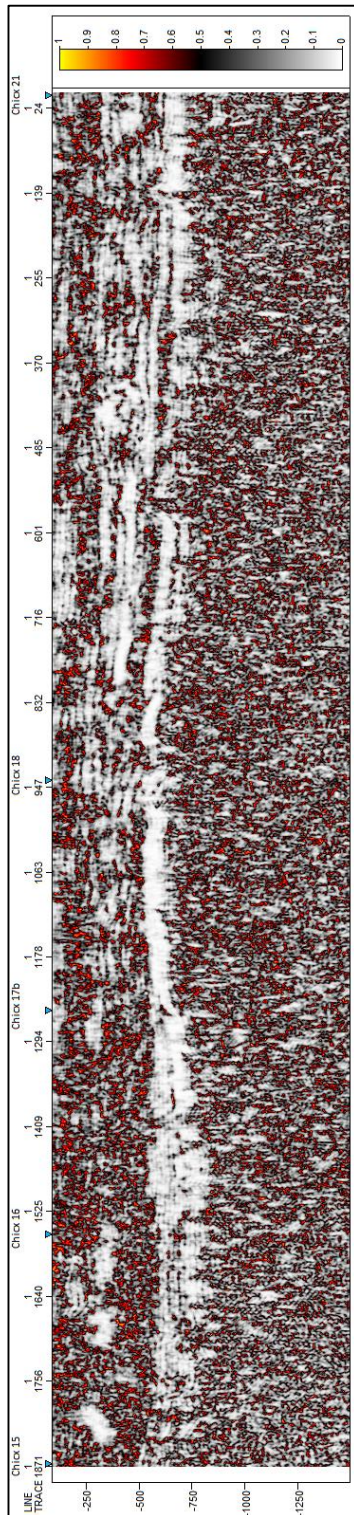


Figura V.29. Aplicación del atributo de caos a la sección Chicx 09 (Izq.) y la delimitación de los principales horizontes (Der.).

V.5 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE IMPACTO

Para la caracterización estructural del cráter se utilizó la sección Chicx 09 debido a que es la sección más cercana y que cruza transversalmente a la zona de impacto. Para la interpretación de los horizontes se emplearon todas las líneas sísmicas reprocesadas para, a partir de ellas, obtener un modelo que permita visualizar la estructura de dichos horizontes. La figura V.30 muestra las secciones sísmicas empleadas en la construcción de este cubo de interpretación.

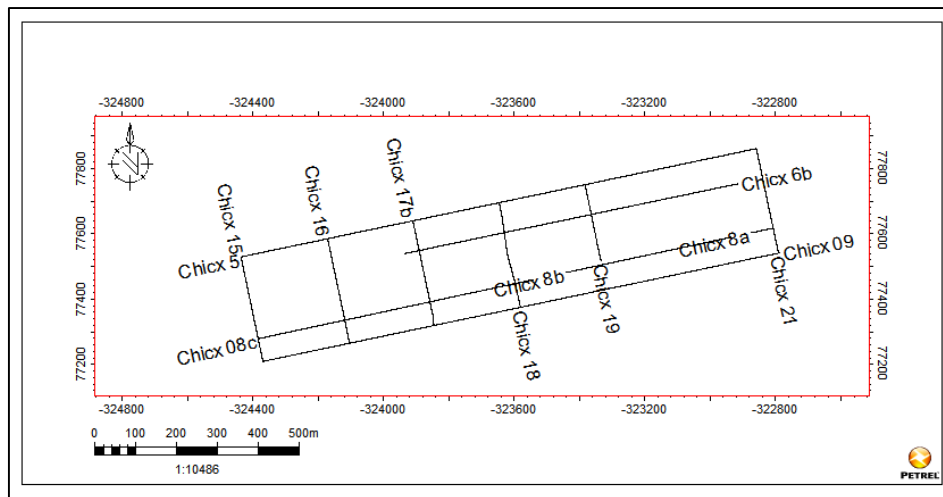


Figura V.30. Líneas sísmicas recortadas, empleadas en la construcción de los horizontes.

El criterio para delimitar los horizontes marcados en este trabajo se basó en diferenciar paquetes que mostraran diferencias en la continuidad de los estratos, en la amplitud de la señal, en la energía contenida en los reflectores, así como en la textura; obtenidas a mediante la aplicación de los atributos sísmicos para lograr resaltar dichas propiedades físicas.

El primer horizonte marcado en color azul se asocia a la cuenca de impacto (K/Pg) Éste horizonte se observa como el primer reflector continuo en todos los perfiles, a una profundidad cercana a los 1000ms de doble tiempo de viaje. Por debajo de ese horizonte se observan reflectores con discontinuidad de alta amplitud sin algún patrón de depósito, asociados con horizontes de brechas de impacto, cuya diagénesis es asociada al producto del impacto meteorítico (Grajales-Nishimura et al., 2000). A mayor profundidad, los reflectores se muestran más caóticos y sin continuidad alguna. Este otro paquete puede ser asociado con la roca ígnea de fusión, producto de la alteración que sufrieron los materiales al momento del impacto.



La sucesión sedimentaria del límite K/Pg, incluidas la brechas, se relaciona al resultado del colapso del margen Oeste de la plataforma de Yucatán como consecuencia de la sismicidad producida por el impacto meteorítico de Chicxulub, dichas condiciones inestables propiciaron la generación de múltiples fallas y fracturas a lo largo de la cuenca (Martínez-Ibarra, 2009).

Justo por debajo de este primer horizonte se aprecia la mayor zona de fallamiento y fractura, esto es atribuido a la ruptura de las capas producto del impacto (Figura V.32 Der.).

A partir de este horizonte se marcaron dos secuencias posteriores llamadas Pg1 y Pg 2, mostrados en color amarillo y anaranjado, respectivamente, los cuales continúan con la geometría que marca la base del cráter. Estos paquetes de reflectores pertenecen a secuencias del Paleoceno.

La razón de realizar la caracterización de las fallas solamente en esta sección se debe a que los datos trabajados son secciones sísmicas 2D, por lo que no es posible establecer un modelo de propagación de fallas. Con esta consideración, se decidió caracterizar solamente la sección más cercana y transversal a la zona de impacto.

El último horizonte marcado de color rojo muestra capas más gruesas que se relacionan con los sedimentos de plataforma y materiales depositados de forma continua, con una menor deformación y presencia de fallas.

Por encima del cuarto horizonte marcado, es posible apreciar secuencias de reflectores que también mantienen una continuidad. Dichos horizontes presentan una mejor continuidad, que en las secciones migradas, gracias al reprocesamiento de las imágenes sísmicas, en el cual se puede apreciar la tendencia al principio de horizontalidad en las secuencias de depósito, con un ligero basculamiento al Este (Figura V.31).

Apoyándose en los atributos sísmicos, principalmente el de gradiente de traza, coseno de fase y polaridad, se delimitaron los horizontes antes mencionados en las secciones reprocesadas para formar un modelo interpretativo en 3D de los horizontes (Figura V.32 Izq.).

A continuación se presentan los modelos donde se aprecia la cuenca de impacto y las secuencias de depósito posteriores al impacto (Figuras V.33 a V.37). Cabe mencionar que, al ser un modelo generado de secciones 2D y no un modelo obtenido a partir de un cubo sísmico 3D, la interpolación de los datos llega a tener variaciones un tanto abruptas que se buscó suavizar mediante el método

de mínima curvatura y poder mantener una buena correlación entre los valores interpolados entre las secciones sísmicas.

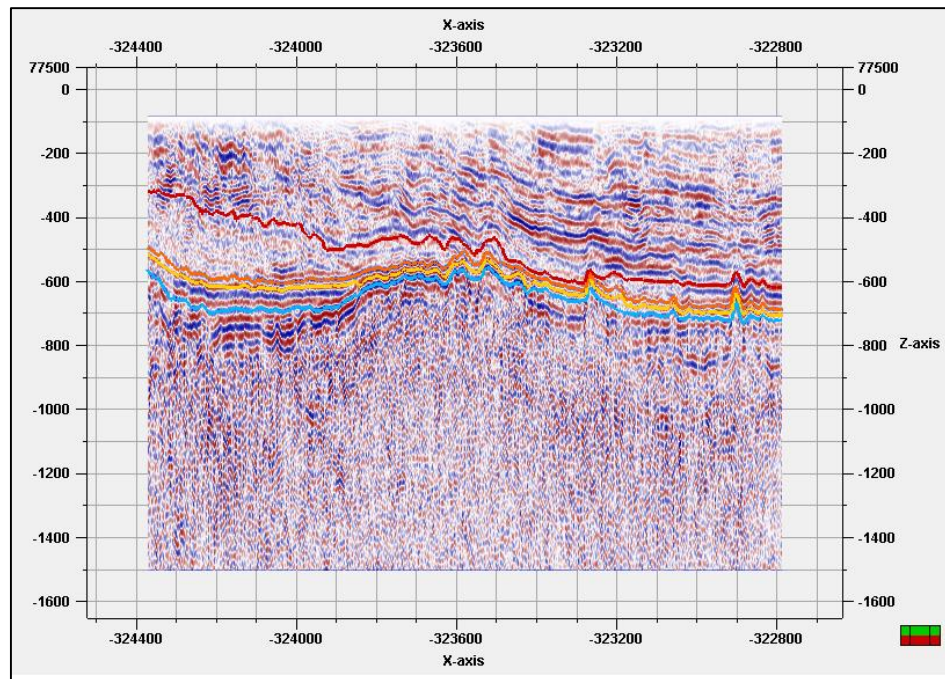


Figura V.31. Vista de los horizontes delimitados a lo largo de la sección sísmica de Chicx 09.

