



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS ESTRUCTURAL-ESTRATIGRÁFICO DEL CRÁTER CHICXULUB A PARTIR DE DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

IZA CANALES GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

JURADO:

DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ

DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO

DR. GUILLERMO ALEJANDRO PÉREZ CRUZ

M. C. DAVID ESCOBEDO ZENIL



Ciudad Universitaria 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A mis maestros, en especial al Dr. Jaime Urrutia por su tiempo y apoyo en la elaboración de éste trabajo, por brindarme un espacio para trabajar y sobre todo por su valioso ejemplo y sencillez, al Dr. Guillermo Pérez Cruz, por sus comentarios, por toda la disposición y ayuda dentro y fuera de clases.

A mi familia. Mis papás, porque a pesar de sus diferencias siempre me han ayudado y apoyado incondicionalmente, gracias a los dos por su amor. A Victor por estar conmigo en los momentos difíciles, compartir los felices y preparar los que vienen. A Regina por dejarme quererla y por quererme tanto. A Nacho, Susa, Chabe, Mancis y Lupe, por cuidarme y ayudarme siempre. A Elena y Alan por ser mis amigos. A Daniel por escucharme y por todo lo que me haz ayudado desde el día que te conocí. A la Banda Gorda por los días y noches de baile y helado. A Hoil, Liliana, Pamela y Esmeralda, por la nueva amistad, a pesar del poco tiempo. A todos muchas gracias.

Índice

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. ÁREA DE ESTUDIO	4
II.1. PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN	4
II.1.1. <i>Generalidades</i>	4
II.1.2. <i>Geología</i>	5
II.2. CRÁTER CHICXULUB.....	7
II.2.1. <i>Formación de un cráter</i>	7
II.2.2. <i>Hipótesis del impacto</i>	10
III. ESTUDIO SÍSMICO DE REFLEXIÓN	13
III.1. SÍSMICA DE REFLEXIÓN.....	13
III.2. TRABAJO DE CAMPO	15
III.3. ADQUISICIÓN	16
III.3.1. <i>Campaña de 1996</i>	17
III.3.2. <i>Campaña de 2005</i>	18
III.4. PROCESADO DE LÍNEAS.....	20
III.4.1. <i>Campaña de 1996</i>	24
III.4.2. <i>Campaña de 2005</i>	26
IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL ESTRATIGRÁFICO	28
IV.1. INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN SÍSMICA	28
IV.2. INTERPRETACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS EN CHICXULUB	32
IV.2.1. <i>Línea A₀</i>	34
IV.2.2. <i>Línea A₁</i>	38
IV.2.3. <i>Línea B</i>	44
IV.2.4. <i>Línea C</i>	49
IV.2.5. <i>Línea R₁</i>	54
IV.2.6. <i>Línea R₃</i>	60
IV.2.7. <i>Línea R_{6a}</i>	65
IV.2.8. <i>Línea R_{6b}</i>	68
IV.3. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS DE POZO	71
V. DISCUSIÓN.....	79
V.1. LÍNEA A ₀	81
V.2. LÍNEA A ₁	83
V.3. LÍNEA B	84
V.4. LÍNEA C	86
V.5. LÍNEA R ₁	88
V.6. LÍNEA R ₃	90

V.7. LÍNEA R_{6A}	91
V.8. LÍNEA R_{6B}	92
VI. CONCLUSIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98

Resumen

El cráter Chicxulub, ubicado en la península de Yucatán, es de gran interés, debido a su importante relación con la extinción masiva de finales del Cretácico además de ser uno de los cráteres de impacto de mayor tamaño mejor preservados en el planeta. Se ha estudiado con una gran variedad de técnicas geofísicas, como la gravimetría, magnetometría, recuperación continua de núcleos en perforación de pozos, así como diversas campañas de adquisición de datos sísmicos marinos. Todas ellas con el objetivo de investigar la estructura del cráter y hacer una correlación estratigráfica y litológica de los materiales que lo conforman.

Entre los estudios realizados, las campañas de adquisición sísmica marina, se han encargado de mostrar las características del cráter, que yacen bajo las aguas de Golfo de México. En éste trabajo se presenta el análisis estructural y estratigráfico de ocho secciones sísmicas obtenidas en dos campañas de adquisición diferentes, la primera en 1996 y la segunda en 2005.

Las interpretaciones obtenidas, muestran los principales estratos que conforman el área de estudio, los cuáles son el límite Cretácico- Terciario ubicado justamente por debajo de la estructura y otro reflector de alta energía y gran continuidad dentro de la secuencia sedimentaria del Cretácico, así como los elementos estructurales que los afectan, definidos como fallas normales que se inclinan hacia el centro del cráter y finalmente, se discute cómo éstos elementos en conjunto delimitan la geometría del cráter. Nuestros modelos y observaciones concuerdan con la propuesta hecha por diversos autores, de que Chicxulub es una estructura de tipo multianillo con una estructura central de tipo peak ring,

I. Introducción

El cráter Chicxulub se formó hace cerca de 65 millones de años como producto del impacto de un asteroide de entre 10-13 km de diámetro aproximadamente, sobre la plataforma carbonatada de Yucatán, en el sureste de México.

La importancia de estudiar Chicxulub, radica en su tamaño y forma y en los efectos globales en el clima y ambiente, ya que con un diámetro que oscila entre los 200 y 240 km, es el impacto de mayores dimensiones documentado durante el Fanerozoico y constituye el mejor ejemplo preservado de un cráter complejo multianillo. La estructura se sitúa tanto bajo las aguas del Golfo de México como en tierra, sepultada por más de 1 km de rocas carbonatadas. La parte terrestre, se extiende por casi todo el Estado de Yucatán.

Otro aspecto de suma importancia es el relacionado con los efectos ambientales causados a nivel global por la colisión, es decir, los cambios en la atmósfera, la hidrósfera, la temperatura superficial y en general todos aquellos sistemas de soporte de vida. Relacionado a los efectos del impacto se perdió entre el 65 y 75% de las especies marinas y terrestres que habitaban el planeta, el ejemplo más conocido es la extinción de los dinosaurios, ya que a pesar de haber sido un grupo muy exitoso, que dominó por más de 160 millones de años todos los nichos ecológicos, desapareció súbitamente.

Los estudios sobre el impacto Chicxulub tienen sus antecedentes a partir de los descubrimientos realizados por Álvarez y colaboradores (1980) en torno a una delgada capa de arcilla intercalada en la formación de carbonatos, que marca la frontera entre el Cretácico y el Terciario conocida como límite K-T. En principio el objetivo del estudio de las secuencias K/T y la capa de la frontera era estimar su tasa de sedimentación, para ello se midió el contenido de Iridio, elemento poco común en rocas terrestres pero abundante en material cósmico, se encontró que la acumulación no había sido gradual, lo que hizo pensar que se trató de un evento de corta duración proveniente del exterior, el que formó este marcador geológico.

El cráter cobró un gran interés científico y comenzaron una serie de proyectos para su estudio, los cuales en su mayoría los ha realizado la Universidad Nacional Autónoma de México. Debido a que la estructura no es visible en superficie, ha sido necesario estudiarlo con diferentes métodos geofísicos, los cuales han determinado que se trata de un cráter de tipo multianillo. Se han empleado datos magnéticos y gravimétricos, que indican el número de anillos que lo conforman; la reflexión sísmica

ha permitido obtener perfiles para definir la geometría, así como la existencia de fallas relacionadas con anillos en la parte exterior del borde del cráter. Por otro lado conjuntamente con PEMEX se han realizado perforaciones para la extracción y análisis de núcleos, que permiten correlacionar la información geofísica, con muestras de rocas que conforman la zona.

La estructura del cráter fue inicialmente investigada por los trabajos de exploración de Petróleos Mexicanos a partir de los años 40s. Los trabajos exploratorios documentaron una anomalía gravimétrica con patrones semi-circulares concéntricos, que fue asociada a un cráter volcánico o bien a un cráter de impacto (Penfield y Camargo, 1981). Los pozos exploratorios recobraron núcleos de rocas de textura y composición volcánica y la edad de la estructura fue asumida como Cretácico tardío. Posteriormente, re-evaluación de los datos geofísicos confirmaron la interpretación de un cráter de impacto y la edad de Chicxulub fue re-examinada y se la asoció con la frontera K-T (Hildebrand et al., 1991, 1998; Sharpton et al., 1992). Los estudios del cráter de Chicxulub han requerido del uso de métodos geofísicos y de programas de perforación y recuperación de núcleos. Las características de la plataforma carbonatada de Yucatán, con su relieve casi plano y su extensión han permitido realizar trabajos exploratorios terrestres, aéreos y marinos. Entre los estudios marinos, se han realizado varios perfiles sísmicos de reflexión por parte de Petróleos Mexicanos y los consorcios universitarios internacionales.

El objetivo de ésta tesis es a partir de datos sísmicos marinos de reflexión analizar la estructura y estratigrafía del cráter.

Para lograrlo es necesario:

- Definir la estructura de la cuenca y los posibles controles estructurales en el depósito de carbonatos del Terciario.
- Definir la estratigrafía de las secuencias carbonatadas haciendo estudios de estratigrafía de secuencias en las secciones sísmicas y en los núcleos de perforación.
- Analizar y desarrollar modelos de evolución estructural y de sedimentación de carbonatos de la cuenca de impacto de Chicxulub.

II. Área de Estudio

II.1. Plataforma Carbonatada de Yucatán

II.1.1. Generalidades

La Península de Yucatán se extiende desde los 16° a los 22° de latitud norte y de los 86° a los 91° de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental, la cual cuenta con una extensión de unos 300 000 km² y separa al Mar Caribe del Golfo de México. Esta zona abarca, como unidad fisiográfica, tanto territorio mexicano, como el Petén guatemalteco y el norte de Belice. Figura 1.

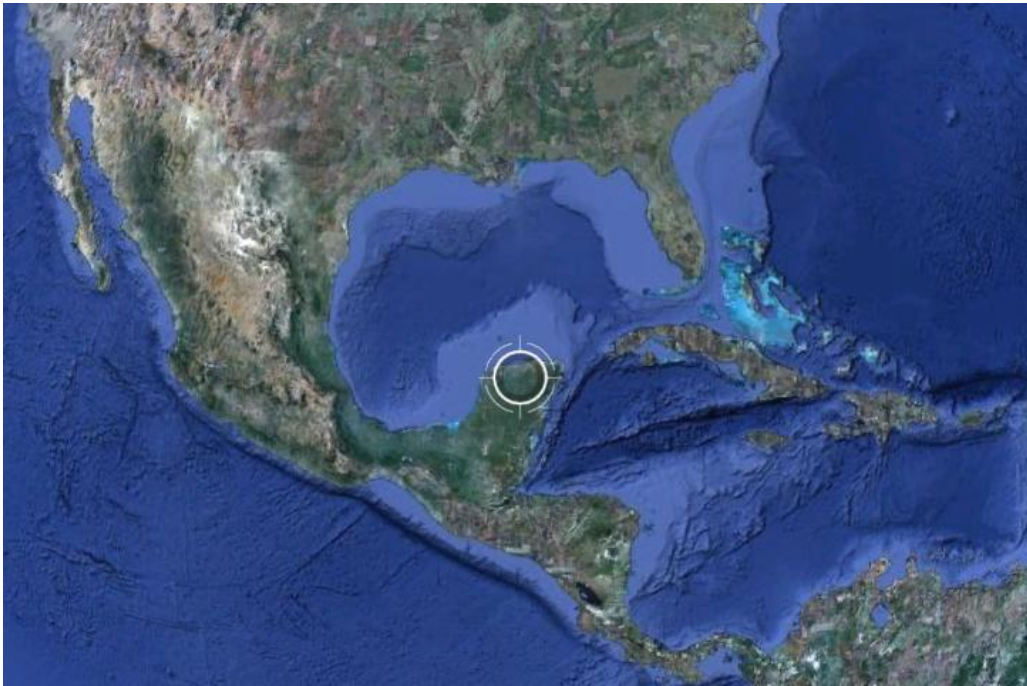


Figura 1. Localización de la Península de Yucatán. (Google Earth 2010)

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 ésta razón el agua de lluvia se filtra formando cenotes y grutas de aguas subterráneas; el río Hondo en la frontera con Belice es el único sistema fluvial de la península.

En la península los rasgos orogénicos están prácticamente ausentes, 90% de su superficie está a menos de 200 m sobre el nivel del mar y la Sierra de Ticul es la única elevación prominente. Topográficamente se puede dividir en planicie norte, Sierra de Ticul y planicie sur. Cabe mencionar que de norte a sur la elevación aumenta ligeramente.

El clima de la península es cálido con lluvias en verano, sin embargo, presenta un gradiente de precipitación que aumenta de noroeste a sureste, lo cual se refleja en la vegetación, desde las zonas áridas en el noroeste, pasando por selvas bajas y medianas, que pierden en parte o totalmente sus hojas en estaciones secas, hasta selvas altas en el sur, cerca de Chiapas.

II.1.2. Geología

El Bloque de Yucatán es tectónicamente único, sin plegamientos o actividad volcánica. El bloque se encuentra limitado al sur por la falla Motagua, que constituye el límite de placa entre las placas de Norte América y del Caribe. Figura 2.



Figura 2. Falla Motagua

Rocas de basamento se encuentran expuestas solo en la parte sureste en Belice, en la zona de las montañas Maya. Este basamento metamórfico se originó al formarse el súper continente llamado Pangea y presenta afinidades pan-Africanas [Salvador, 1991]. En las reconstrucciones paleográficas para el Mesozoico temprano (hace aproximadamente 190 a 200 millones de años), el bloque de Yucatán se localiza en la parte norte y se separa de la unidad Luisiana-Texas al momento de la apertura del

Golfo de México; su posición actual se relaciona a traslación y rotación durante la formación del Golfo [Pindell, 1985; Molina et al., 1992; Padilla y Sánchez, 2007].

Se ha acumulado una capa gruesa de sedimentos marinos del Paleozoico Tardío, seguida por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas (rocas sedimentarias formadas a partir de los residuos de antiguos mares o lagos evaporados) que corresponden a una cuenca carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano. Sobre éstas se encuentran calizas (rocas sedimentarias porosas formadas por carbonatos) depositadas durante el Cretácico Tardío; en la frontera entre el Cretácico y el Terciario es donde se presenta la estructura de impacto Chicxulub.

La plataforma de Yucatán, conformada por calizas de periodos del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Cuaternario (65 millones de años al reciente), reflejan una emergencia paulatina durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años).

El tercio norte y la mitad oriental de la península están formados por karst (paisaje propio de terrenos calizos, por el efecto que la disolución del agua tiene sobre ellos) la planicie está compuesta por secuencias de capas horizontales de calizas y dolomías del Terciario Tardío (Plioceno) de la formación Carrillo Puerto, limitada por los depósitos periféricos del Cuaternario. Esta formación tiene un espesor de entre 163 y 240 m, con la presencia de foraminíferos (orden de los microfósiles marinos), que actualmente se asocian con las algas endosimbiontes (que viven en simbiosis con un huésped dentro de sus células) en aguas someras muy claras de plataformas continentales.