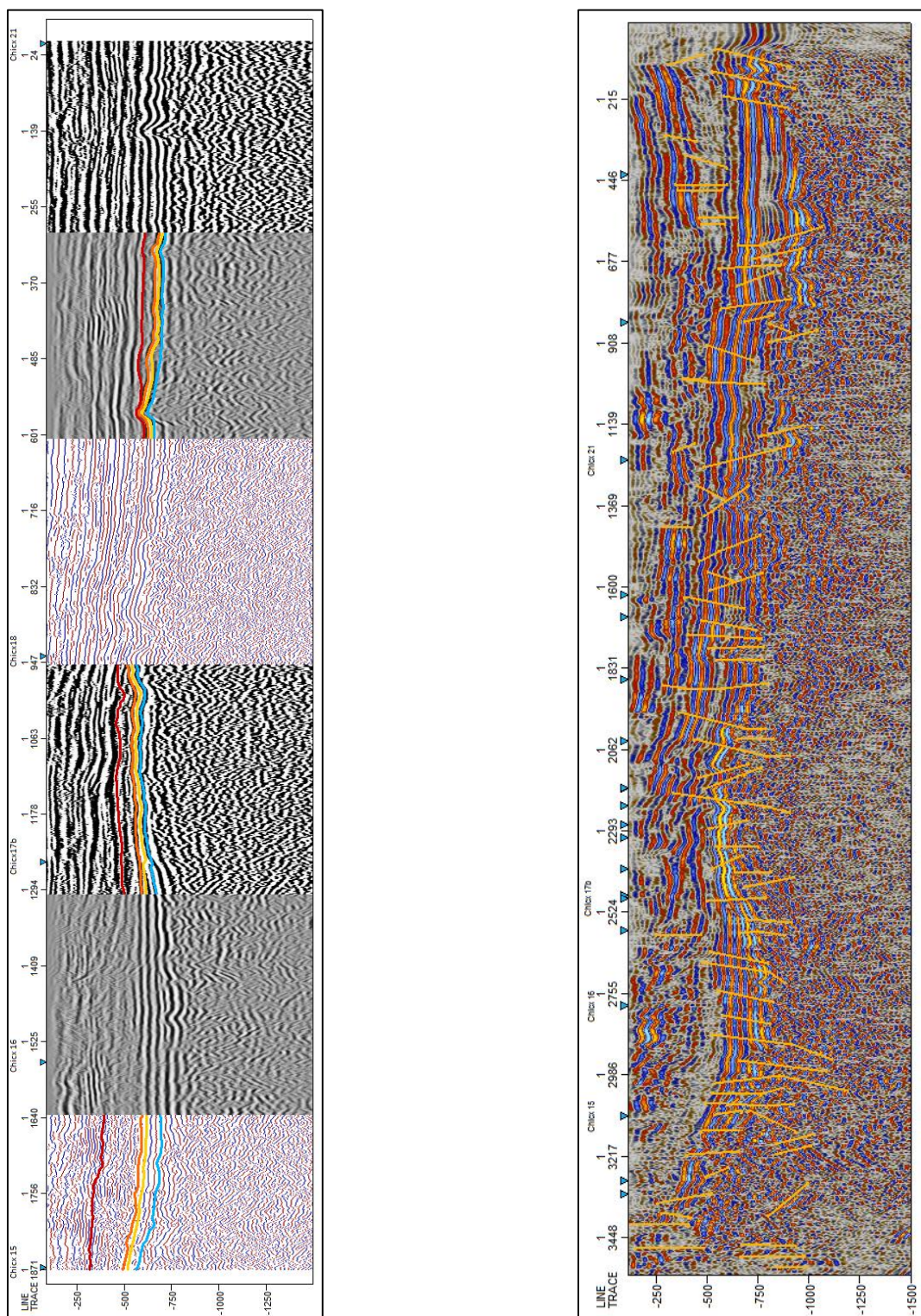


Figura V.32. Principales atributos empleados en la delimitación de los horizontes (Izq.) y la caracterización estructural interpretada de la sección Chicx 09 (Der.).

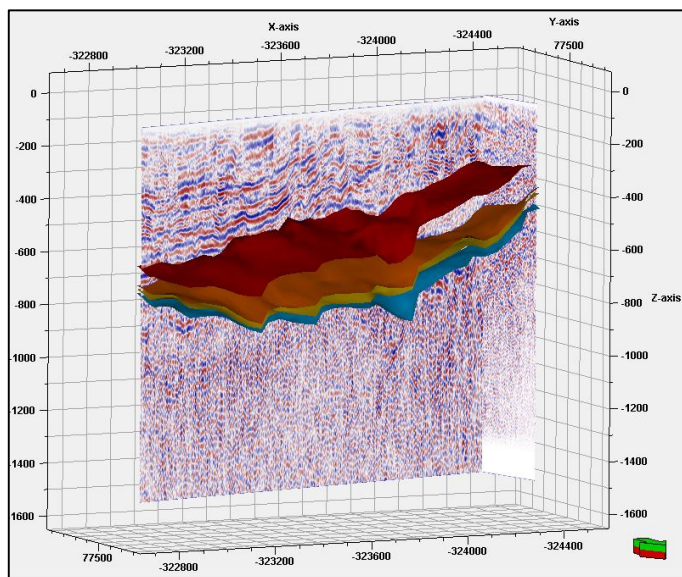


Figura V.33. Proyección de todas las superficies obtenidas a partir de los horizontes marcados en las secciones sísmicas.

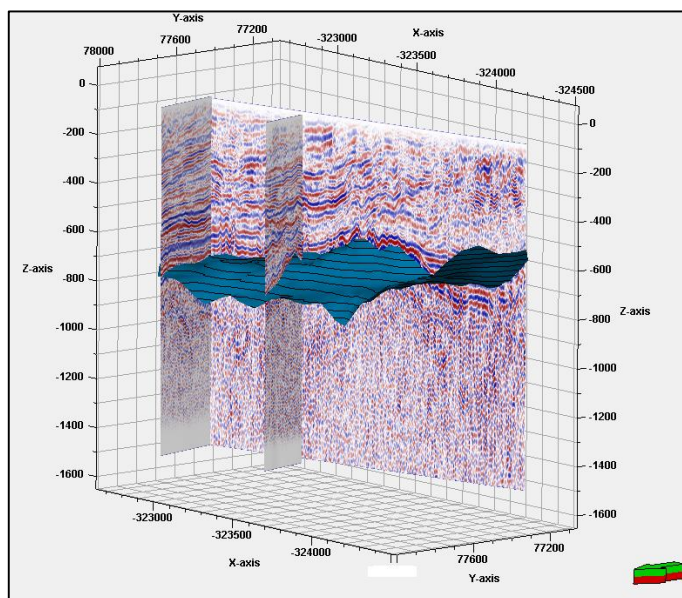


Figura V.34. Proyección del Límite K/Pg a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.

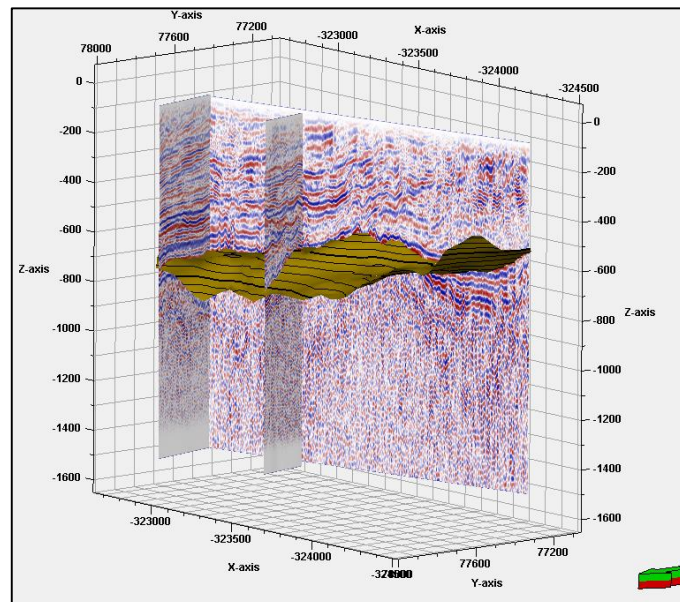


Figura V.35. Proyección de la superficie Pg 1 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.

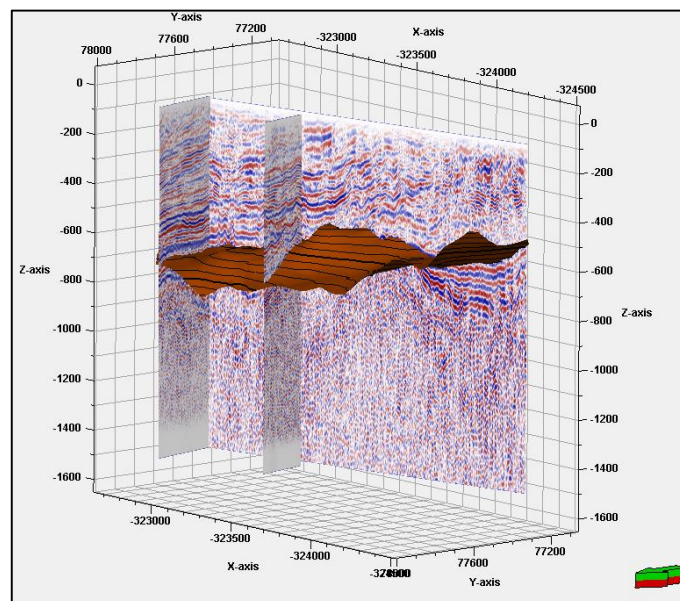


Figura V.36. Proyección de la superficie Pg 2 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.

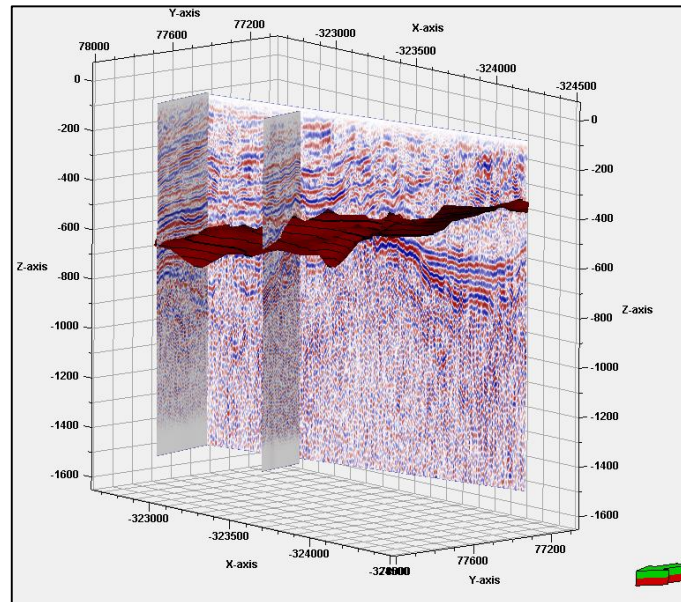


Figura V.37. Proyección de la superficie Pg 3 a lo largo de las secciones sísmicas Chicx 09 – Chicx 21 – Chicx 19.