Los depósitos del Cuaternario están restringidos a una franja periférica angosta a lo largo de la costa, al norte estos depósitos constan de calizas compuestas por conchas de bivalvos, compactadas densamente, al noreste los depósitos del Cuaternario son del Pleistoceno, su extensión y topografía se interpretan como carbonatos supramareales (formados por encima del nivel de las mareas) que reflejan los movimientos de la línea de costa, lo cual es consistente con la formación de cavidades extensas de la disolución subterránea asociada a la haloclina (capas de agua en donde la salinidad del agua cambia rápidamente con la profundidad) y su profundidad en relación con el nivel del mar en esa época.

II.2. Cráter Chicxulub

II.2.1. Formación de un cráter

Los impactos de meteoritos y cometas en la etapa temprana de evolución del sistema solar son los que han moldeado la superficie de todos los cuerpos celestes, siendo rasgos comunes, por ejemplo, en la Luna o Marte donde es posible observar numerosos cráteres formados por colisiones cósmicas [Melosh, 1989; Grieve, 1990; Urrutia Fucugauchi y Pérez Cruz, 2009]. Figura 3



Figura 3. Imagen cráteres en Marte y La Luna

La importancia de estas estructuras radica en que al ser procesos geológicos muy cortos, se libera una gran cantidad de energía sobre un área muy pequeña y son capaces de generar grandes cambios en escala global; dependiendo de su tamaño y velocidad, es el grado de afectación que causan, ya que los materiales se comportan de diferente manera, obedeciendo principalmente a la transferencia de energía sobre el terreno, la cual es convertida en calor y presión [Melosh, 1989].

De acuerdo a su forma se clasifican en: simples y complejos; los cráteres simples pueden llegar a medir hasta 4 km de diámetro, una vez rebasada esta longitud podemos considerar rasgos de estructuras complejas, éstos cráteres llegan a ser cientos de veces más anchos que profundos, poseen un levantamiento o anillo central circundado por una depresión anular y un borde fracturado siguiendo patrones de fallamiento normal. Entre la estructura central y el borde existen varios materiales transformados por el impacto: rocas fundidas, brecha y material colisionado (Grieve, 1990). Figura 4.

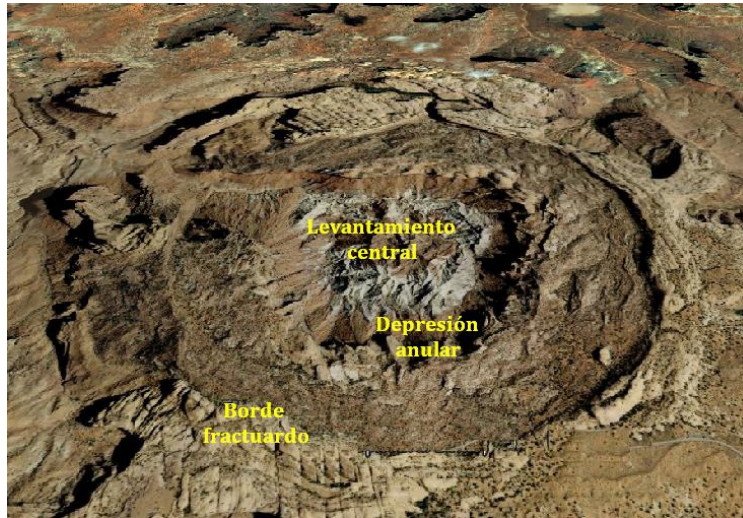


Figura 4. Upheaval Dome, Utah USA, rasgos de un cráter complejo de levantamiento central, de aproximadamente 10 km de diámetro

La formación de un cráter complejo, se lleva acabo en diferentes fases:

La primera etapa es la de excavación, donde se forma la cavidad de transición, esto es similar a la formación de un cráter simple. Figura 5.

Al momento en que la cavidad crece, las rocas del centro rebotan hacia arriba, esto implica el levantamiento del piso de la cavidad, hasta que se forma una estructura central. Figura 6.

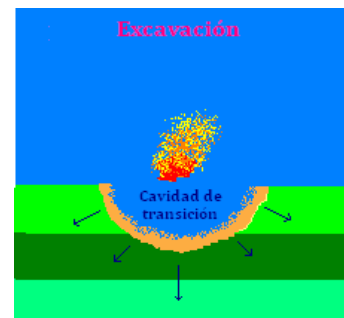


Figura 5. Etapa de excavación

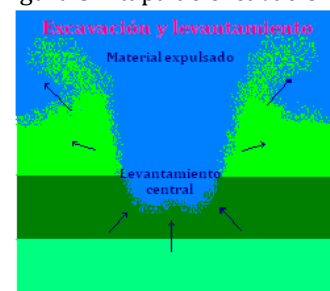


Figura 6. Levantamiento

El colapso de la cavidad involucra un gran volumen de material exterior, y forma un cuerpo en equilibrio con la topografía positiva en el centro. La modificación de la cavidad sucede al mismo tiempo que el levantamiento de la base del cráter. Figura 7.

Los cráteres complejos pueden desarrollar estructuras de tipo peak ring o central peak.

En el caso de la estructuras tipo central peak, son formadas tras la acción de rebote del material del piso del centro de la cuenca de impacto, una vez que los esfuerzos en la zona de choque se han equilibrado. Figura 8.

Para las estructuras de tipo peak ring, tenemos una cadena de montículos alrededor del centro del cráter. Su origen aún no ha sido comprendido totalmente, pero una de las teorías sugiere que el levantamiento central alcanza grandes altitudes, por lo que se vuelve sumamente inestable bajo los efectos de la gravedad, por lo que al colapsar desplaza material hacia afuera del punto de choque, donde consideramos que dicho material se comporta como un fluido. Figura 9.

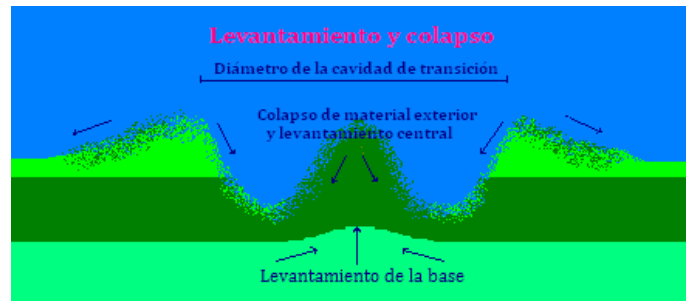


Figura 7. Levantamiento y colapso de la cavidad.

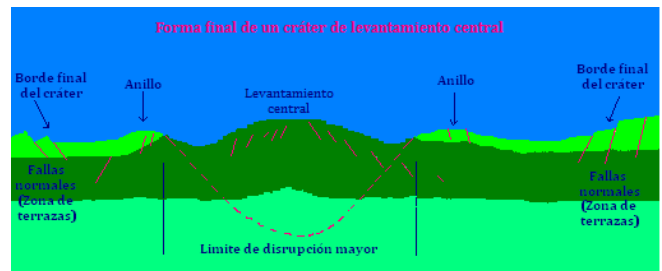


Figura 8. Forma final de una estructura de central peak.

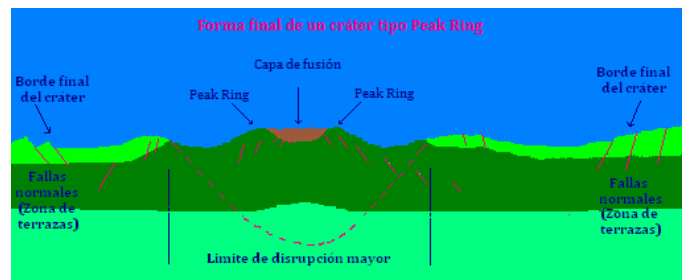


Figura 9. Forma final de un cráter de tipo peak ring.

En la Tierra se han encontrado entre 170 y 180 cráteres de impacto, de diferentes diámetros, pero en general afectados por la erosión y los procesos de regeneración terrestre.

Existen tres cráteres de impacto de grandes dimensiones sobre la superficie terrestre. En Sudáfrica, el cráter Vredefort es uno de los principales productores de oro y diamantes; por otro lado, ubicado en Canadá, el cráter Sudbury donde se explota

níquel y platino; finalmente situado en la Península de Yucatán, Chicxulub, que al estar sepultado por más de 1 km de roca no presenta daños por erosión, conservando su estructura y materiales intactos, lo que lo hace el mejor preservado para estudios e investigación.

II.2.2. Hipótesis del impacto

En 1980 un grupo de investigadores entre los que destacan Luis Álvarez y Walter Álvarez, realizaban muestreos alrededor del mundo de la capa de arcilla intermedia entre los períodos Cretácico y Terciario, llamada límite K/T, al realizar un estudio químico a la delgada capa, encontraron grandes concentraciones de Iridio, cantidades que solo están presentes en material cósmico, por lo que concluyeron que su depósito, no había sido paulatino como cualquier proceso de sedimentación, sino rápido y provocado por el impacto de un gran meteorito.

Una vez que plantearon su hipótesis, comenzó la búsqueda de un cráter cuyas dimensiones correspondieran a las de un cuerpo que pudiera haber dado origen a un marcador global como lo es esta pequeña capa arcillosa, además, contando con la información precedente sobre la extinción masiva del Cretácico, dada por la continuidad de registros fósiles a través del límite K/T, se buscaba una estructura de gran tamaño que pudiera haber causado tal catástrofe.

Siguiendo con la búsqueda se ubicó el Cráter Chicxulub que mide entre 200 y 240 km de diámetro, tiene su centro cercano a Chicxulub Puerto, a unos kilómetros de Puerto Progreso Yucatán. Figura 10.

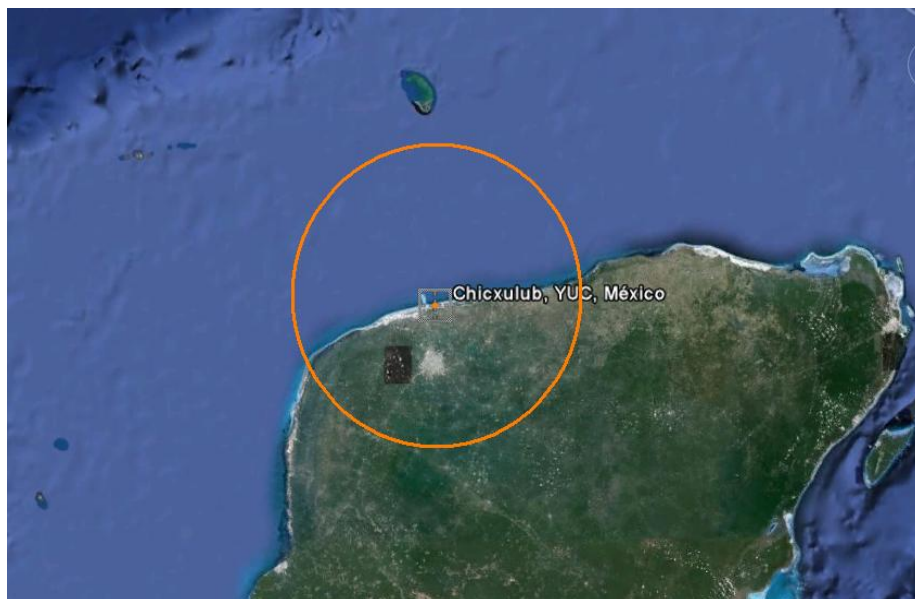


Figura 10. Ubicación y diámetro del Cráter Chicxulub, México. (Google Earth 2010).

Chicxulub ya había sido descubierto por geofísicos que trabajaban para la paraestatal PEMEX, pero debido a las investigaciones sobre la extinción masiva es que cobró importancia y se comenzó a estudiar. Lo que ahora sabemos es que el impacto data del cretácico tardío, hace aproximadamente 65 millones de años, el tamaño del asteroide se estima en 13 km de diámetro, el choque provocó una gigantesca explosión, que se propago en todas direcciones; emitiendo una gran cantidad de material tanto de la corteza terrestre, como el producido por la desintegración del asteroide, dicho material se acumuló en la atmósfera en forma de polvo y roca incandescente, la cual envolvió a la Tierra en una nube de vapor de roca a alta temperatura por varios meses (Figura 11), produciendo un cambio drástico en el ambiente que acarreo consecuencias catastróficas en las formas de vida que habitaban nuestro planeta [Álvarez et al., 1980].



Figura 11. Simulación del momento del impacto del asteroide sobre la superficie terrestre.

Desde entonces se ha realizado una gran cantidad de estudios de exploración geofísica, geológica y perforación de pozos, con lo que se ha demostrado su presencia y geometría, siendo de las características más importantes su anillo central o peak ring [Hildebrand et al., 1991, 1998] (Figura12), además gracias a los análisis geocronológicos y paleomagnéticos de las rocas que lo conforman se ha podido corroborar su edad [Sharpton et al., 1992; Urrutia Fucugauchi et al., 1994].

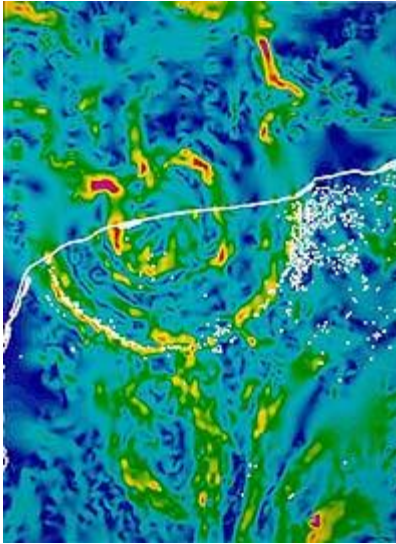


Figura 12. Mapa de anomalías de gravedad.

Los estudios continúan, para poder obtener la mayor cantidad de información respecto a éstos fenómenos y saber sobre la mecánica de su formación y los efectos que tienen en los cuerpos que son impactados. En el capítulo siguiente se hablará específicamente de los trabajos de prospección sísmica y los resultados obtenidos.

III. Estudio Sísmico de Reflexión

III.1. Sísmica de Reflexión

La sísmica se puede considerar el método más resolutivo de todos los métodos geofísicos, además de integrarse muy bien con otras disciplinas como la gravimetría y la magnetometría, es el más bajo en ambigüedades. El método de prospección sísmica determina de manera indirecta las características estructurales de capas estratificadas, de propiedades físicas contrastantes, a partir de los tiempos registrados en la superficie, de las trayectorias de movimientos ondulatorios que se propagan en el subsuelo, las cuales se generan de manera controlada en la superficie.

La reflexión utiliza todas las ondas que se han reflejado en los estratos del subsuelo que presenten contrastes de propiedades elásticas, detectándose en cada punto de la superficie las reflexiones generadas en todas las interfaces del paquete geológico, lo que permite obtener una imagen casi completa del subsuelo, sin embargo los datos obtenidos no proporcionan suficiente información sobre la velocidad de propagación de las ondas, la cual tiene que determinarse por otros medios. Se requieren distancias de observación relativamente cortas, generalmente menores que la profundidad de la capa más profunda que se requiera detectar, y se utiliza principalmente para la exploración de capas profundas, para un número elevado de capas reflejantes, o que presenten contrastes pequeños de velocidades.

La técnica de reflexión se deriva del principio de Huygens, que considera un frente de onda que incide sobre una interfase plana, además la primera ley de Snell, que proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, los tiempos de llegada y la posición de los refractores, sin referir información sobre las amplitudes de las ondas y establece que el seno del ángulo de la onda incidente será igual al seno del ángulo de la onda reflejada:

$$\text{sen } i = \text{sen } r$$

Cuando un frente de onda llega a un contacto entre dos capas de diferentes velocidades, parte de la energía se refleja propagándose en el medio incidente, este efecto se cumple para cualquier contacto donde exista un contraste de velocidades. El tiempo total de trayectoria, queda definido por el tiempo transcurrido para recorrer la distancia de la superficie (punto A) a la capa reflectora (punto B) y la distancia del

mismo punto a otro punto en la superficie (punto C), con una velocidad promedio de propagación entre la superficie y la capa de reflexión. Figura 13.

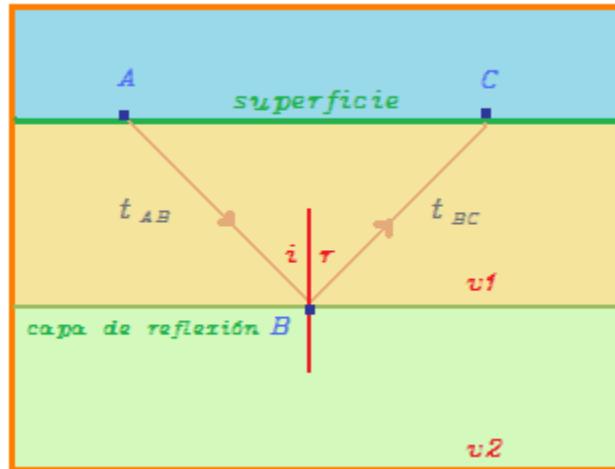


Figura 13. Diagrama de una trayectoria reflejada en el punto B, partiendo de A y detectada en C.

Las diferentes señales, que se recogen del número de sismo-detectores, se denominan trazas sísmicas, se procesan y se reordenan en puntos reflectores comunes CDP (Figura 14), los cuales concentran la información de todas las reflexiones encontradas, una vez que todas las trazas de un mismo punto común se han agrupado, se suman para obtener una sola traza de punto común, al conjunto de todas las trazas de punto común se le llama sección sísmica de reflexión, que es una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se observan en forma de líneas negras de mayor amplitud y definen capas reflectoras que posteriormente se asociaran a estructuras geológicas.

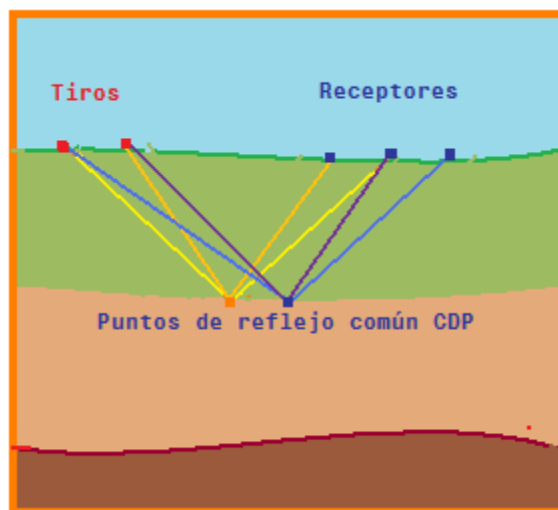


Figura 14. Reflexiones en un mismo punto CDP.

III.2. Trabajo de campo

En la operación de campo se acostumbra utilizar la energía producida por una perturbación para obtener la información que proviene del subsuelo en varios detectores en la superficie, los sismo-detectores generalmente se colocan en línea con el punto de impacto, separados una distancia previamente seleccionada de acuerdo a las características de respuesta de la capa objetivo.

En términos generales, los sistemas de generación de energía sísmica pueden quedar incluidos en: explosivos, sistemas mecánicos y chispas eléctricas. En la actualidad los sistemas más populares para exploraciones marinas profundas son los cañones neumáticos, este sistema utiliza la energía de aire comprimido en una cámara, la cual se libera en el momento que se va a hacer la perturbación, y el aire comprimido acciona un pistón o un dispositivo que produzca la perturbación.

La energía que se produce en este sistema es pequeña, pero su eficiencia en líquidos es superior a su uso en zonas terrestres, debido a las características indeformables de los líquidos en donde no se generan ondas tangenciales sino exclusivamente ondas compresionales, y además la presión que se produce por el impacto se propaga internamente en todas direcciones y con la misma velocidad, que varía entre los 1450 y 1550 (m/s) dependiendo de la temperatura y la salinidad de los líquidos.

El aire comprimido es suministrado por una compresora a una cámara que está cerrada mediante una válvula. En el momento que se va a producir el impacto se abre la válvula, accionada por un sistema eléctrico o por una señal controlada por radio, escapando el aire hacia la otra cámara en donde se acciona un pistón o sale instantáneamente a través de toberas que aseguran que el aire va a salir en una dirección predeterminada. En los modelos para uso marino, usualmente el cañón está recubierto por una malla metálica sobre la cual se tiene una funda de hule que se expande súbitamente al salir el aire comprimido, produciendo el impacto a su alrededor, reciclando el aire comprimido y poniéndolo a disposición para un nuevo impacto (Figura 14).

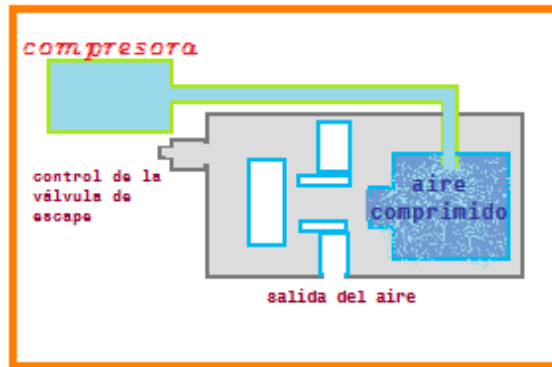


Figura 14. Diagrama simplificado de un cañón neumático.

El cañón neumático es remolcado por un barco para realizar un registro continuo, y colocado a cierta profundidad bajo la superficie para eliminar el efecto de las olas superficiales (Figura 15). La presión del aire comprimido puede ser hasta de 10,000 (lb/pulg²) tomando en cuenta que por la naturaleza de la observación continua no pueden hacerse impactos sucesivos en el mismo punto.

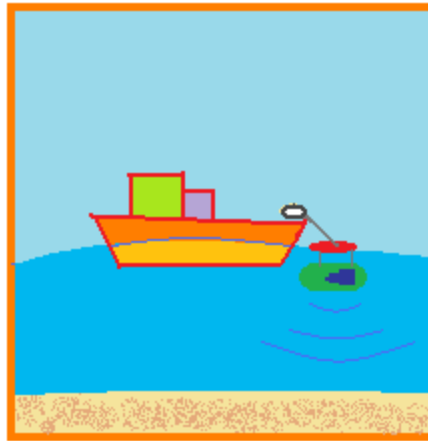


Figura 15. Cañón neumático arrastrado por una embarcación.

Una vez generada la onda sísmica, tenemos que registrar la información de los eventos que se produjeron, para ello es necesario contar con sismo-detectores, que para el caso marino se llaman hidrófonos y un sistema de registro o sismógrafo.

III.3. Adquisición

El esquema general del método identifica tres zonas importantes en la adquisición de la información necesaria para identificar las características de las capas del subsuelo:

1. Mecanismo de fuente en donde se generan las ondas sísmicas mediante explosivos o sistemas mecánicos. Se tiene algún control sobre las características de la onda que se inyecta al subsuelo.
2. Zona donde se propaga la onda sísmica, las que pueden regresar a la superficie en trayectorias reflejadas, en interfaces definidas por el contraste de

propiedades elásticas. El comportamiento de las trayectorias depende de la distribución de propiedades físicas de los materiales que constituyen el paquete de sedimentos. No se tiene control sobre su comportamiento, sin embargo, mediante pruebas y análisis de la información se pueden diseñar técnicas de adquisición de datos y procesos de mejoramiento que permiten disponer de los elementos más confiables para la adecuada interpretación y transformación de la información geofísica en términos geológicos factibles.

3. Sistema de detección y registro de los eventos sísmicos que regresan a la superficie, el cual consiste de un conjunto de sismo-detectores (geófonos o hidrófonos) que se encuentran conectados a un cable que recoge todos los eventos que llegan a la superficie y los lleva a un sismógrafo que va a registrarlos, previa amplificación de las señales sísmicas, que son muy débiles y poco perceptibles.

III.3.1. Campaña de 1996

En 1996, el International Scientific Drilling Program ICDP, por medio de la compañía Geco-Sigma adquirió cuatro líneas sísmicas marinas con una longitud aproximada de 160km cada una (Figura 16):

- A_0 y A_1 , se unen para formar un solo perfil, que pasa a 26 km del centro del cráter y corre de SW a NE. Su localización exacta en latitud y longitud es, para la línea A_0 $21^{\circ}15' N$, $100^{\circ} W$ y finaliza a los $21^{\circ}30' N$, $89^{\circ}35' W$ donde comienza la línea A_1 , que finaliza a los $21^{\circ}55' N$, $87^{\circ}35' W$.
- La línea B presenta una distancia radial de 29 a 160 km con respecto del centro del cráter y va en dirección SE-NW desde los $21^{\circ}25' N$, $89^{\circ}40' W$ hasta los $22^{\circ}35' N$, $90^{\circ}40' W$.
- La línea C presenta una distancia radial de 29 a 160 km con respecto al mismo punto y toma dirección SW-NE desde los $21^{\circ}30' N$, $89^{\circ}30' W$, hasta los $22^{\circ}40' N$, $88^{\circ}55' W$.

El objetivo de estas observaciones fue la visualización de la geometría del cráter, a diferentes profundidades, por lo que la información debía ser de alta y baja resolución. Se planeó un tendido de hidrófonos, con las siguientes características: 162 detectores cerca del barco con una separación de 12.5m y 78 con separación de 50m. Los datos de baja resolución fueron obtenidos con un tendido activo de 5925m de longitud y separación de hidrófonos de 50m. En los datos de alta resolución se utilizó

un tendido de 2025m con un intervalo de disparo de 50m y un intervalo de exposición cuatro veces mayor para el receptor. El arreglo de pistolas de aire se diseñó para tener un espectro entre 8 y 50 Hz que sirve para obtener ambos tipos de datos. La siguiente Tabla muestra los parámetros usados en la adquisición de los datos. (Tabla 1)

Source volume	150 liters	9162 in ³	Receiver groups	240	Configured 162x12.5 m and 78x50 m	
Source pressure	13.8 MPa	2000 psi	Streamer depth	10 +/- 1.5 m		
Source array	36 air guns	75 m wide by 18.5 m	Near offset	152		
Source power	171 bar m	In 3-125 Hz band with	Sample rate	2 ms		
Source depth	6 +/- m		Record length	18 s		
Source interval	50 m		Filters	Low cut	3 Hz	18 db/octave
				High cut	128 Hz	72 db/octave
Navigation	Multifix DGPS					

Tabla 1. Parámetros de adquisición, campaña 1996. Modificado de Eduardo Salguero Hernández, Tesis Doctoral Atributos sísmicos 2008.

III.3.2. Campaña de 2005

Durante el 2005 se realizó un proyecto entre la Universidad de Arizona UTIG, la Universidad de Cambridge, el Imperial College y la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, con el cual se obtuvieron un total de 29 perfiles de reflexión sísmica con diferentes orientaciones, de las cuáles este trabajo refiere solamente las denominadas como R₁, R₃, R_{6a} y R_{6b}. (Figura 16)

- La línea R₁ es radial al centro del cráter y tiene una longitud aproximada de 75km va de SW a NE, comenzando en las coordenadas 21°35'N, 89°15'W y finalizando a 22°10'N, 88°35'W.

- R_3 también es radial al centro del cráter y tienen una longitud aproximada de 130 km, corre en dirección SE-NW desde el punto $89^{\circ}50'N$, $21^{\circ}35'W$ hasta el punto $21^{\circ}50'N$, $90^{\circ}45'W$.
- Las líneas R_{6a} y R_{6b} se unen para formar un perfil semi-circunferencial prospectado a una distancia radial de 120 km, su longitud total es de aproximadamente 190km, la línea R_{6a} comienza en el punto $21^{\circ}30'N$, $90^{\circ}20'W$ y la línea R_{6b} termina en la coordenada $21^{\circ}40'N$, $88^{\circ}50'W$.

Los objetivos del estudio fueron: determinar la dirección y el ángulo del impacto, mapear las deformaciones y fallas registradas en la corteza superior cerca del centro del cráter para tratar de explicar la forma en que la superficie fue dañada por el impacto y modelar en 3D el colapso del cráter para examinar la deformación y los cambios ambientales, como efectos del impacto. Para ello se empleó un tendido de 6 km de largo con 480 canales espaciados cada 12.5 m. El intervalo de muestreo fue de 2 ms y se rastrearon estructuras hasta los 14 s doble tiempo de viaje. Durante dicha prospección se utilizaron tres geometrías de adquisición diferentes, con distintas distancias de separación entre el barco y el grupo de receptores más cercano en el tendido de 112 m, 180 m y 13 m.

Es importante considerar para el diseño de la geometría de adquisición de datos de reflexión, que la calidad de los datos depende de la profundidad a la que se sitúe el tendido de hidrófonos y las pistolas neumáticas (que generan las ondas).

La fuente de energía empleada fue un arreglo conformada por 20 pistolas neumáticas que fueron disparadas en sincronía a intervalos de 20s aproximadamente cada 50m. La amplitud generada por la burbuja es proporcional al volumen del aire liberado [Fontana 2002]. Se generaron señales con una frecuencia dominante de aproximadamente 40 Hz, con lo que se tuvo una resolución vertical cercana a 15.5 m para profundidades menores a 1 km.