En las figuras posteriores (Figuras V.39 a V.42), se muestran los horizontes por separado donde es posible apreciar su geometría, conformados por superficies no homogéneas que presentan altos y bajos, esto está relacionado con la forma del cráter, la cual indica una geometría de tipo peak ring. Entre la estructura central y el borde existen varios materiales transformados por el impacto: rocas fundidas, brecha y material colisionado (Grieve R. , 1990), lo cual origina la forma observada, corroborada con información aportada por estudios gravimétricos realizados en la zona (Figura V.38), (Barton et al., 2010).

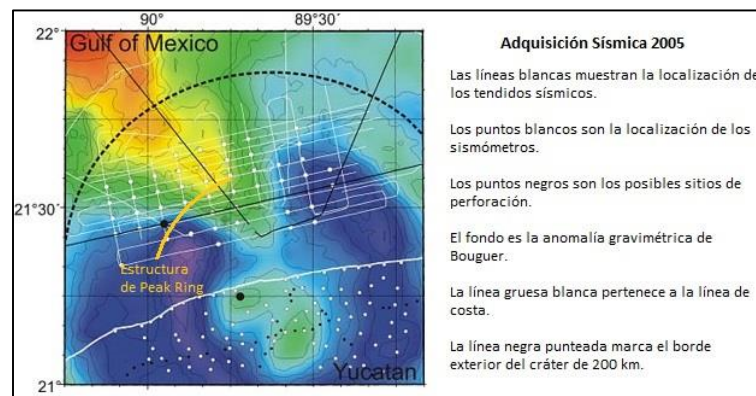


Figura V.38. Esquema del tendido sísmico usado en este trabajo superpuesto sobre un mapa de anomalía gravimétrica de Bouguer. La línea amarilla muestra la orientación de la estructura de tipo peak ring con la que se asocian los altos calculados en las secciones sísmicas (Barton et. al, 2010).

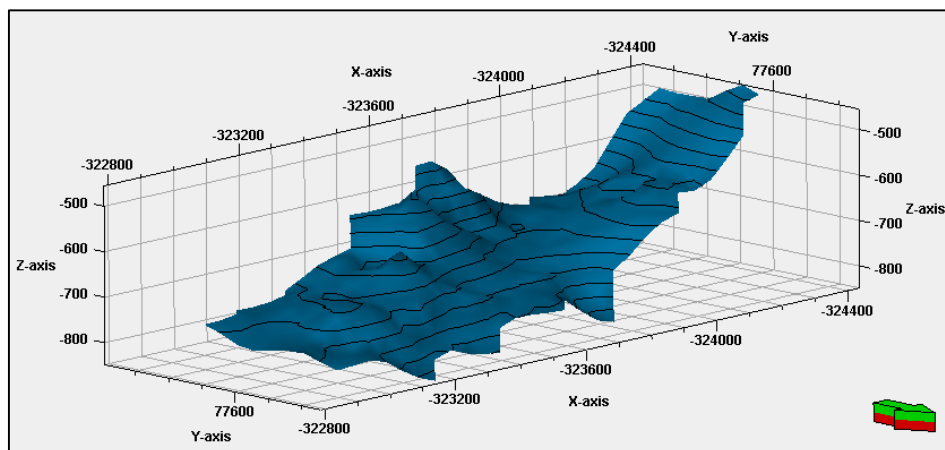


Figura V.39. Proyección del Límite K/Pg.

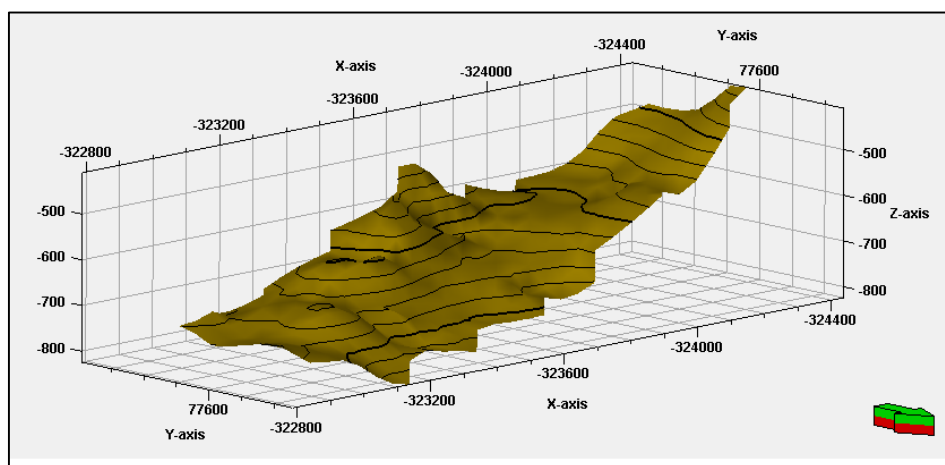


Figura V.40. Proyección del horizonte Pg 1.

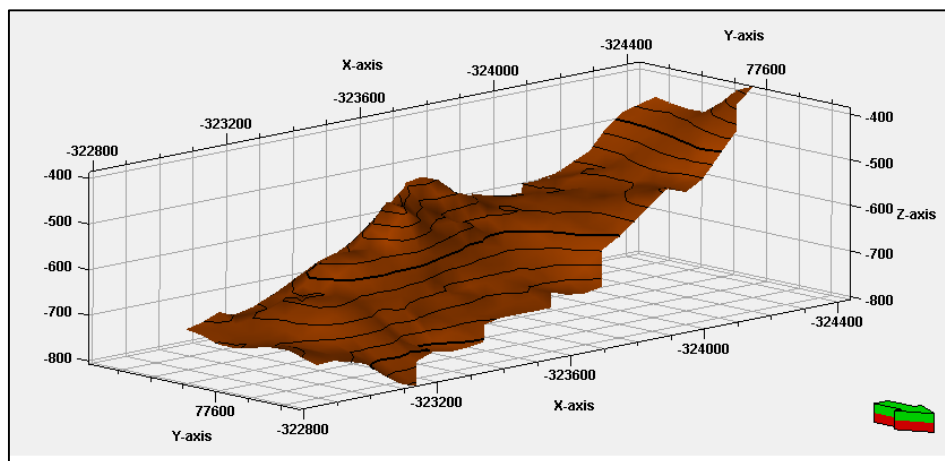


Figura V.41. Proyección del horizonte Pg 2.

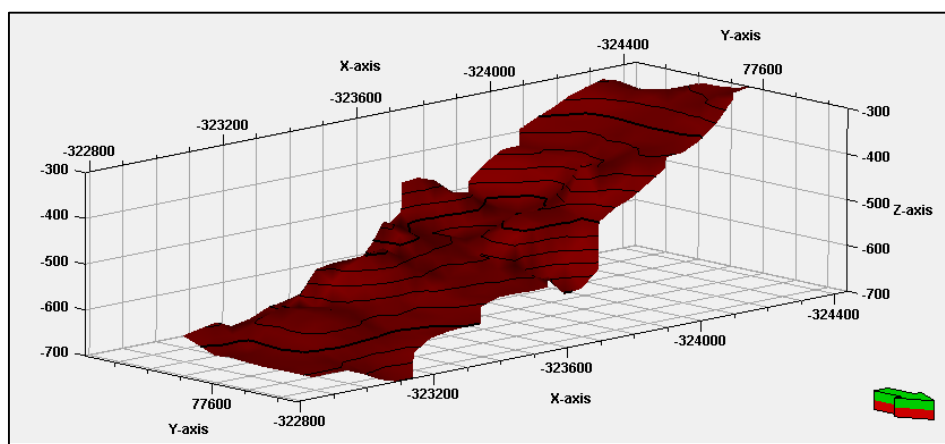


Figura V.42. Proyección del horizonte Pg 3.



VI CONCLUSIONES

Por medio del reprocesamiento sísmico, la resolución en la imagen sísmica tuvo una mejoría considerable y, con la aplicación de los atributos sísmicos, las características del cráter y su entorno presentaron una mejor interpretabilidad en la sección sísmica Chicx 09.

Cabe mencionar que el mejoramiento en algunas de las secciones sísmicas no es tan notorio como en la sección Chicx 09 (Chicx 06b, Chicx 08a, ver Anexo), esto puede ser atribuido a los parámetros empleados para realizar la deconvolución que, al restringirse al rango de las frecuencias contenidas en los datos, también se restringe la efectividad del método para ciertos reflectores. Sin embargo, la continuidad en los reflectores tuvo una mejoría con lo que una caracterización más a detalle sobre estas secciones pudo ser aplicada

El cráter está relleno de tres secuencias estratigráficas del Paleógeno (Pg1, Pg2, Pg3). Estas secuencias están compuestas de sedimentos carbonatados con procesos de formación distintos.

El piso del cráter se encuentra marcado por el contacto entre las brechas de impacto y los sedimentos carbonatados del Paleógeno. Su geometría es irregular debido a la deformación y fallamiento producto del impacto. Debajo de este piso es posible visualizar la firma sísmica de la brecha calcárea por debajo de dicho horizonte, compuesta por reflectores altamente discontinuos. La distribución de las brechas no es homogénea a lo largo de la cuenca de impacto.

El análisis estratigráfico de los principales horizontes se basó en observar y marcar los reflectores de mayor energía y continuidad a lo largo de los perfiles. Además, en la sección Chicx 09, se caracterizan paquetes de reflectores menos energéticos pero que mostraran rasgos comunes, principalmente en la zona por debajo del límite de impacto, atribuidos a las brechas.

Estructuralmente, se observa un sistema de fallamiento asociado al proceso de ruptura producto del impacto. En este sistema, se pueden asociar los límites de los anillos del cráter y delimitar una zona de terrazas con bloques desplazados en dirección del centro del cráter.

La falta de perforación de pozos cercanos a la zona de impacto no ha permitido la calibración de las mediciones geofísicas y confirmar la distribución litológica de impacto en el cráter y su zona exterior. De lo contrario, el modelo litológico de Chicxulub continuará sin solución única y en controversia.



El mejoramiento de la imagen sísmica en la zona, así como su caracterización por medio de atributos, ayudan a poder plantear investigaciones futuras para sustentar las interpretaciones realizadas por este tipo de estudios y confirmar los modelos establecidos.