Parámetros de la adquisición

Source volume	6947 in ³	Receiver type	Hydrophone Streamer
Source pressure	138 bars	Source type	AirGun: Bolt 1500
Source number	20	Number of channels recorded	480

Source depth	6 +/- m	Sample interval	2 000microseconds
Channels length	12.5m	Record length	14 s
Processing system	Paradigm Geophysical Focus 5	Acquisition system name	Syntrak
Shot control	50m	Distance	

Tabla 2. Parámetros de adquisición, campaña 2005. Tomados del portal electrónico del Institute for Geophysics at the Jackson School of Geosciences of The University of Texas at Austin. 2010

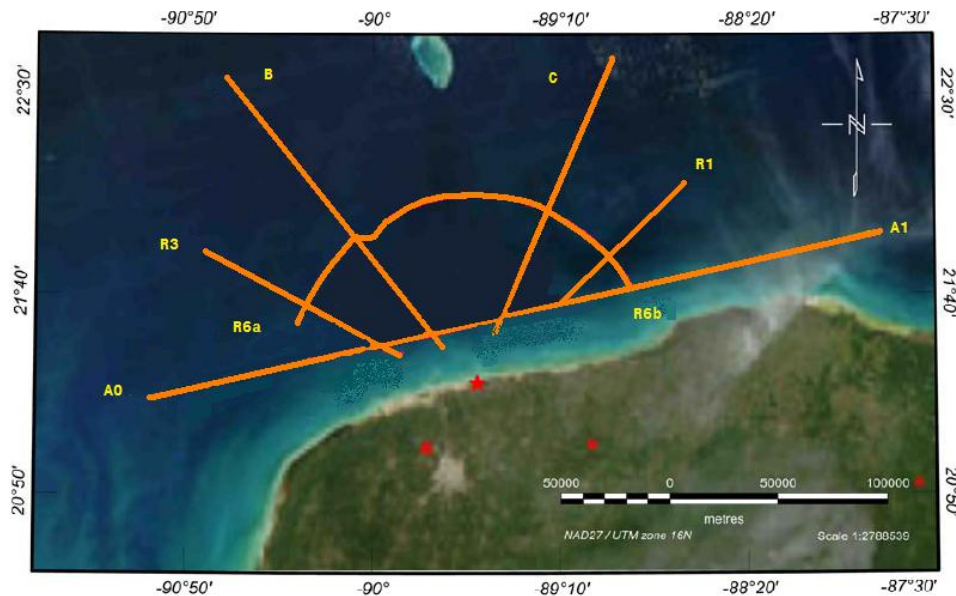


Figura 16. Ubicación de los perfiles sísmicos de reflexión. Las líneas A₀, A₁, B y C, corresponden a la campaña de 1996, mientras que las líneas R₁, R₃, R_{6a} y R_{6b} corresponden a la expedición del 2005. La estrella roja indica el centro del cráter. Imagen modificada de Keren Mendoza Cervantes, Mapeo de la estructura central del cráter de impacto Chicxulub, 2006.

III.4. Procesado de líneas

El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo, con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad. El objetivo fundamental de todo procesado multiseñal es aislar en los registros las reflexiones de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental, onda aérea, etc.). Actualmente,

debido al gran incremento del volumen de datos, es decir, mayor capacidad instrumental, al desarrollo de nuevos algoritmos, el dominio de las técnicas de procesado es el pilar básico de la prospección geofísica.

Otro factor decisivo en la sísmica de alta resolución que afecta el procesamiento es la necesidad de preservar las altas frecuencias ya que las estructuras geológicas superficiales están en el límite de la detectabilidad sísmica y la aplicación de filtros para suprimir los eventos que no pertenecen a reflexiones caen, a menudo, el mismo rango de frecuencias, de manera que cualquier disminución de este rango supone una menor definición de la sección sísmica. Es también una regla, que todo algoritmo empleado durante el procesado debe preservar el máximo posible las reflexiones originales, de manera que su aplicación no se superponga a éstas creando falsas reflexiones.

Desde el momento en que los datos de campo (registros sísmicos) son introducidos en una estación de trabajo, el procesado comienza, y se puede subdividir en tres etapas (Yilmaz, 2001).

1. La etapa de pre-apilamiento (pre-stack), aquí es donde se lleva a cabo la deconvolución y se componen de diferentes tratamientos, que se mencionaran brevemente a continuación:
 - *Almacenamiento.* Los datos de campo son grabados en diferentes tipos de formatos, que deben ser compatibles con el software utilizado.
 - *Definición y establecimiento de la geometría.* Se definen las coordenadas (x, y, z) de cada una de las estaciones, ya sean fuentes o receptores, así como el offset y el azimut (skid). Una vez definida la geometría de la línea sísmica se procede a establecerla para cada traza y cada tiro, así todo quedará perfectamente ubicado.
 - *Edición de los registros.* Durante la adquisición de datos, el registro tiene que ser de alta calidad, ya que los resultados posteriores dependerán de esta etapa, para ello se llevan a cabo diferentes procesos, entre los cuales están: la eliminación de trazas (kill trace), donde se excluyen, parcial o totalmente aquellas trazas que presentan ruido o malas conexiones; el cambio de polaridad (reverse trace), ya que algunas trazas suelen presentar cambios de polaridad debido a efectos de sitio o intercambio de conexiones; la lectura de los primeros arribos, que permitirá hacer correcciones estáticas; eliminación de las refracciones (tope mute), las señales de primeras llegadas correspondientes a las

refracciones deben eliminarse o de lo contrario se superpondrán a las reflexiones; el borrado directo por zonas (surgical and bottom mute), existen eventos sísmicos que a pesar del tratamiento aplicado no es posibles eliminarlos del todo, entonces es necesario suprimir estos trenes de onda mediante borrado directo, un ejemplo puede ser cuando los registros poseen ondas superficiales de fuerte aliasing; la aplicación de filtros, es el último proceso de esta etapa y tiene como objetivo eliminar el ruido y resaltar los eventos de reflexión, por lo general operan sobre las bases de la frecuencia y la amplitud de las trazas, aunque también se pueden utilizar otros en los que se toma en cuenta la longitud de onda, para elegir el tipo de filtro se realizan análisis espectrales en el registro.

- *Aplicación de correcciones estáticas.* En nuestro estudio tendremos generalmente una capa superficial, altamente heterogénea y meteorizada que posee bajas velocidades y presenta un relieve irregular; estas características influyen en las trayectorias de los rayos de las capas profundas, así que es preciso corregir, para obtener un buen resultado de los reflectores de interés. El principal objetivo es ajustar el tiempo de viaje, al que observaríamos si los receptores y la fuente se ubicaran al mismo nivel sobre un plano de referencia por debajo de la capa superficial, de la cual debemos determinar su espesor y velocidades midiendo directamente a través de un tiro de verificación o mediante refracción estática (los tiempos de esta capa son atribuidos a las primeras llegadas, con ellos se construye la curva distancia-tiempo y se calculan sus velocidades y profundidades), una vez caracterizada la superficie, elegimos el nivel que se utilizara de referencia y se calculan los intervalos de tiempo que deberán corregirse para cada rayo de la línea sísmica.
- *Correcciones de amplitud.* La amplitud varía ampliamente debido a los efectos de decaimiento de la energía con la distancia, a la atenuación, entre otros, para compensar estos factores se aplican varios algoritmos, basados en criterios específicos. El control de ganancia programada (programmed gain control, PGC), es la corrección más simple y consiste en asignar un valor predefinido a los datos y corrige el decaimiento de la amplitud; el control de ganancia automática (automatic gain control, AGC), es una de las funciones de ganancia más utilizadas y se obtiene calculando el valor medio dentro de una ventana específica de tiempo,

luego se obtiene la relación entre el valor RMS deseado y el promedio antes calculado, este número se le asigna a la función de ganancia que se le aplicará a cada muestra dentro de una ventana temporal previamente elegida.; la corrección de amplitud por divergencia esférica (true amplitude recovery, TAR), esta corrección pretende reconstruir las amplitudes debido a la absorción de los materiales y al decaimiento de los frentes de onda con la distancia.

- *Deconvolución.* Puede ser aplicada en las diferentes etapas del procesamiento, es un algoritmo que se utiliza con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones, se invierte una ondícula base (existen varios tipos de ondículas sobre las cuales se opera, por ejemplo la delta de Dirac, que convierte los lóbulos de reflexión en picos) y convolucionándola con cada traza, con lo cual se comprime la señal.

2. La etapa de apilamiento (stack), donde el análisis de velocidad es el objetivo.

- *Ordenamiento CMP.* Una vez que los datos han sido editados, se procede a realizar un reordenamiento de las trazas sísmicas en conjuntos de puntos de reflejo común CMP (common mid point). Este ordenamiento consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor determinado. Se deduce por construcción, que el espaciado entre CMP es la mitad del espaciado entre geófonos y que las reflexiones en estos conjuntos poseen también trayectorias hiperbólicas.
- *Aplicación de correcciones dinámicas (NMO).* Tomando en cuenta que todas las trazas pertenecientes a un mismo punto reflector, exhiben las mismas características reflectivas, pueden sumarse para obtener una traza resultante (traza CMP) que posee mejor relación señal/ruido. Antes de realizar la suma, la trayectoria hiperbólica de cada evento debe ser transformada, en el eje del tiempo, en una línea horizontal, de manera que todas las trazas al ser sumadas estarán en fase. Esta es la corrección NMO (normal move out) y la forma de conseguir dicha alineación es mediante la asignación de la velocidad de la trayectoria de reflexión.
- *Análisis de velocidad.* Para proveer una relación señal/ruido mejorada, se requiere información sobre la velocidad del subsuelo, la cual es obtenida mediante un análisis de velocidad. Este proceso se realiza

sobre conjuntos o grupos de conjuntos de CMP determinados. Se obtiene un campo de velocidades que se usará en el apilamiento para obtener la sección sísmica.

- *Apilamiento.* Con los resultados del análisis de velocidad, se procede a sumar las trazas CMP que forman una imagen de los reflectores presentes en el subsuelo con offset cero y tiempos dobles de viaje.

3. La etapa de post apilamiento (post-stack), siendo la migración uno de los algoritmos principales.

- *Procesamiento post-apilamiento.* En este paso se incluye una deconvolución, para recuperar las altas frecuencias perdidas durante el apilamiento, se aplica un filtro pasa-banda para eliminar el ruido asociado a bajas y altas frecuencias generado o residual en el apilamiento, y finalmente se introduce algún tipo de ganancia de amplitud a fin de lograr una mejor visualización.
- *Migración.* Es un proceso que se aplica para corregir las difracciones que se producen debido a un relieve brusco en algún reflector, es necesario reubicar esta energía a su verdadera posición, colapsando las difracciones en sentido opuesto.
- *Conversión a profundidad.* Las secciones sísmicas se encuentran en tiempo doble, ya que cada rayo ha hecho un viaje de ida (incidencia) y vuelta (reflexión). Para concluir con el procesado de la información se proporciona una referencia a profundidad de dichas imágenes sísmicas.

III.4.1. Campaña de 1996

Las líneas A₀ y A₁ forman un tendido compuesto; uno de baja resolución unido a otro de alta resolución, con tiempo de muestreo de 2ms y separación entre los receptores de 50m y 12.5m respectivamente. Debido a que la distancia entre los receptores del tendido de alta resolución debía expandirse hasta 50m, el tiempo de muestreo pasó de 2ms a 8ms.

El procesamiento inicial fue por parte de BIRPS (British Institutions Reflection Profiling Syndicate). Los múltiples mudroll y peg-leg fueron las principales fuentes de ruido. El Mudroll se formó por la superposición constructiva de la energía sísmica en

las ondas que se propagaban a lo largo de la interface agua-suelo marino, por cierto, un mar muy somero, alrededor de 20m de profundidad. De este modo fue usado un filtro FK para remover eficientemente este ruido.

Los múltiples peg-leg aparecen desde los estratos Cenozoicos de alta impedancia hasta los horizontes Terciarios más próximos. Asimismo, las reverberaciones en las primeras capas sedimentarias del suelo marino, se eliminaron con deconvolución predictiva, mientras que las reverberaciones en medios con velocidad variable fueron disminuidas por medio de dos deconvoluciones y un filtrado de velocidad en el proceso de apilado de datos.

Las velocidades para el apilado de datos se obtuvieron del uso de la semblanza, ministack pannels y trial mid-point gathers; tomando en cuenta de maximizar la coherencia en las reflexiones primarias. Además, estas velocidades se utilizaron para el migrado en tiempo por diferencia finita. Por lo tanto, las secciones sísmicas fueron corregidas vertical y horizontalmente. La siguiente tabla muestra los parámetros utilizados en el procesado de los datos. (Tabla 3).

Parámetros de procesamiento

Marine trace decimation	Sum adjacent 4 traces
Bandpass filter	3 – 48 Hz
Resample	From 2ms to 8 ms
Geometric divergence correction	$17(tv^2)+1$ dB/s
FK filter	+/- 1400 m/s, 50% taper. Removable agc
Receiver array simulation	1:3:1 mix ratio
Source array simulation	1:3:1 mix ratio
Deconvolution (lag, operator, length, window applied)	48 ms, 464 ms, 0.5-4.5 s; 72 ms, 640 ms, 4-9 s; 96 ms, 720 ms, 8-18 s;
NMO correction	Velocities supplied by Birps (11/04/97)

Trace muting	Top mute supplied by Birps (11/04/97)
Stack	Mean stack, root power scalar 0.5
True Amplitud Recovery Altered	
Running mix	0.5, 1, 0.5 weighted mix
FK filter	+1500 m/s, 70% taper
Deconvolution (as above)	48 ms, 464 ms, 0.5-7 s; 72 ms, 640 ms, 5-16 s
15° finite difference time migration	90% refraction velocities
TVF and TVS	None

Tabla 3. Flujo del procesado de líneas sísmicas en la campaña de 1996. Modificado de Eduardo Salguero Hernández, Tesis Doctoral Atributos sísmicos 2008.

III.4.2. Campaña de 2005

Para el procesado de los datos, se empleó el programa FOCUS desarrollado por Paradigm, el cual contiene módulos que permiten realizar todos los pasos mencionados con anterioridad para la obtención de secciones de calidad.

Primero se realizó un análisis gráfico para observar la calidad de las trazas en cada canal y editar aquellas con alto contenido de ruido. Otro problema que se debe solucionar es la pérdida de amplitud de la señal por causa de la divergencia esférica (Yilmaz 2001), para ello se multiplicó cada traza por una función de efecto inverso:

$$G(t) = t^{\alpha}$$

Donde α es una constante definida por el usuario.

Se utilizó un filtro F-K y una deconvolución, para separa la serie de reflectividad de otras componentes, después de esto se evidencia la disminución del contenido de ruido y por lo tanto la mejora sustancial en la calidad de la imagen.

Posteriormente se ordenaron los datos en conjuntos que se denominan gathers, los cuales son datos que poseen un parámetro en común, por ejemplo, el punto de disparo, el receptor o el punto medio; en este caso se formaron gathers de CMP (common mid point) que es el punto medio común de reflexión considerando una

cobertura de 120 trazas. Cuando los datos fueron agrupados de esta forma tuvieron que ser corregidos nuevamente debido a la geometría de adquisición, la información se detecta en cada receptor en un tiempo distinto de acuerdo con la posición que guarda en el tendido respecto a la fuente, los eventos en fase tienen una trayectoria parabólica; este efecto se conoce como move out y para corregirlo se toma en cuenta la velocidad a la que se desplazan las ondas elásticas en el medio, para definirlos se empleó un módulo del programa en el que se pican (señalan) los eventos más coherentes de cada gather de CMP, a partir de dicho evento se define un valor, que es aproximadamente igual a la velocidad cuadrática media (V_{rms}) y que luego se ocupará para obtener la velocidad del intervalo, aplicando un campo de velocidades que define el comportamiento de las capas para todos los puntos del perfil.

Otra corrección importante que se tiene que hacer, es la eliminación de las refracciones, ya que son eventos que viajan con mayor rapidez a lo largo de la capa superficial; en este nivel de procesado ya se pueden observar las imágenes con los eventos de reflexión en posición horizontal y no parabólicos.

Continuando con la secuencia de procesado, se tiene el apilamiento y un filtrado TVF (Time Variant Filter) posterior al apilamiento, con el cual se recuperó definición en algunos que se habían perdido debido al apilamiento entre los 2 y 3.5 segundos. Para llevar algunos rasgos morfológicos a su posición real, se aplica la migración, con el algoritmo de Kirchoff en tiempo, por lo que nuestras imágenes finales quedan referidas a tiempo doble de viaje y no a profundidad, pero están listas para su interpretación.

IV. Análisis Estructural Estratigráfico

IV.1. Interpretación de información sísmica

El proceso de interpretación comprende varios aspectos, que se describirán a continuación y los cuales influirán de manera definitiva en los resultados finales.

Conceptos geológicos básicos.

- Ambientes favorables para la generación de yacimientos minerales o situaciones que generen cambios en el subsuelo.
- Condiciones geológicas o mecánicas que propicien acumulación de materiales o su transporte.
- Condiciones estructurales y morfológicas del subsuelo asociadas al objetivo buscado.
- Establecer la correlación entre las simplificaciones de los supuestos geofísicos y los aspectos geológicos correspondientes al objetivo de estudio.

Procedimientos de interpretación.

- Identificación de eventos representativos.
- Elaboración de planos de horizontes reflectantes.
- Deducción de la historia geológica o del proceso de evolución de los cambios del subsuelo.
- Integración de datos obtenidos en pozo y observaciones directas.
- Elaboración de propuestas interpretativas de los datos geofísicos.
- Técnicas de presentación de informes escritos y visuales de los resultados obtenidos.

Evidencias de características geológicas.

- Conceptos de geología estructural y tectónica.
- Fallamientos y fracturas.
- Estructuras plegadas y de flujo.
- Discordancias y canales.
- Trampas estratigráficas.
- Integración con otros datos geofísicos.

Interpretación estratigráfica.

- Análisis de secuencias.
- Análisis de facies sísmicas.
- Análisis de carácter de la reflexión.

Durante el proceso de interpretación debemos tomar en cuenta que los eventos sísmicos son reflexiones que provienen de interfases del subsuelo que presentan contrastes de velocidades o de impedancia acústica adecuados, además, que dichos contrastes están asociados con estratificaciones que representan la morfología geológica, que los eventos que presenten coherencia están relacionados con estructuras o cuerpos geológicos, y por último, que las características de los eventos sísmicos tales como la forma de la onda, amplitud del evento, patrones de secuencia, entre otros, dependen de los detalles estructurales, naturaleza de los fluidos intersticiales, así como de la absorción de frecuencias del paquete de rocas que se encuentren en el estrato objetivo y la superficie.

El análisis de las secciones sísmicas está encaminado a establecer la versión, aunque preliminar, de los resultados del estudio. La interpretación tiene mucho de imaginación y frecuentemente se tiene una imagen preconcebida de lo que se tiene que buscar, apoyado en la información geológica y geofísica disponible. A continuación se describirán los pasos que sigue dicho análisis:

Análisis previo de las secciones sísmicas.

- Inspeccionar la sección y los resultados de las pruebas a las que fueron sometidos los datos que se utilizaron en el procesamiento de la información, tales como: deconvolución, filtros, etc.
- Verificar las posibilidades de seguimiento y marcado de los eventos sísmicos.
- Examinar la manipulación e interpretación de las velocidades utilizadas en el proceso de apilamiento, para definir la confiabilidad de los eventos de la sección y la posible afectación de las profundidades correspondientes.
- Analizar las leyes de velocidades disponibles para su aplicación en los procesos de migración.

Revisión y evaluación de las secciones.

- Establecer una correlación entre líneas paralelas para definir mejor los rasgos sísmicos y su posible correspondencia con condiciones geológicas.
- Verificar la correspondencia y continuidad de los eventos característicos presentes en la sección, en los cruces e intersecciones con otras secciones.

- Establecer las diferencias que se hayan presentado en la obtención de los datos, y modificaciones que se hayan hecho en partes de la sección o del área en estudio que pudieran haber producido diversas afectaciones locales, para que sean analizadas con los criterios correspondientes.
- Evaluar las diferencias de procesamiento y los efectos que puedan causar en las secciones o parte de ellas, visualizándose de forma diferente.
- Identificar errores en los procedimientos que puedan producir correcciones insuficientes o sobre correcciones, generadas por cambios de velocidades superficiales y que pudieran influir en la interpretación.

Migración

La elaboración de secciones o perfiles sísmicos de reflexión en los que se utilizan los tiempos verticales equivalentes de los eventos de reflejados, utilizando la corrección por distancia normal (normal move out), proporcionan las tendencias generales del comportamiento de las capas del paquete sedimentario, sin embargo, los echados no son los verdaderos en las secciones en tiempo, por lo que es necesario convertir los tiempos a profundidades para tener un control adecuado de ellos.

Tomando en cuenta que generalmente la velocidad aumenta con la profundidad, el echado en secciones convertidas a profundidad es mayor que el virtual observado en las secciones en tiempo. Debe tenerse presente que los reflejos se originan con respecto a la perpendicular al contacto reflector y por lo tanto las trayectorias no son necesariamente verticales, de manera que la posición e inclinación como se presentan en la sección no son las verdaderas. La presencia de reflejos que se cruzan en la imagen sísmica, pueden relacionarse con planos de falla o cambios bruscos de echado, en la mayoría de los casos los reflejos desplazados y las difracciones se superponen a otros eventos haciendo muy difícil su seguimiento e interpretación, por lo que es necesario llevarlos a su posición real, mediante el proceso de migración.

Marcado de secciones.

Utilizando lápices de colores se marcan los reflectores o evidencias geológicas más importantes, verificando la continuidad de las secciones, especialmente en los cruces de líneas. Cada reflector marcado con un color distintivo se denomina horizonte, frecuentemente se inicia el marcado desde el horizonte más profundo, pero se puede hacer desde lo más somero, todo depende de la posición de nuestra capa objetivo. No es necesario marcar todos los horizontes reflectores, sino solo aquellos que estén bien definidos o que indiquen

diferentes paquetes de rocas, que puedan constituir diferentes unidades geológicas o litológicas.

Interpretación y marcado de los aspectos geológicos más importantes.

La interpretación comprende la construcción de un modelo geológico del área, tomando en cuenta cual es nuestro objetivo. Los eventos elegidos se siguen a través de toda la región buscando condiciones estructurales, fallas y fracturamientos, que puedan ser asociados a nuestras condiciones de interés. La falta de continuidad de un reflector puede o no indicar la existencia de una falla, por lo cual se buscaran las siguientes evidencias para determinar su existencia:

- Terminación abrupta de reflectores.
- Presencia de difracciones.
- Cambios de echado a los lados de la posible falla.
- Desaparición de eventos coherentes debajo de la zona fallada.
- Desplazamiento de la correlación a través de la falla.

Cuanto más complicadas sean las condiciones geológicas se debe tener mayor cuidado en los criterios de interpretación, en algunos casos debemos utilizar una técnica denominada estilo estructural, que implica el conocimiento del sistema de fuerzas y agentes que afectaron la zona de estudio, se debe conocer el marco tectónico regional, los rasgos estructurales encontrados deben ser congruentes con los sistemas de fuerzas y esfuerzos producidos durante la evolución tectónica.

Deducción de historia geológica

Cuando el objetivo del estudio se relaciona con la determinación de características regionales, frecuentemente se observan líneas muy largas en la dirección del echado regional, y se hace necesario un análisis de los procesos geológicos que han ocurrido en la región, en este caso es muy importante hacer una correlación de los eventos sísmicos presentes en las secciones paralelas e identificar los diferentes paquetes de rocas, principalmente cuando se observen discordancias, intrusiones, procesos de erosión, diferentes patrones de sedimentación y evidencias de procesos tectónicos.

Integración de los datos obtenidos en pozo.

En la etapa de planeación del estudio sismológico es necesario que por lo menos una de las líneas esté ligada a una perforación. La información litológica y estratigráfica determinada en el pozo debe incorporarse a la

sección sísmica. Se establecerá una correlación entre los contactos geológicos y las bandas de reflejos que serán representativas de los horizontes que deben ser identificados y seguidos en toda el área. Los diferentes contactos entre formaciones geológicas y de comportamiento litológico deben identificarse en la columna estratigráfica del pozo, y sus profundidades deben convertirse a tiempos de reflejo con la ley de velocidades que se haya elegido para convertir la información registrada en tiempos a profundidades.

IV.2. Interpretación de líneas sísmicas en Chicxulub

A continuación se presentan las imágenes de las líneas mencionadas, sin interpretar, así como sus respectivas interpretaciones.

Las secciones fueron obtenidas en dos campañas de adquisición diferentes (1996 y 2005), los datos de 1996 fueron reprocesados utilizando técnicas actuales; las dificultades en el procesado consistieron en eliminar las ondas guiadas dadas por la velocidad de los carbonatos, y su alto coeficiente de reflectividad, es decir, que casi no dejan pasar la energía. Una vez realizado el procesado ya descrito en el capítulo anterior, se obtuvieron imágenes migradas en tiempo.

El análisis estratigráfico se realizó con diagramas de línea, donde el objetivo fue observar y marcar los reflectores de mayor energía y continuidad a lo largo de los perfiles, además de paquetes de reflectores menos energéticos pero que mostraran rasgos comunes.

Se decidió marcar dos horizontes principales; para distinguirlos se marcaron con diferentes tipos de línea, el más superficial se marcó de la siguiente manera: [•••••] y lo consideraremos el reflector que marca el límite entre el Cretácico y el Terciario, y como veremos más adelante, es concordante con la base del peak ring, a una profundidad superior al segundo en doble tiempo de viaje, además se puede seguir con relativa facilidad a lo largo de todos los perfiles del estudio.

Cerca de los 2 segundos, dentro del paquete Cretácico, encontramos otro reflector de alta energía que también es posible seguir a lo largo de todos los perfiles estudiados y se marco con el siguiente patrón: [x.x.x.x.x].

Todas las consideraciones anteriores encontrarán sustento al correlacionar nuestras imágenes con la información de pozo que fue recavada para el estudio del Cráter, con

la cual se construyeron columnas lito-estratigráficas que permiten conocer tanto la disposición como la composición del material del sitio de estudio.

Para el análisis estructural se identificaron paquetes de fallas, que gracias a otros estudios de magnetometría y gravimetría se pueden asociar con los límites de los anillos del cráter, se realizaron los respectivos diagramas de líneas correspondientes a los perfiles estudiados y fueron dibujadas en color negro; dichas fallas además delimitan una zona de terrazas con bloques desplazados en dirección del centro del cráter.

Finalmente conociendo la historia de sedimentación de la zona, la disposición que guardan entre si los estratos y las características de las rocas que componen el área donde se produjo el impacto, se buscarán en las imágenes sísmicas, con ayuda de toda la información de otras investigaciones, las modificaciones que sufrieron todos estos aspectos al momento del impacto, y su repercusión en la forma que actualmente tiene esta área.

IV.2.1. Línea A₀

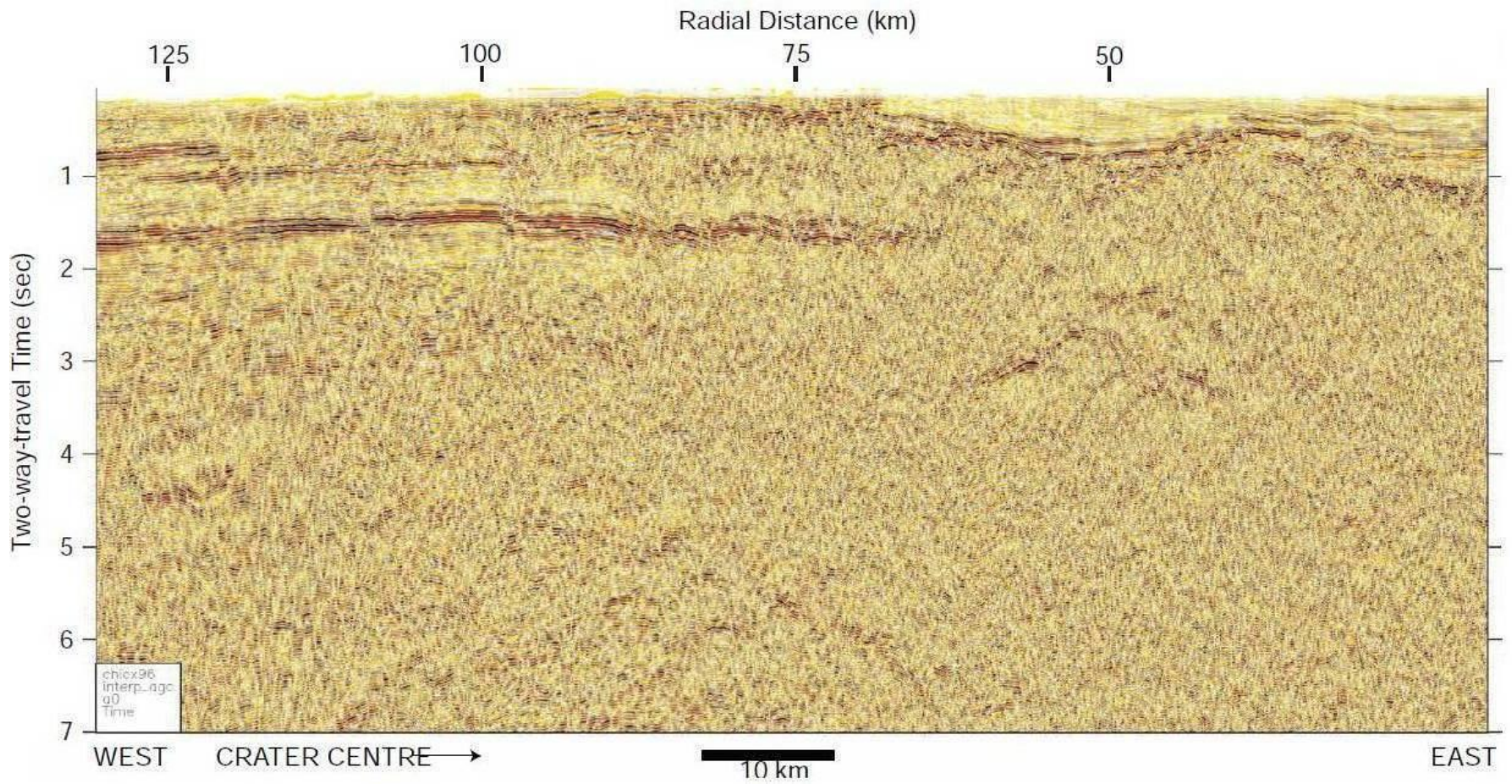


Figura 17. Sección sísmica de la línea A₀, sin interpretar. El eje vertical marca tiempo doble de recorrido en segundos, mientras que el eje horizontal marca distancia radial en kilómetros.