ANEXO A: Reprocesamiento Líneas Sísmicas

CHICX 05

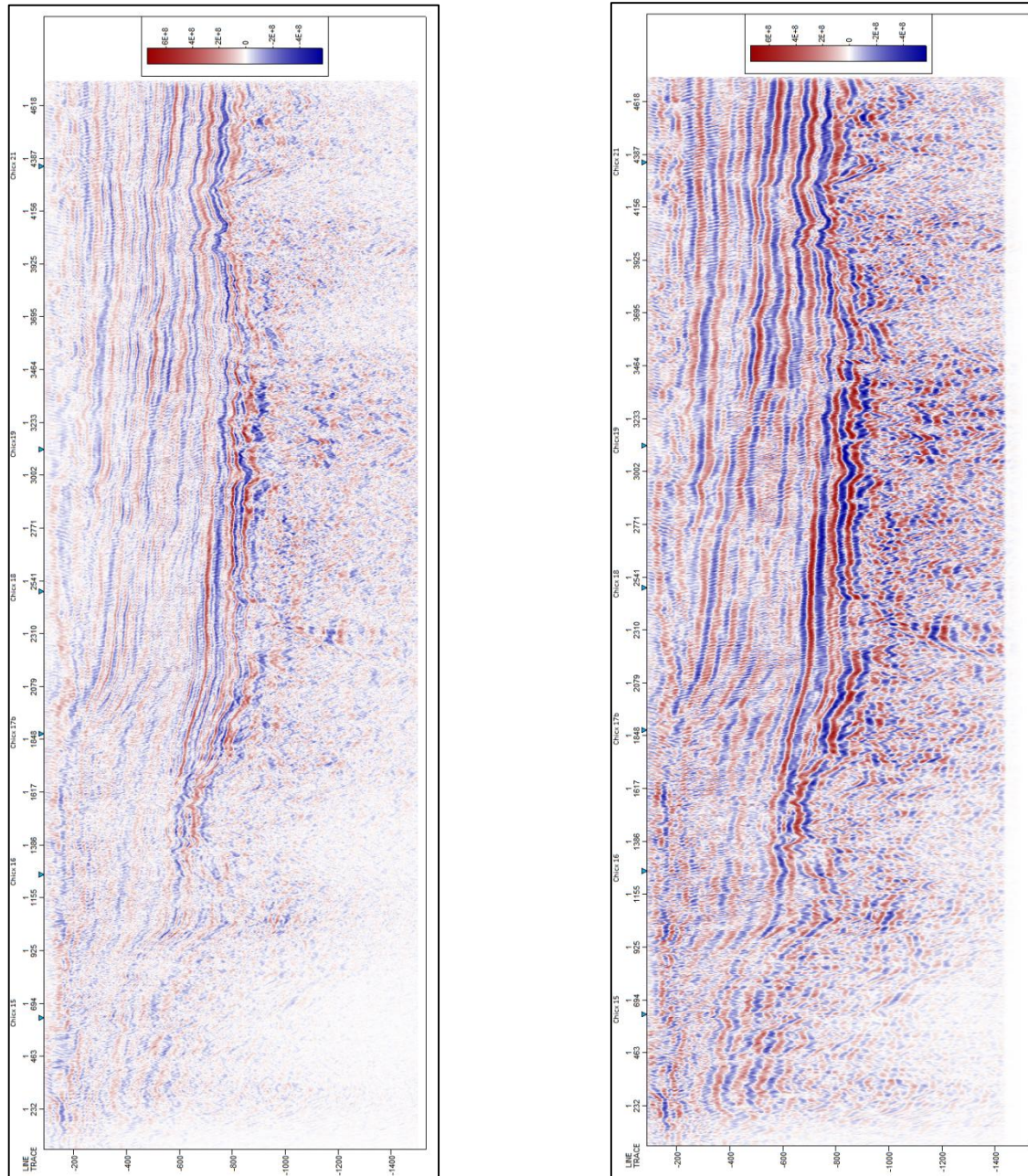


Figura A. 1. Sección Chicx 05 original (Izquierda) y reprocesada (Derecha). Se aprecia una recuperación en los reflejos, principalmente, en la zona superior Este de la sección.

CHICX 06B

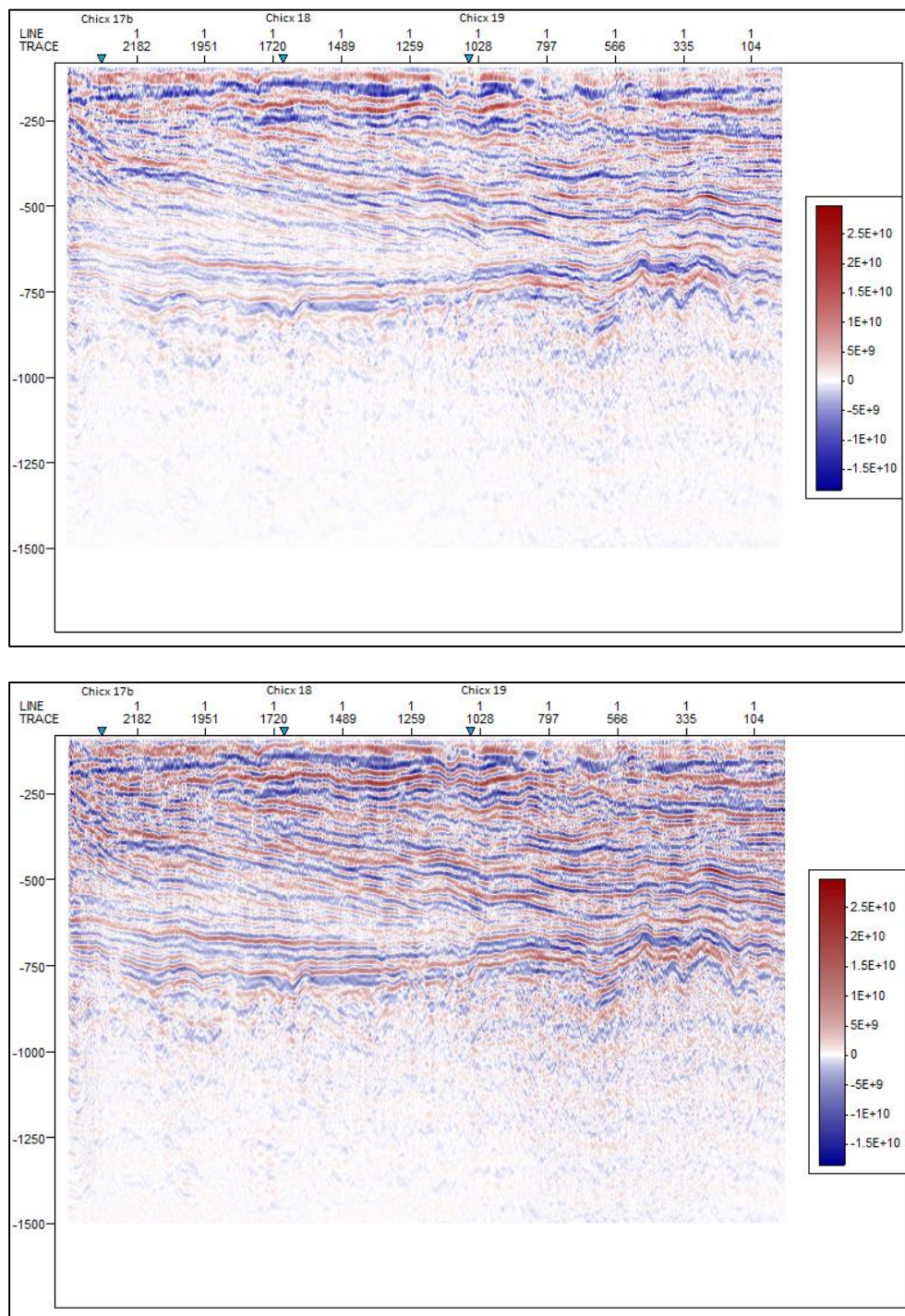


Figura A. 2. Sección Chicx 06b original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 8A

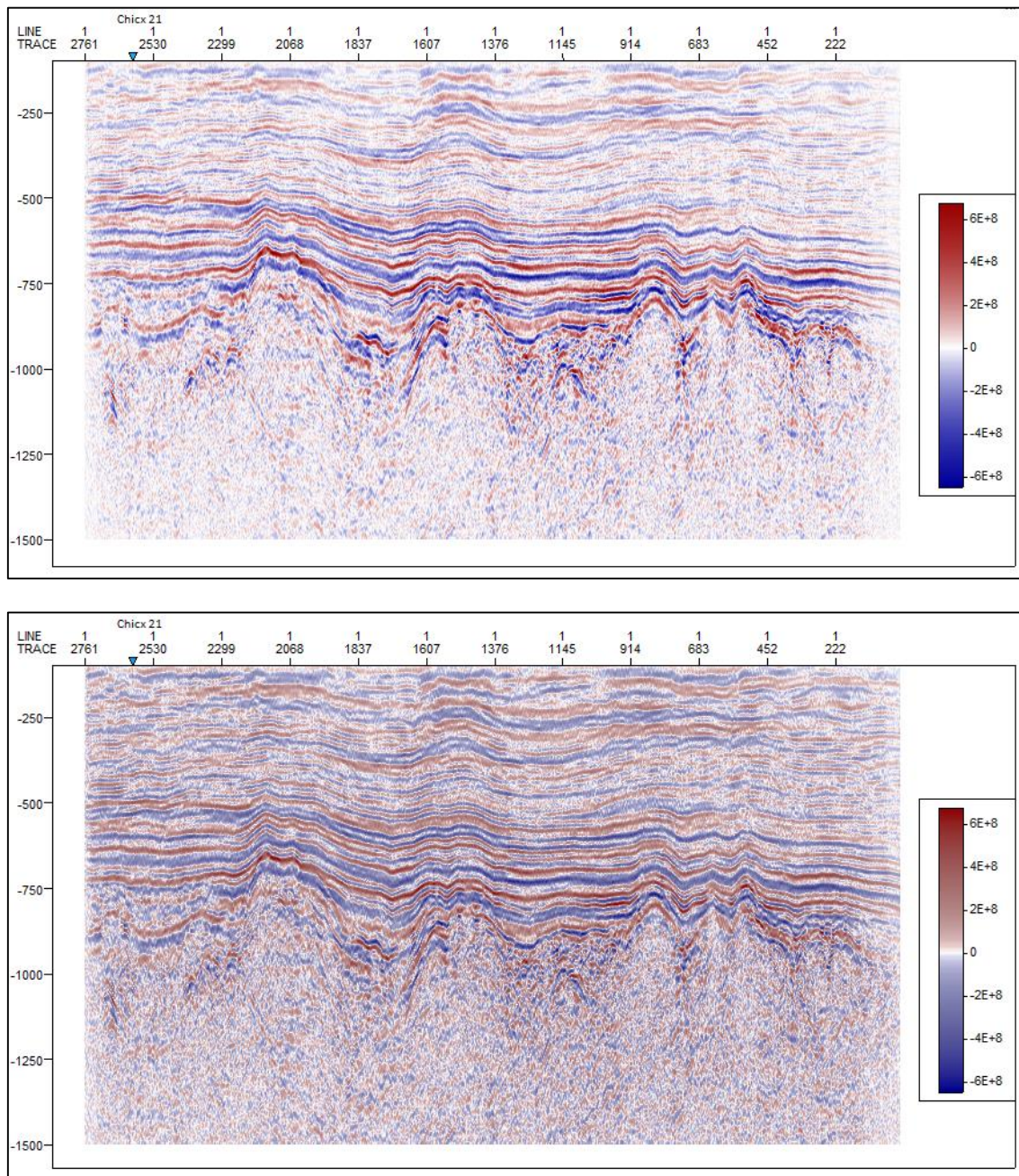


Figura A. 3. Sección Chicx 08a original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 08B