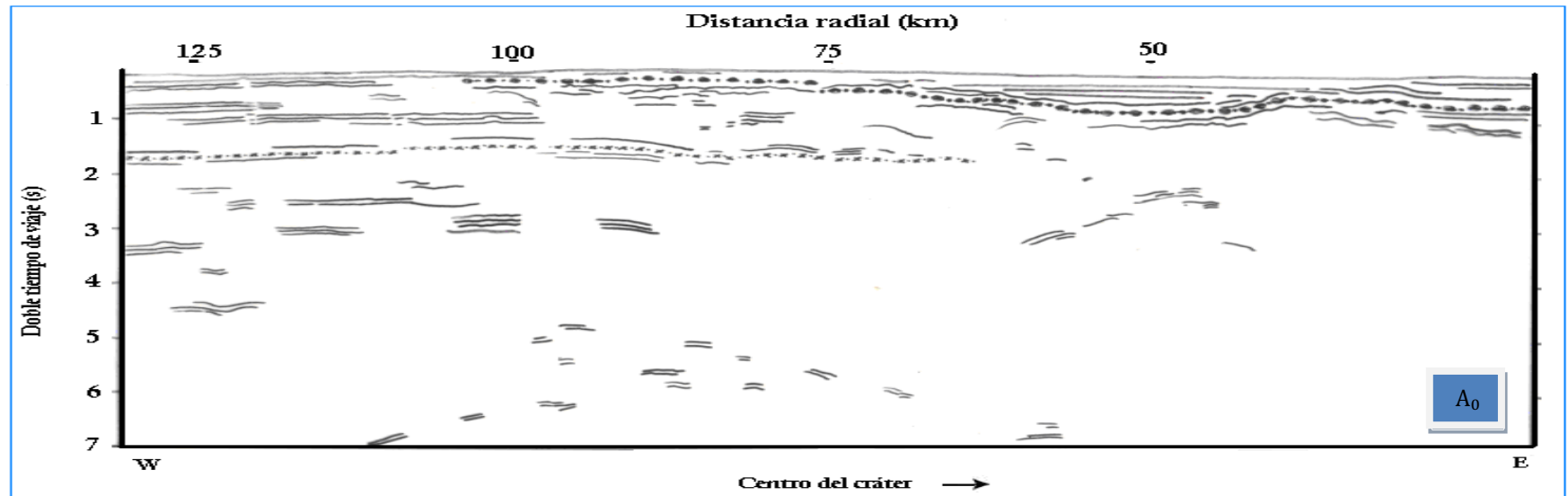


Figura.18. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica A₀.

En ésta imagen (figura 18) se observa la interpretación estratigráfica hecha para la línea A₀, se reconoce el reflector base del Cretácico con una línea que sigue el patrón [.•.]. con el que se le ha definido, por encima del segundo en doble tiempo de viaje hacia la parte central del cráter, dibujando hasta los 75 km aproximadamente la base del cráter, partiendo de esa distancia dicho reflector se desplaza a la superficie y no es posible seguirlo pasando los 100 km. Le sobrayacen depósitos del Terciario, dibujados como paquetes de líneas suaves casi horizontales. Hacia el centro del cráter unos pequeños reflectores por debajo de dicho límite, se ha comprobado con información de pozo que es material de fusión del impacto.

Otro reflector que llama la atención es el que se encuentra por encima de los 2 segundos en doble tiempo de viaje, marcado con [.x.x.] por su carácter altamente energético. Se puede observar por fuera de la estructura del cráter, en forma casi horizontal, sin cambios bruscos hasta los 65 km aproximadamente donde desaparece. Por encima y por debajo de él se observan paquetes de reflectores que no se pueden seguir con facilidad, son muy cortos y poco energéticos.

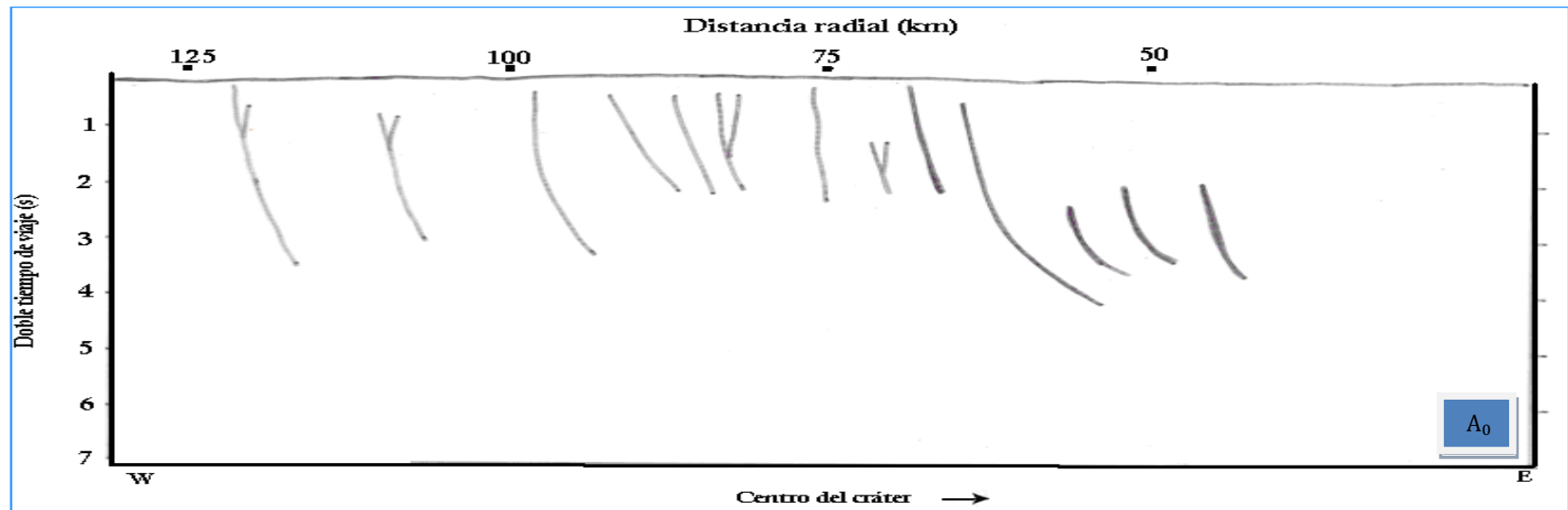


Figura.19. Interpretación estructural de la línea sísmica A_0 .

La interpretación estructural de la sección A_0 , se muestra en la figura 19, se distinguen una serie de fallas normales con inclinación y caída hacia el centro del cráter.

La falla más próxima al centro del cráter, cercana a los 50 km, marca el inicio de la zona de terrazas, en la cual una serie de fallas delimitan bloques que se desplazan en dirección al centro de la estructura, esta zona termina aproximadamente a los 65 km donde una falla más profunda se presenta, con la interpretación estratigráfica previa se podría decir que marca el fin de la cuenca del peak ring.

Siguiendo hacia fuera de la estructura central, aproximadamente a 80 km se encuentran una serie de fallas que, gracias a imágenes de datos magnetométricos y gravimétricos se sabe que corresponde al primer anillo (anillo interior 1). Más adelante el fallamiento continúa en menor medida desplazando solo un poco los paquetes de reflectores observados, pasando los 100 km encontramos un segundo anillo que marca el límite de la cuenca de cráter (anillo exterior 2). Es posible distinguir un anillo más (anillo exterior 3) cercano a los 125 km del centro del cráter.

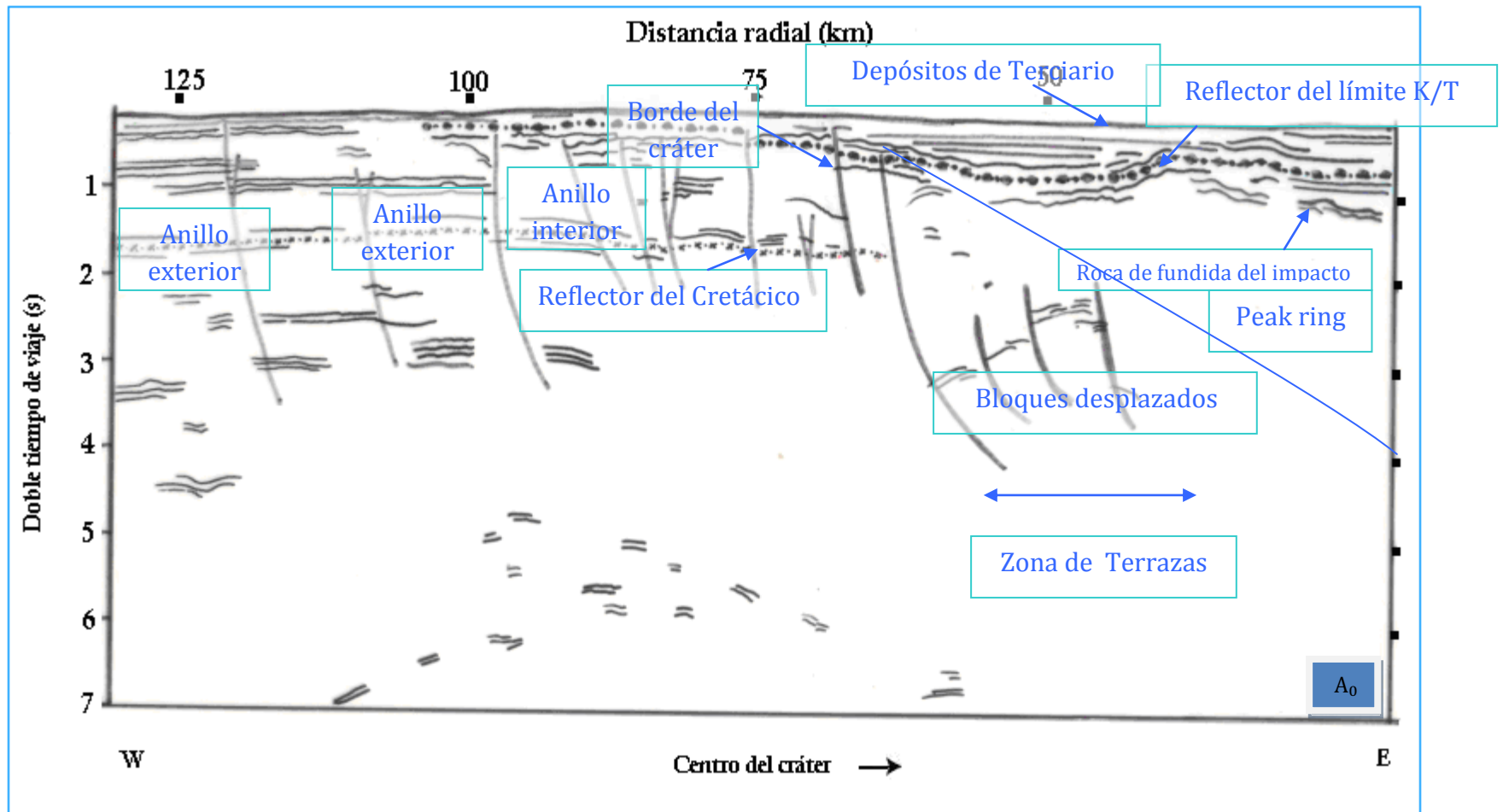


Figura 20. Sección A₀ interpretada por medio de diagramas de líneas.

En la figura 20, se muestran las interpretaciones sobrepuestas tanto de estratigrafía como de la parte estructural. Aquí Podemos observar la disposición de los estratos y cómo son afectados por los procesos estructurales, que para el caso, son una serie de fallas normales producto del impacto y del colapso de la pluma de eyecta provocada. El reflector de alta energía dentro del Cretácico casi no presenta afectaciones en la parte externa del cráter y es sólo hasta que se topa con

una falla que define el borde del cráter donde se pierde su continuidad, es difícil observarlo en el perfil, pero seguramente al estar por debajo del peak ring sufrió múltiple fallamiento, lo que redujo su nitidez.