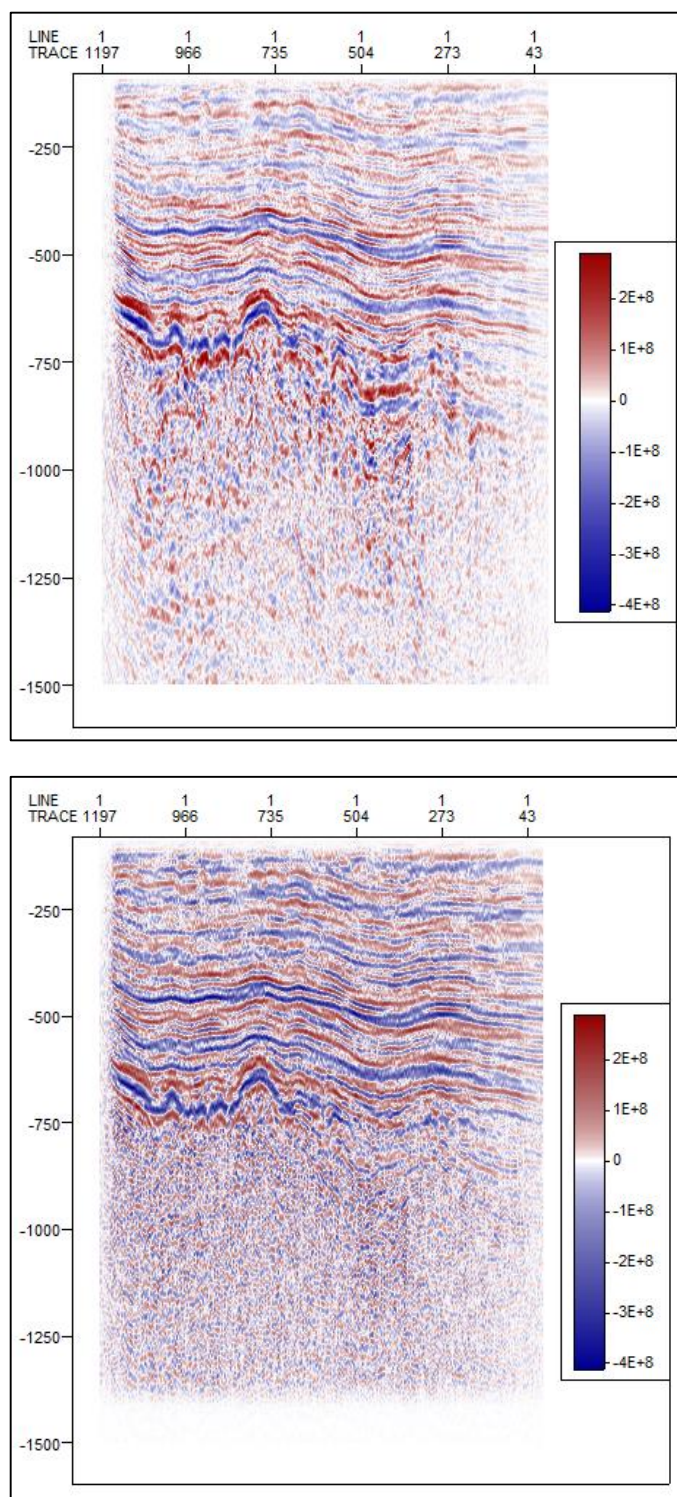


Figura A. 4. Sección Chicx 08b original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 08C

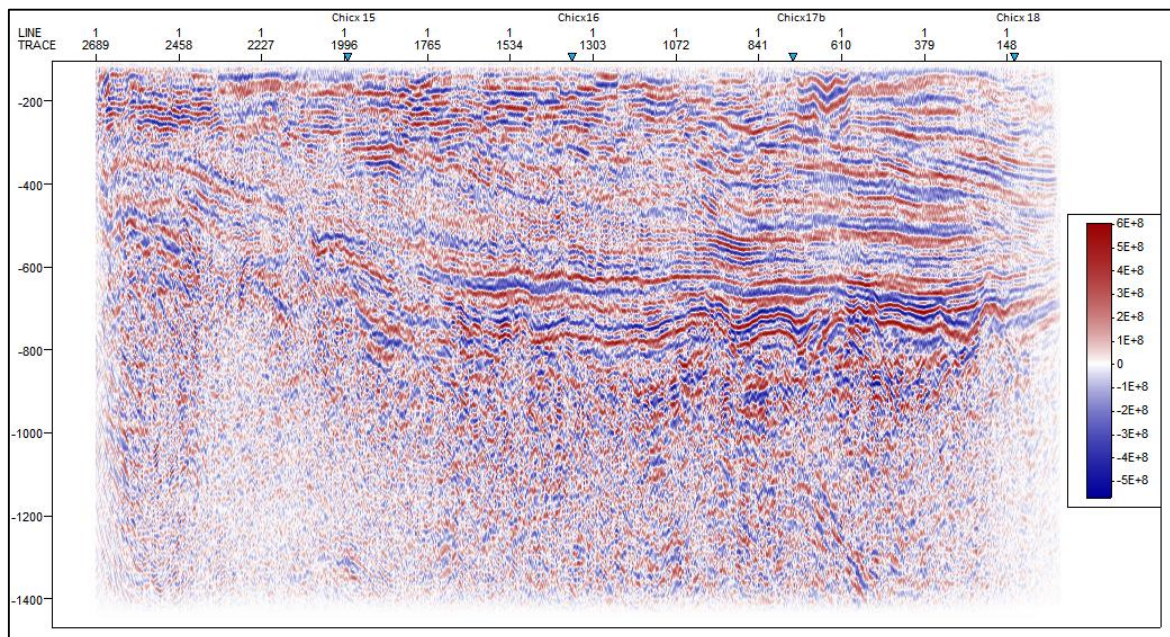
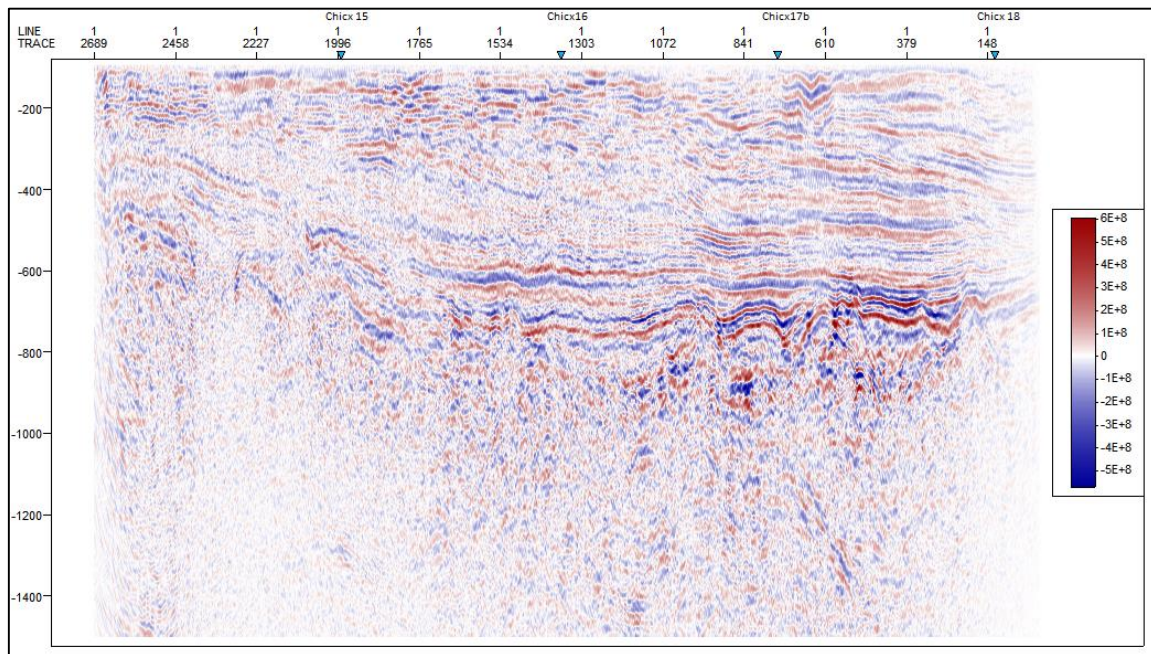


Figura A. 5. Sección Chicx 08c original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 15