IV.2.2. Línea A₁

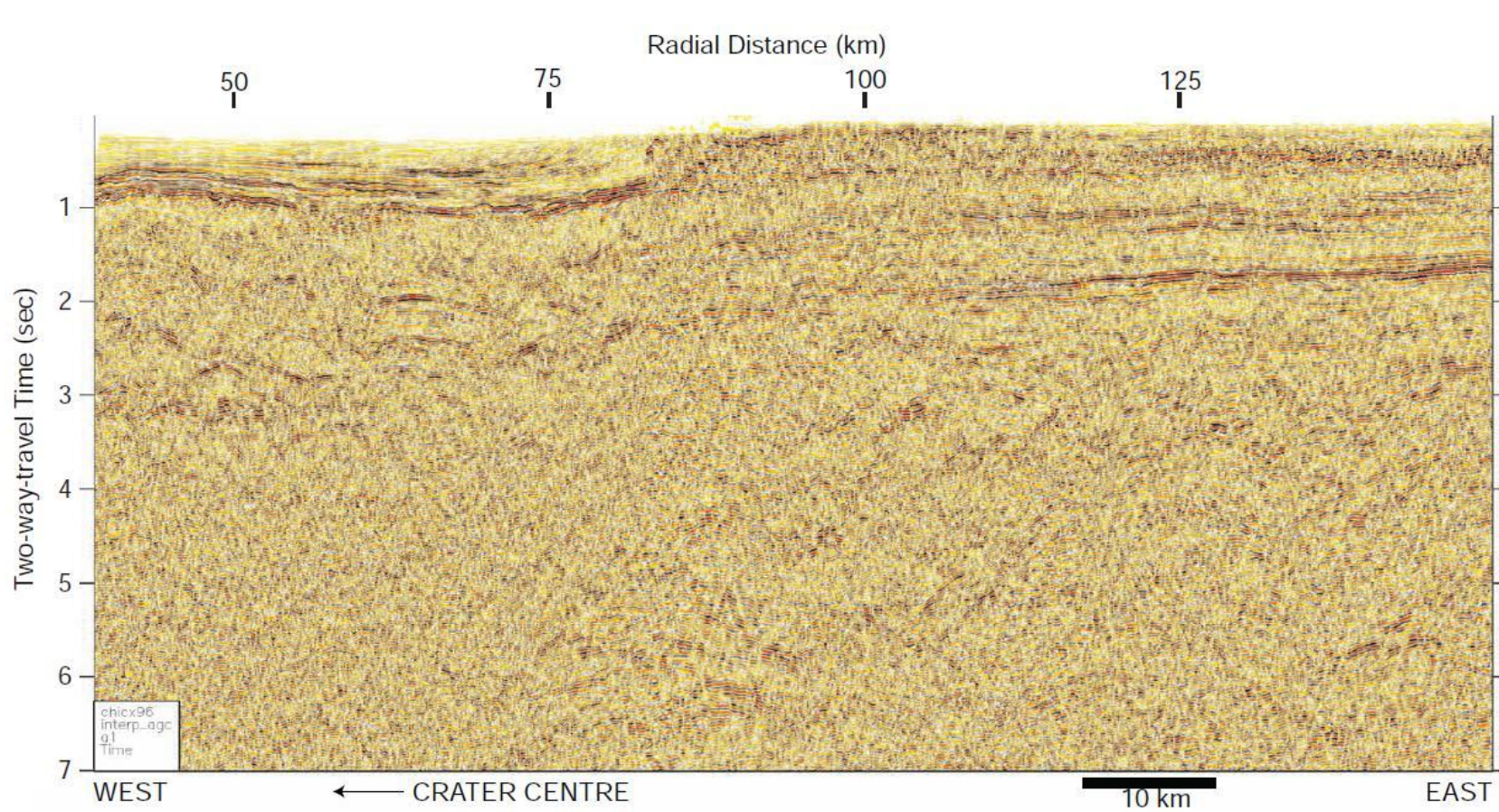


Figura 21. Imagen sin interpretar de la sección A₁, el eje vertical mide tiempos dobles de viaje, mientras que el horizontal marca distancia medidas al centro del cráter en km.

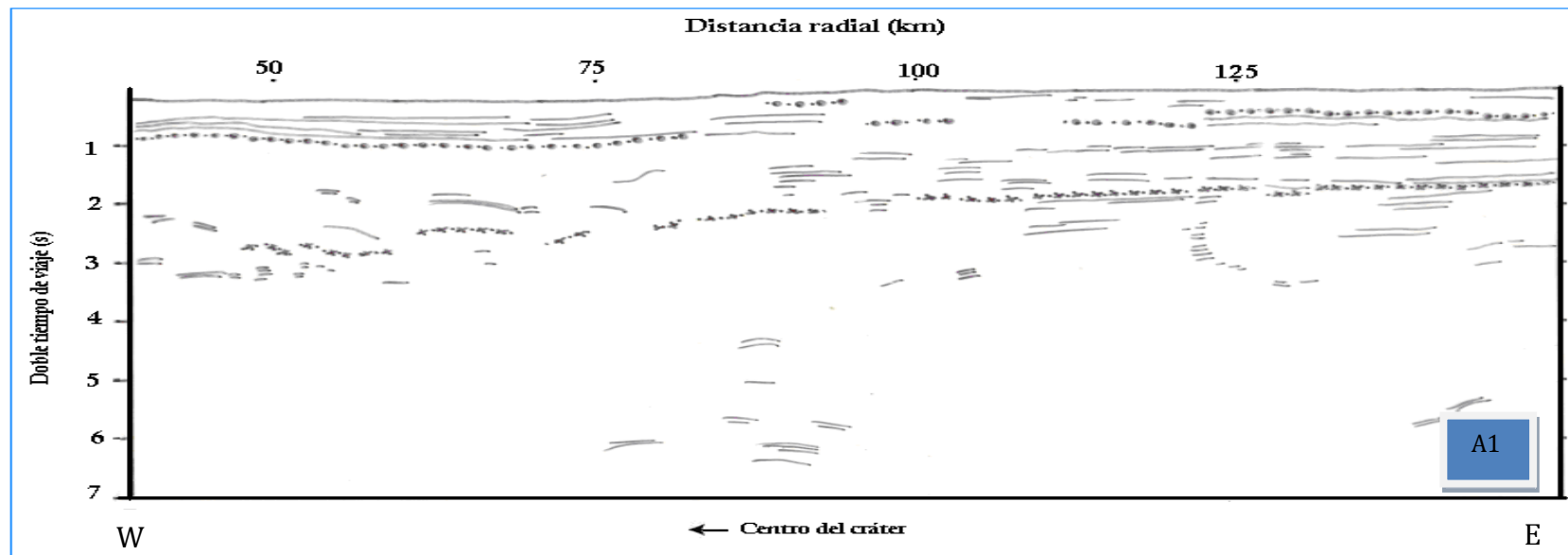
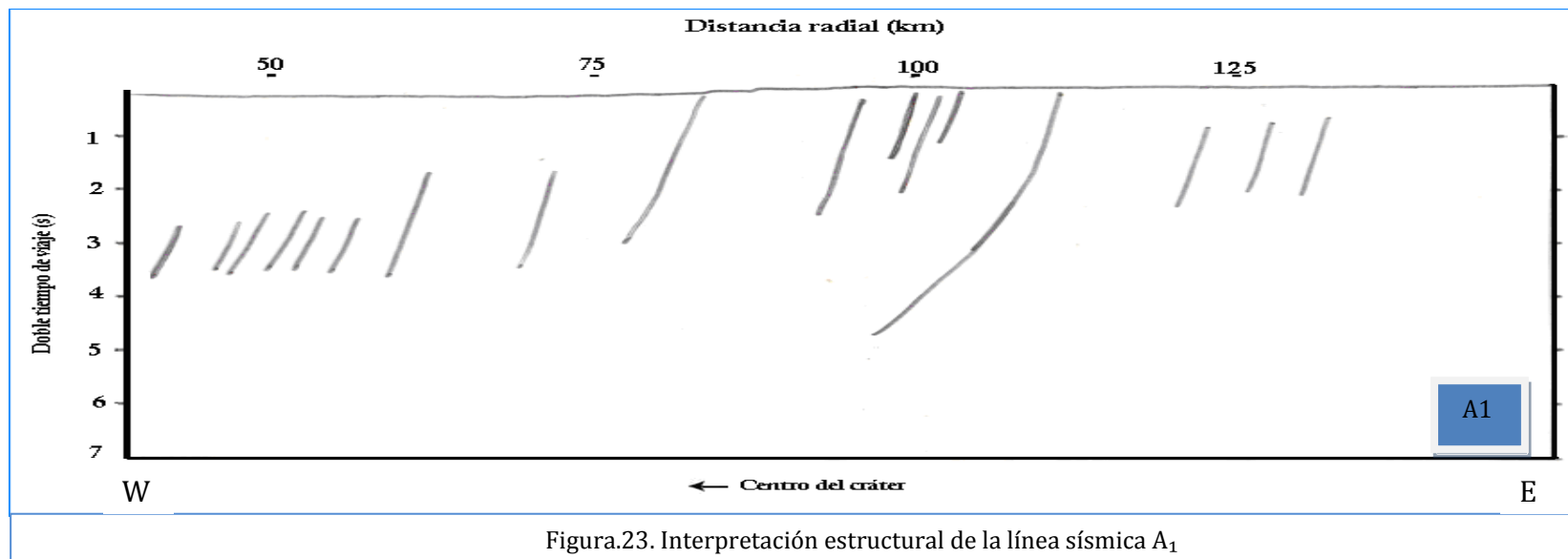


Figura.22. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica A₁.

En esta imagen (figura 22) se observa la interpretación estratigráfica que se realizó de la línea A₁. Esta sección se puede unir a la sección anterior ya que es su correspondiente en dirección Este, así forman un solo perfil que cruza toda la estructura del cráter. Varios paquetes del Terciario se depositaron sobre el reflector que marca su límite con el Cretácico, teniendo su mayor espesor hacia la parte central del cráter, por encima de la estructura del peak ring, cerca de los 80 km a partir del centro del cráter, a partir de ese punto y alejándose del centro estos depósitos se vuelven delgados y relativamente superficiales, hacia el final de la sección vuelven a tener un espesor considerable. Por su parte el límite

Cretácico-Terciario se localiza por encima del segundo en doble tiempo de viaje, como se observará más adelante es afectado por unas fallas que lo seccionan a lo largo del perfil, aunque no impiden que se pierda a la vista.

Otros reflectores de alta energía y continuidad se pueden seguir claramente hacia fuera del cráter, pero no se relacionan con algún evento geológico importante. A más profundidad, hacia los 2 segundos en doble tiempo de viaje, encontramos siguiéndolo desde las afueras del cráter al reflector de alta energía del Cretácico, el cual parece profundizar a medida que se acerca al centro del cráter, además de perder continuidad después de los 100 km.



En la interpretación estructural como puede apreciarse (figura 23) se emplean una serie de fallas que explican el comportamiento y disposición de las capas ya descritas. Desde el centro del cráter y hasta aproximadamente los 80 km encontramos entre los 2 y 3.5 segundos que estas fallas definen una zona de terraza que se compone de bloques

desplazados en dirección del centro del cráter. Las fallas que continúan hacia el final de la sección comienzan en la superficie pero alcanzan grandes profundidades. Definiendo el anillo interno 1 antes de los 100 km y los anillos exteriores 2 y 3 a distancias de 110 y 115 km respectivamente. El fallamiento continúa cerca de los 125 km fuera del cráter, pero ya es mínimo.

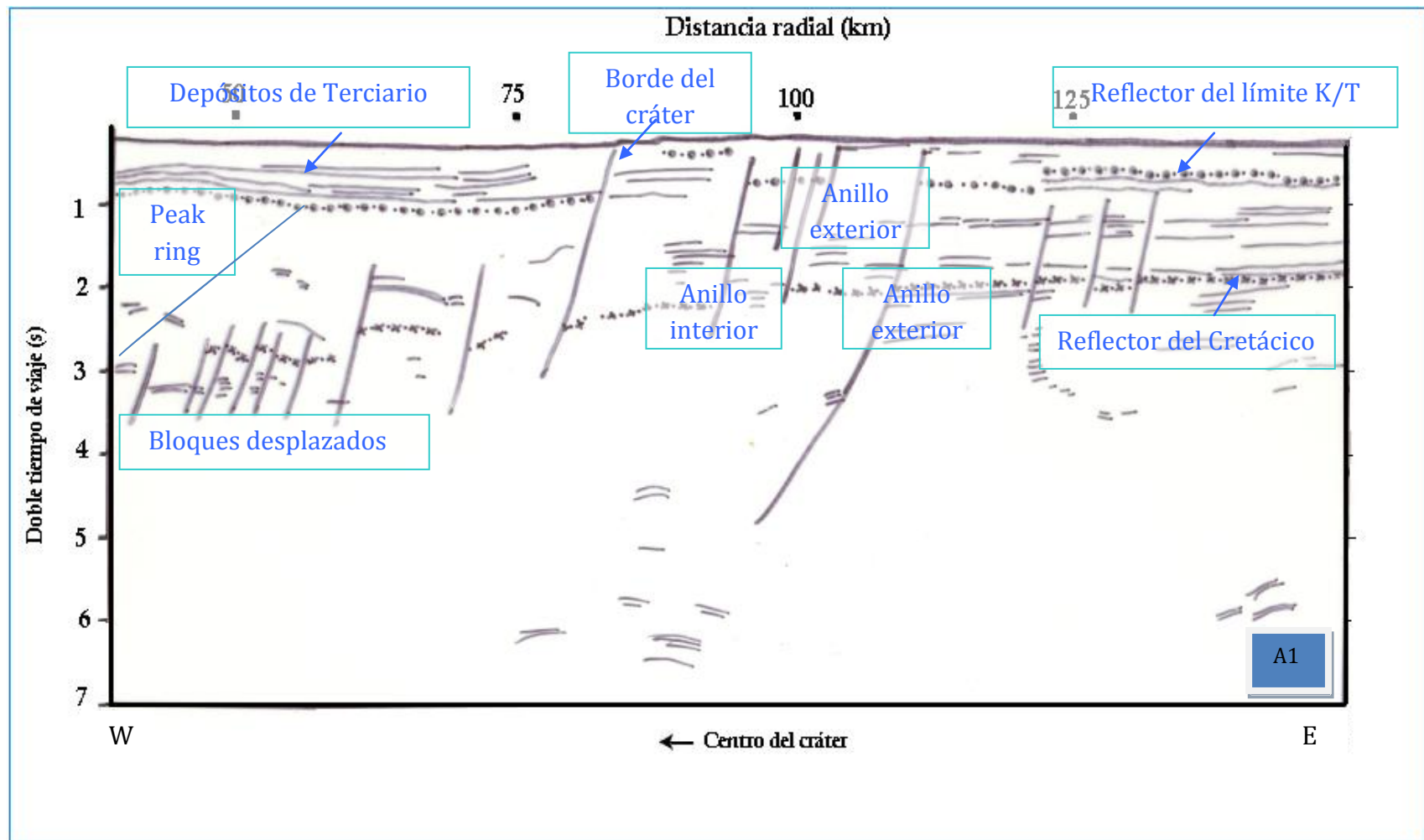


Figura 24. Se muestra una interpretación con ambos aspectos (estructural y estratigráfico) de la sección A₁.

Al sobreponer la interpretación estratigráfica con la estructural (figura 24), se visualiza de forma completa cómo es que las fallas provocadas por el colapso de los materiales al momento del impacto afectan los estratos que conforman la zona,

los cuáles en su mayoría resultan fáciles de seguir en paquetes horizontales, a excepción de los que se encuentran afectados directamente por el impacto, como lo es el área central del peak ring. Se puede observar cómo es que el reflector con mayor energía del Cretácico es cortado por las fallas que delimitan los bloques desplazados hacia el centro del cráter. De igual forma el reflector del límite K/T es cortado abruptamente por la falla que delimita el borde del cráter y continúa seccionado hasta que aparentemente al final de la sección termina el fallamiento y se vuelve horizontal.

Se observan también los depósitos del Terciario como finos paquetes de sedimentos que no sufren afectaciones.