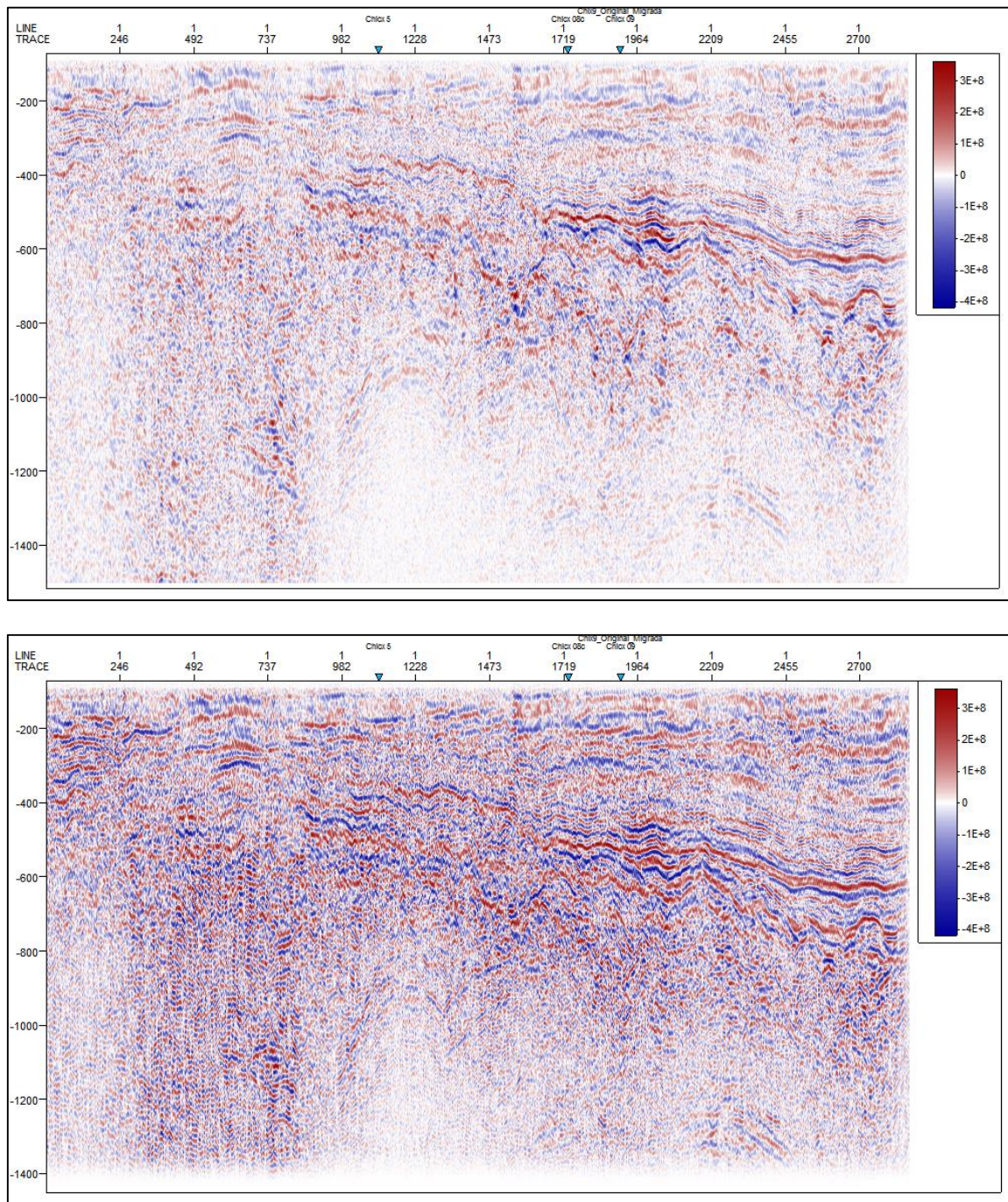


Figura A. 6. Sección Chicx 15 original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 16

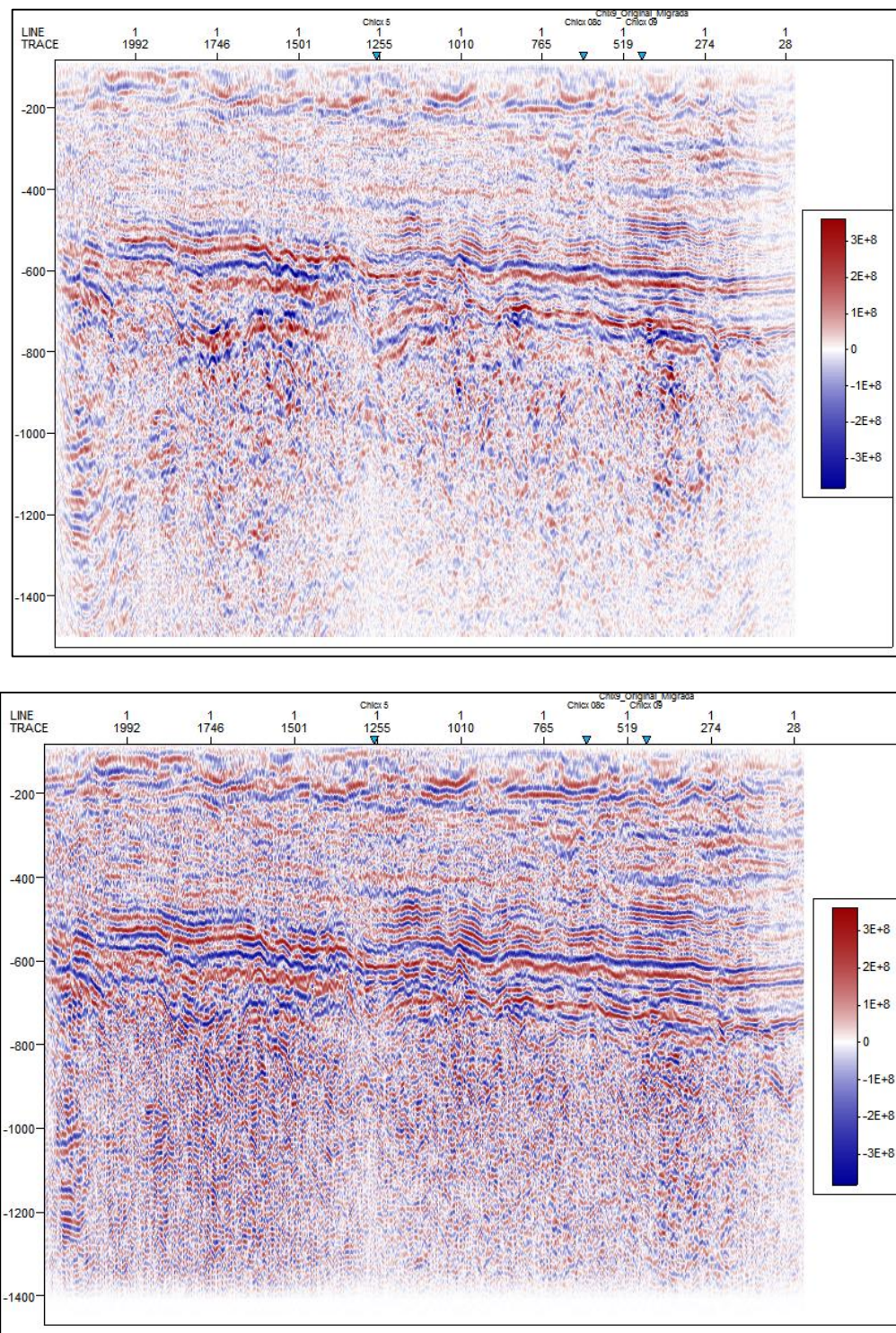


Figura A. 7. Sección Chicx 16 original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 17B

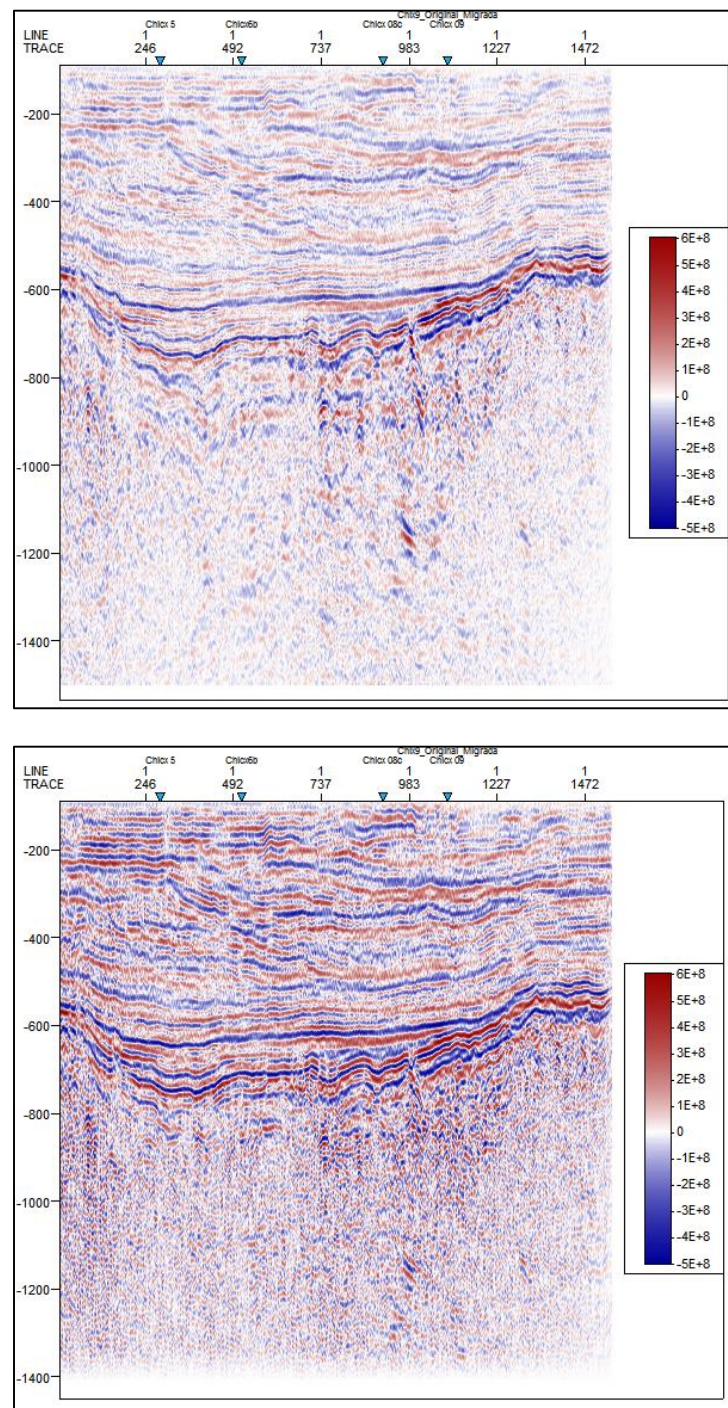


Figura A. 8. Sección Chicx 17b original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 18

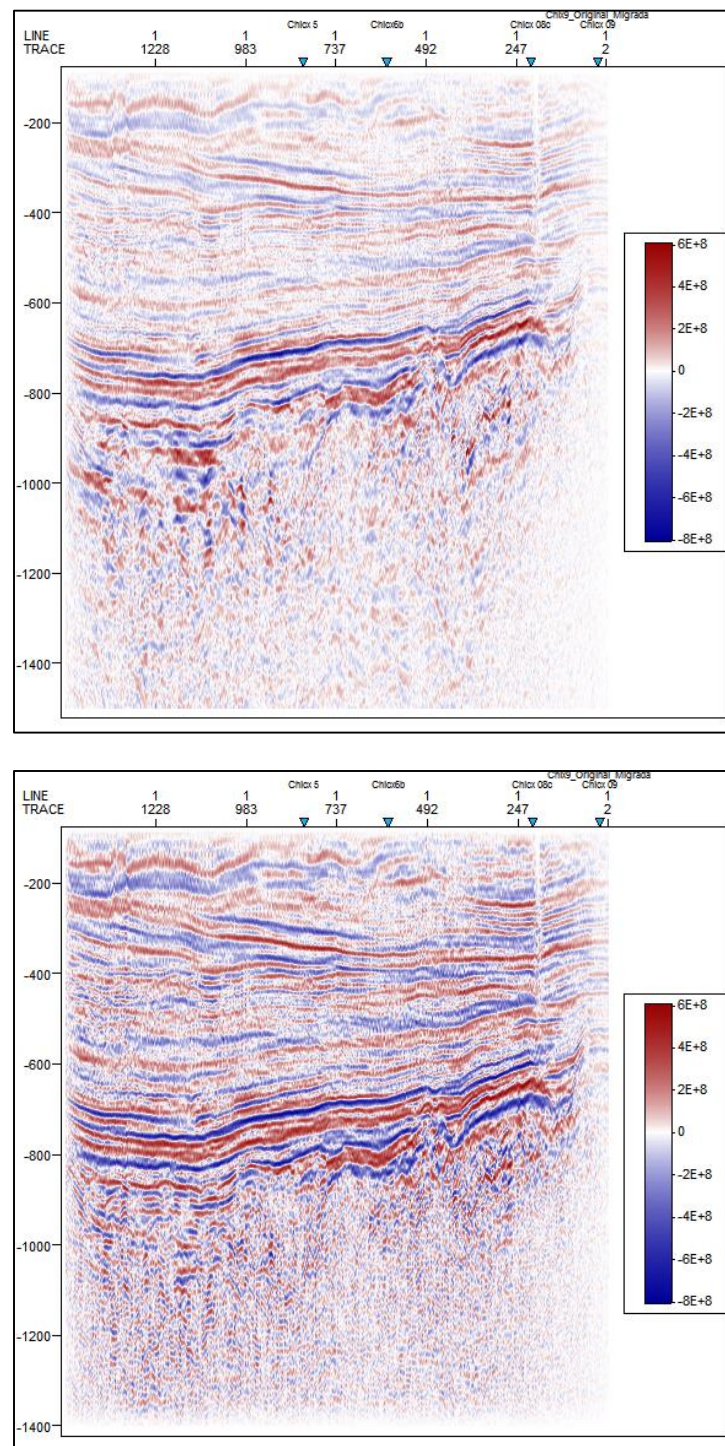


Figura A. 9. Sección Chicx 18 original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 19

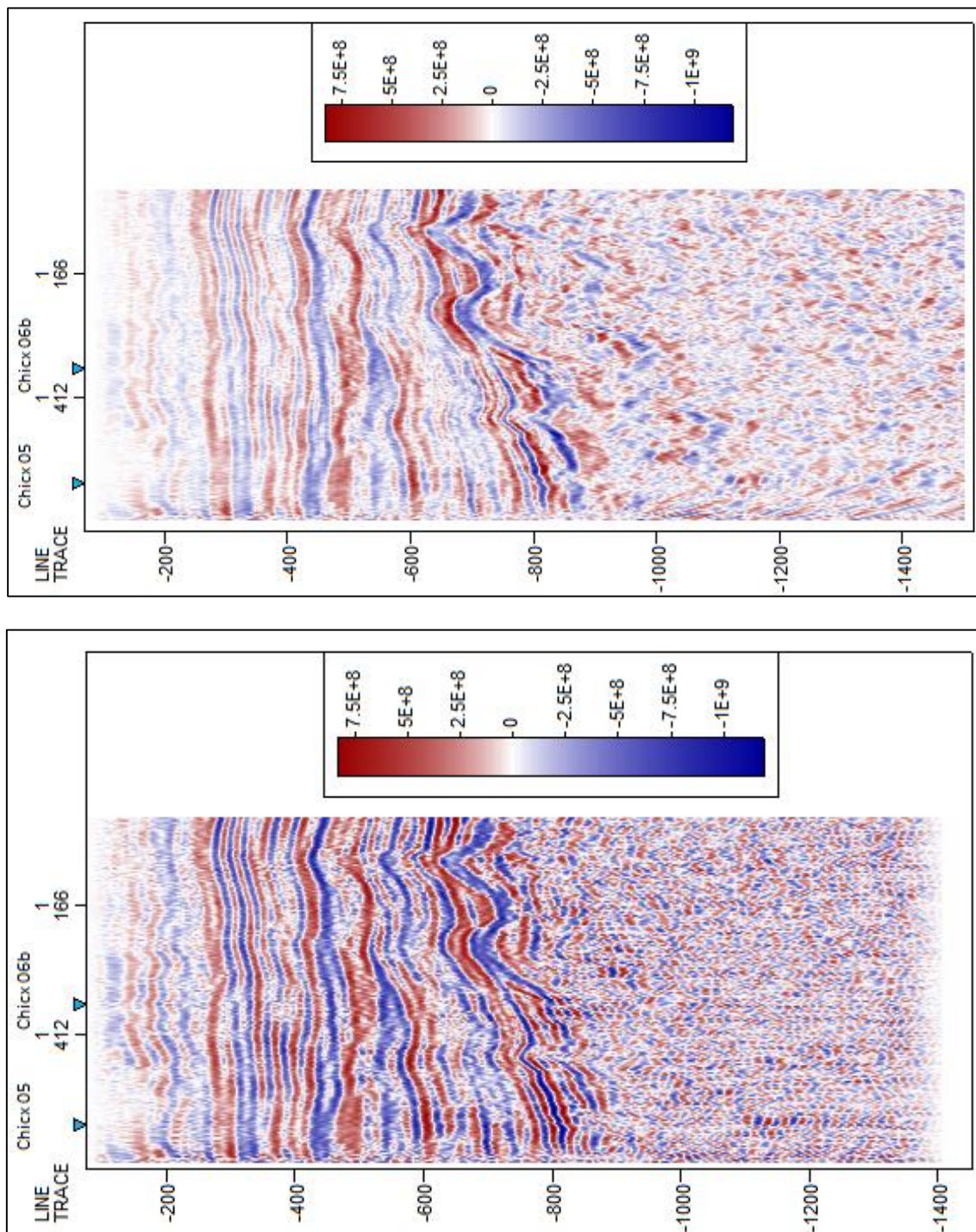


Figura A. 10. Sección Chicx 19 original (Arriba) y reprocesada (Abajo).

CHICX 21

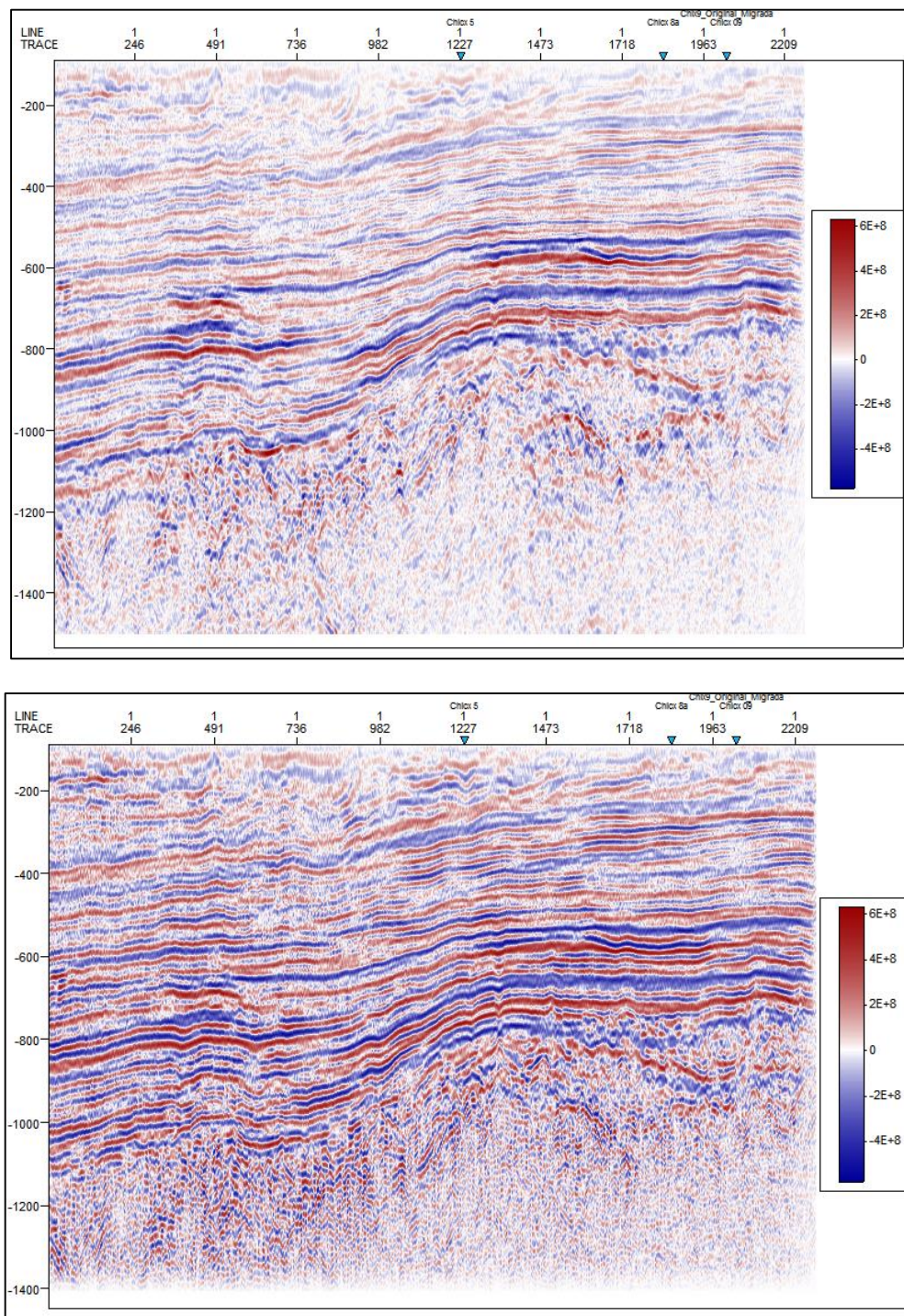


Figura A. 11. Sección Chicx 21 original (Arriba) y reprocesada (Abajo).



Bibliografía

- Álvarez, M. (1966). *Clasificación de Rocas Carbonatadas*. México, D.F.: Comisión Nacional de Energía Nuclear de México.
- Arenillas, I., Arz, J., Grajales-Nishimura, J., Murillo-Muñetón, G., Álvarez, W. C.-Z., Molina, E., & Rosales-Domínguez, C. (2006). Chicxulub Impact Event is Cretaceous/Paleogene Boundary in Age: New Micropaleontological Evidence. *Earth & Planetary Science Letters*, 249(3-4), 241-257.
- Bancroft, J. C., Guirigay, T., & Isaac, H. (2011). Enhancing a Seismic Image After Migration Using deconvolution. *CREWES*, paper 5.
- Barnes, A. (2001). Seismic Attributes in your Facies. *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 41-47.
- Barnes, A. (2007). A Tutorial on Complex Seismic Trace Analysis. *Geophysics*.
- Barton, P. J., Grieve, R. A., & Morgan, J. V. (2010). Seismic Images of Chicxulub Impact Melt Sheet & Comparison with the Sudbury Structure. *Geological Society of America Special Papers*, 103-113.
- Brittan, J., Morgan, J., Warner, M., & Marin, L. (1999). Near-Surface Seismic Expression of the Chicxulub Impact Crater. *Geological Society of America, Special Paper 339*, 269-279.
- Brown, A. (1996). Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. *AAPG Memoir 42*.
- Brown, A. (2001). Understanding Seismic Attributes. *Geophysics*, 47-48.
- Burns, W. R. (1968). A Statistically Optimized Deconvolution. *Geophysics*, 255-263.
- Campos-Enriquez, J. O., Arzate, J. A., Urrutia-Fucugauchi, J., & Delgado, O. (1997). The Subsurface Structure of the Chicxulub Crater: Preliminary Results of a Magnetotelluric Study. *The Leading Edge*, 1774-1777.
- Canales-García, I. (2013). Interpretación Estructural y Estratigráfica en Perfiles Sísmicos de Reflexión del Cráter de Chicxulub. *Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, pp. 107. México.
- Chambers, R. L., & Yarush, J. M. (2002). *Quantitative Geosciences Incorporation*. Ok, U.S.A.: Broken Arrow.



- Chelotti, L., Acosta, N., & Foster, N. (2009). *Geofísica Aplicada*. Chubut, Argentina: U.N.P.S.J.B.
- Chopra, S., & Marfurt, K. (2005). Seismic Attributes "A Historical Perspective". *Society of Exploration Geophysicists*, 3-28.
- Chopra, S., & Marfurt, K. (2007). *Seismic Attributes for Prospect Identification & Reservoir Characterization*. Tulsa, OK, U.S.A.: Society of Exploration Geophysicists.
- 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*, 291-298.
- Dence, M. (1972). The Nature & Significance of Terrestrial Impact Structures. *24th International Geological Congress*, 77-89.
- Fontana, P. (2006). *Marine 3D Seismic Surveys "Towed Streamer Survey Design & Data Acquisition"*. Texas: Jackson School of Geosciences, UTIG.
- Grajales-Nishimura, J. M., Cedillo-Pardo, E., Rosales-Domínguez, C., Morán-Zenteno, D., Alvarez, W., Claeys, P., . . . Sánchez-Ríos, A. (2000). Chicxulub Impact: The Origin of Reservoir & Seal Facies in the Southeastern Mexico Oil Fields. *Geology*, 307-310.
- Grieve, R. (1990). Impact Cratering on the Earth. *Scientific American*, 262.
- Grieve, R., & Pesonen, L. J. (1992). The Terrestrial Impact Cratering Record. *Tectonophysics*, 216. 1-30.
- Hildebrand, A., Penfield, G., Kring, D., Pilkington, M., Camargo, Z., Jacobsen, S., & Boynton, W. (1991). Chicxulub Crater: A Possible Cretaceous/Tertiary Boundary Impact Crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 867-871.
- Institute for Geophysics, University of Texas. (2005). *UTIG*. Obtenido de <http://www.ig.utexas.edu/people/staff/sean/projects/chicxulub/>
- Institute for Geophysics, University of Texas. (2013). *UTIG*. Obtenido de <http://www.ig.utexas.edu/>
- Iske, A., & Randen, T. (2005). *Mathematical Methods & Modelling in Hydrocarbon Exploration & Production* (Vol. 7). Springer.



- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Oxford: Blackwell.
- López Ramos, E. (1975). *Geological summary of the Yucatán Peninsula*. En: *The Ocean Basins and Margins*. New York: Plenum.
- Lounejeva, E. (2001). *Mineralogía y Petrología de las Rocas Fundidas del Cráter Chicxulub, México*. México, D.F.: Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Martínez-Ibarra, R. (2009). Dolomitización y Generación de Porosidad Vugular en la Brecha K/T del Campo Cantarell, Zona Marina-Campeche. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias*. Centro de Geociencias, UNAM. Ciudad Universitaria, México, D.F.
- Morgan, J. V., & Warner, M. R. (1997). Size & Morphology of the Chicxulub Impact Crater. *Nature*, 472-476.
- Morgan, J., & Warner, M. (1999). Morphology of the Chicxulub Impact: Peak-ring Crater or Multi-rin Basin. *Geological Society of America Special Paper*, 339, 281-290.
- Ocampo, A., Pope, K., & Fischer, A. (1996). Ejecta Blanket Deposits of the Chicxulub Crater from Albion Island, Belize. *Geological Society of America*, 75-88.
- Ortiz Alemán, C., Urrutia Fucugauchi, J., Rebolledo Vieyra, A. M., & Delgado Rodríguez, O. (2002). *Investigaciones Geofísicas sobre Cráteres de Impacto y el Cráter de Chicxulub (Yucatán, México)*. México, D.F.: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Padilla-Sánchez, R. (2007). Evolución Geológica del Sureste Mexicano desde el Mesozoico hasta el Presente en el Contexto Regional del Golfo de México. *Sociedad Geológica Mexicana*, 19-42.
- Perry, E., Velázquez-Oliman, G., & Socki, R. (2003). Hydrogeology of the Yucatán Peninsula. En A. Gomez-Pompa, M. Allen, S. Fedick, & J. Jiménez, *The Lowland Maya Area "Three Millennia at the Human-Wildland Interface"* (pág. 643). London: Haworth Press.
- Pilkington, M., & Hildebrand, A. (2000). Three dimensional Magnetic Imaging of The Chicxulub Crater. *Journal of Geophysical Research*, 479-490.



- Pilkington, M., Hildebrand, A., & Ortíz-Alemán, C. (1994). Gravity & Magnetic Field Modelling and Structure of the Chicxulub Crater. *Journal of Geophysical Research*, 147-162.
- Rebolledo, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L. E., Trejo-García, A., Sharpton, V. L., & Soler-Arechalde, A. M. (2000). UNAM Scientific Shallow-Drilling Program of the Chicxulub Impact Crater. *Geology Review*, 928-940.
- Salguero-Hernández, E. (2008). Atributos Sísmicos y Caracterización de Propiedades Petrofísicas en la Secuencia Carbonatada de Chicxulub. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM*, pp. 108. México.
- Salguero-Hernández, E., Urrutia-Fucugauchi, J., & Ramírez-Cruz, L. (2010). Fracturing & Deformation in the Chicxulub Crater "Complex Trace Analysis of Instantaneous Seismic Attributes". *Revista MEXicana de Ciencias Geológicas*, v. 27, 175-184.
- Schlumberger. (2009). *Interpreter's Guide to Seismic Attributes*. Houston, TX.
- Schuraytz, B. C., Sharpton, V. L., & Marin, L. E. (1994). Petrology of Impact-Melt Rocks at the Chicxulub Multiring Basin, Yucatán, México. *Geology*, 868-872.
- Sharpton, V., Dalrymple, G., Martin, L., Ryder, G., Schuraytz, & Urrutia-Fucugauchi, J. (1992). New Links Between the Chicxulub Impact Structure and the Cretaceous/Tertiary Boundary. *Nature*, 819-821.
- Sheriff, R. (1991). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*. Tulsa, U.S.A.: Society of Exploration Geophysicists.
- Sheriff, R. E. (1997). Seismic Resolution a Key Element. *Geophysical Corner*, 45-51.
- Sheriff, R., & Geldart, L. (1995). *Exploration Seismology*. Houston, TX: Cambridge.
- Stinnesbeck, W., Keller, G., Adatte, T., Harting, M., Stüben, D., Istrate, G., & Kramar, U. (2004). Yaxcopoil-1 & the Chicxulub Impact. *International Journal of Earth Sciences*, 1042-1065.
- Stoker, M., Pheasant, J., & Josenhans, H. (1997). Seismic Methods & Interpretation. En *Glaciated Continental Margins* (págs. 9-26). Springer.
- Taner, M. F., Koehler, F., & Sheriff, R. E. (1979). Complex Seismic Trace Analysis. *Geophysics*, 1041-1063.



- Taner, M. T. (2001). *Seismic Attributes*. Houston, U.S.A.: CSEG Recorder.
- Taner, M., & Sheriff, R. (1977). Application of Amplitude, Frequency & Other Attributes to Stratigraphic & Hydrocarbon Determination. *Petroleum Geologists*, 301-327.
- Taner, M., Schuelke, J., O'Doherty, R., & Baysal, E. (1995). Seismic Attributes Revisted. *Society of Exploration Geophysics Expanded Abstracts*, 1104-1106.
- Van Bemmell, P., & Pepper, R. (2000). *United States Patente n° 615155*.
- Vermeer, G. (2012). Marine Seismic Data Acquisition. En *3D Seismic Survey Design* (págs. 143-206). Society of Exploration Geophysicists.
- Vermeesch, P. M., & Morgan, J. V. (2008). Structural Uplift Beneath the Chicxulub Impact Structure. *Journal Geophysical Research*, 1-10.
- Ward, W. C., Keller, S. W., & Adatte, T. (1995). Yucatan Subsurface Stratigraphy: Implications & Constrains for the Chicxulub Impact. *Geology*, 873-876.
- Weidie, A., Ward, W., & Back, W. (1985). *Geology & Hydregeology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. New Orleans: New Orleans Geological Society.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis "Processing, Inversion & Interpretation of Seismic Data"*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.