IV.2.3. Línea B

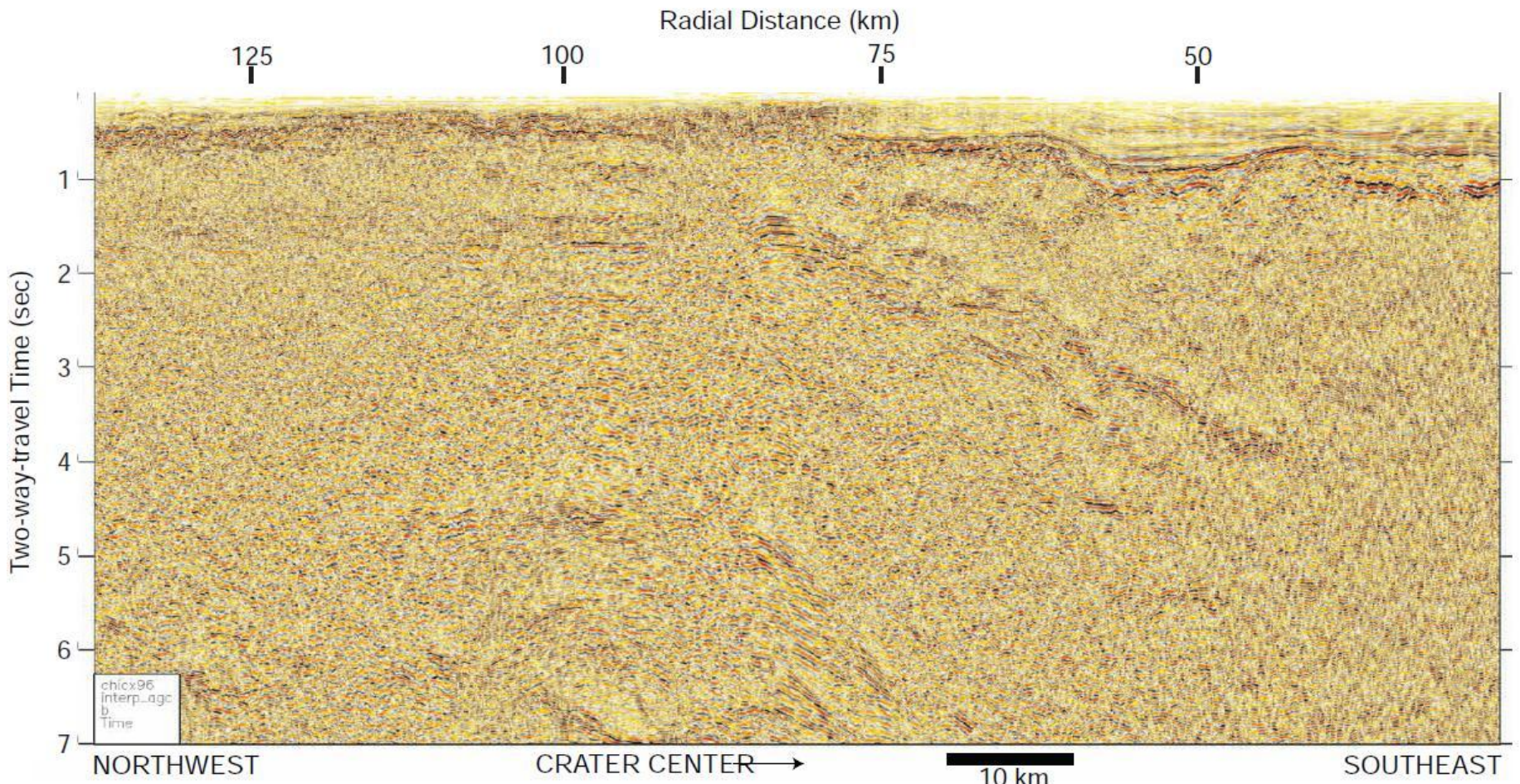


Figura 25. Se muestra una sección sin interpretar de la sección B.

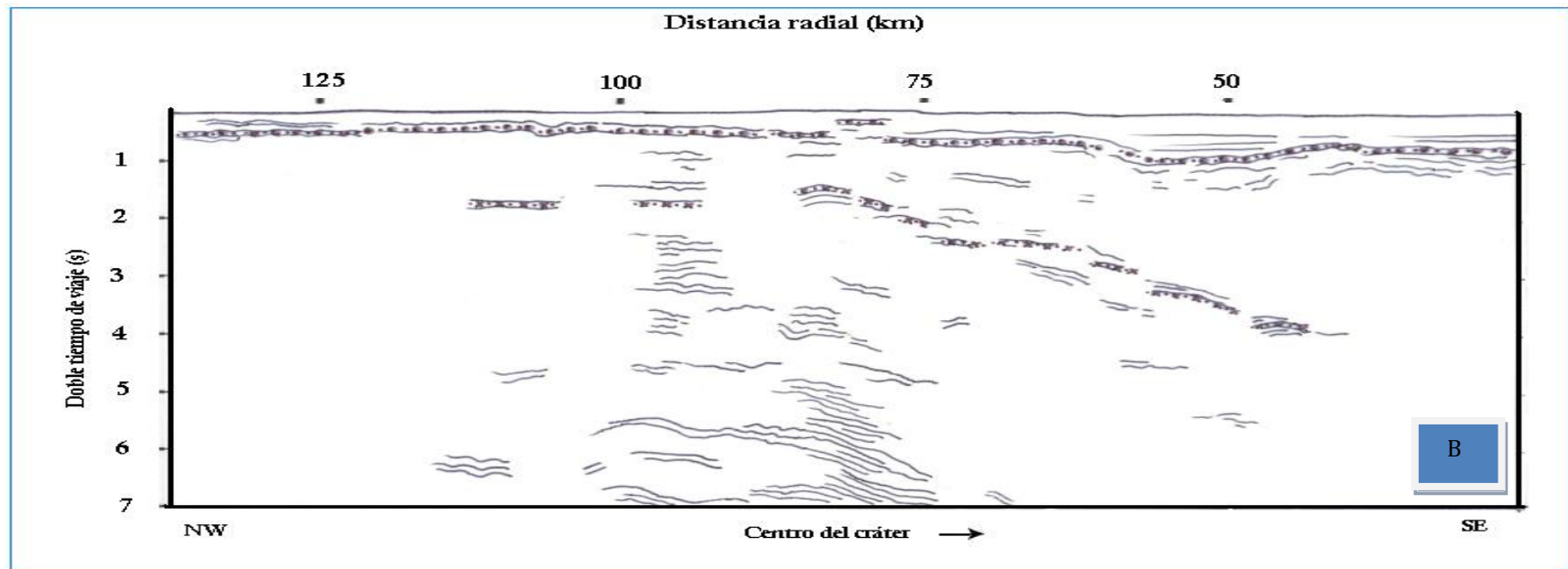


Figura.26. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica B.

La interpretación estratigráfica de la sección B (figura 26) situada en la parte Oeste del cráter muestra sedimentos del Terciario en paquetes horizontales, sin alteraciones. Por debajo de ellos se localiza un reflector de alta energía que es continuo a lo largo de toda la sección por encima del segundo en doble tiempo de viaje que, hacia las afueras del cráter parece no tener divisiones importantes, pero cerca de los 80 km (distancia medida desde el centro del cráter), comienza a seccionarse y a modificar ligeramente su trayectoria, dibujando una suave cuenca que corresponde a la posición del peak ring (aproximadamente 50 km medidos desde el centro del cráter).

Por debajo de los 2 segundos en doble tiempo de viaje, encontramos fragmentos de otro reflector de alta energía, en un intervalo que va desde aproximadamente los 115 km hasta los 45 km de distancia y conforme penetran por debajo de la zona del peak ring se profundizan hasta llegar a los 4 segundos en doble tiempo de viaje.

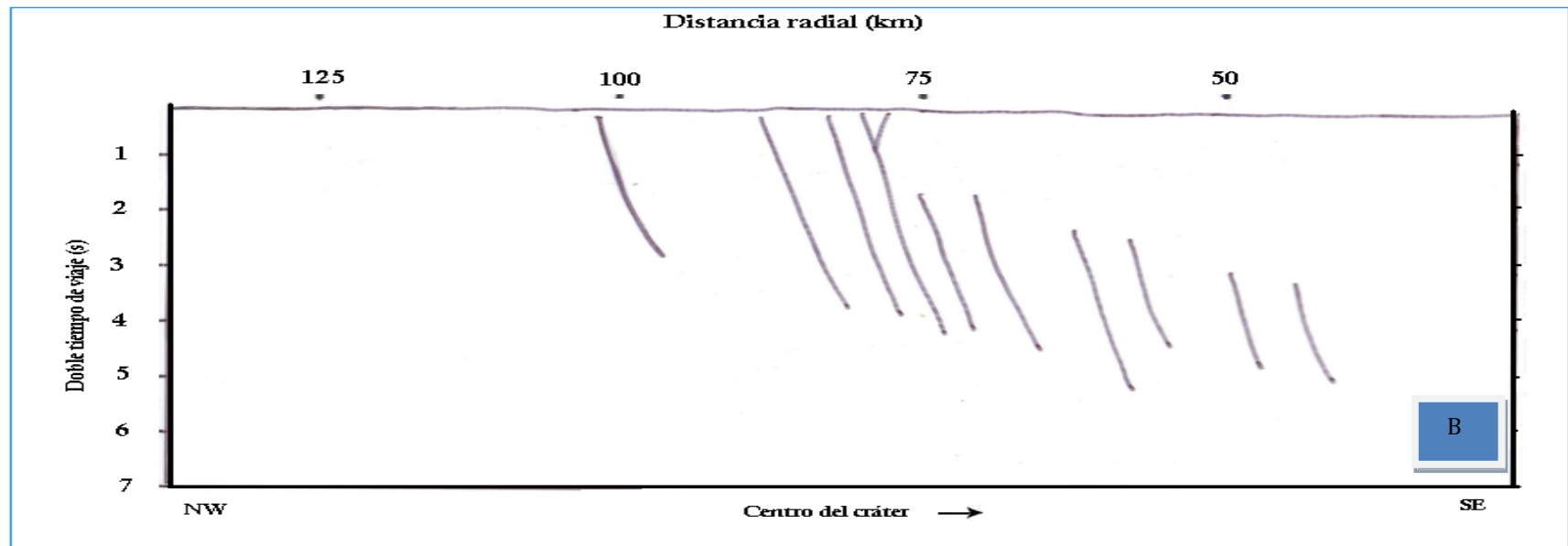


Figura.27. Interpretación estructural de la línea sísmica B.

La interpretación estructural, nos ayuda a visualizar la posición de los estratos, como se observa en la figura 27, las fallas se orientan hacia el centro del cráter; las fallas que se observan entre los 75 y los 45 km son más profundas que las del resto de la sección, comienzan cercanas a los 2 segundos y finalizan casi a los 6 segundos.

Moviéndonos hacia el final de la sección, las fallas casi alcanzan los estratos del Terciario y delimitan a los 80 km aproximadamente el borde del cráter. Después de los 100 km se interpreta una última falla correspondiente al anillo interior 1.

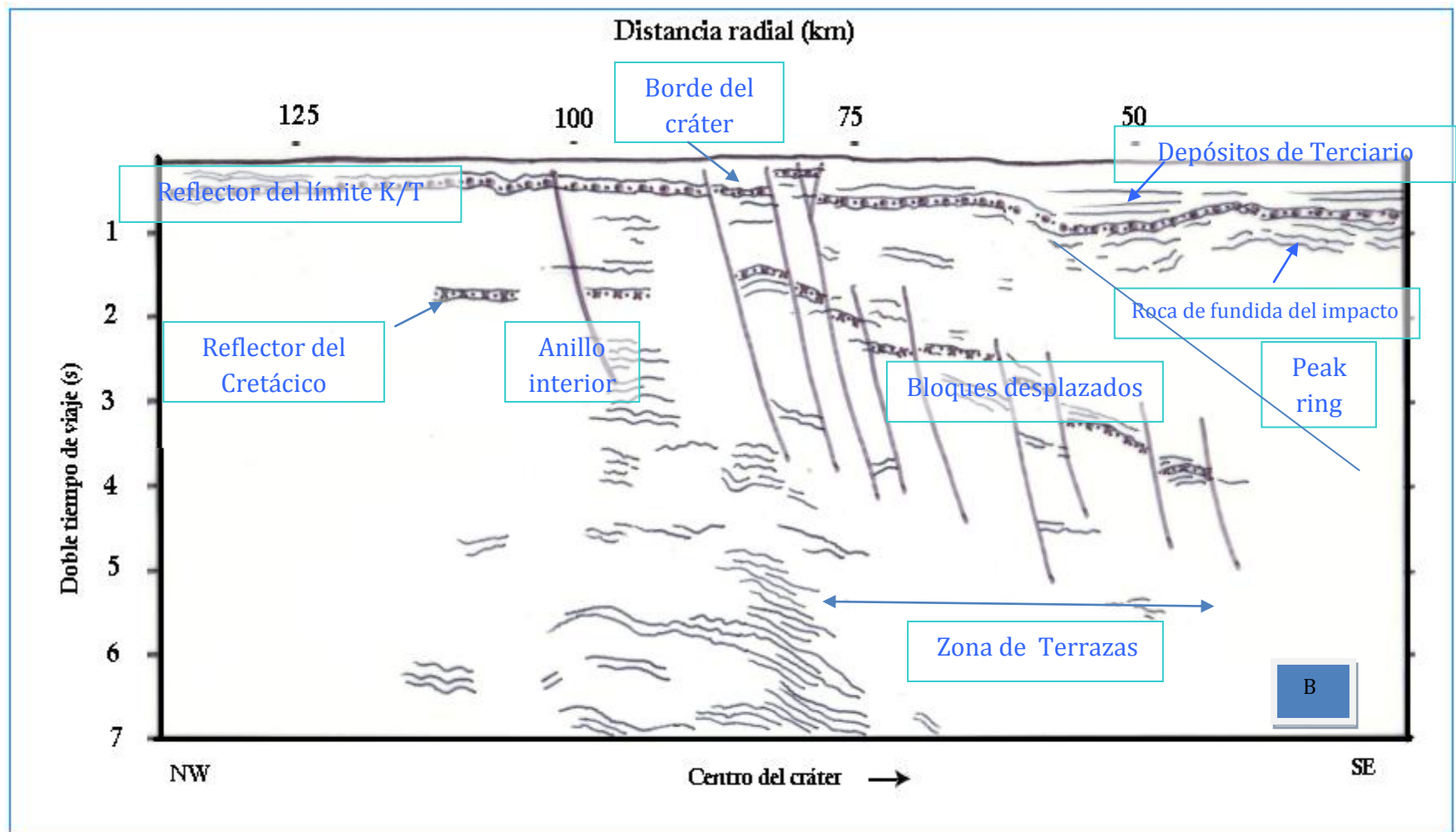


Figura 28. Se muestra una interpretación con ambos aspectos (estructural y estratigráfico) de la sección B.

En la figura 28 se muestra la interpretación estructural junto con la estratigráfica de la sección B, lo que nos da un panorama amplio de la estructura que estamos estudiando en cuanto a las características de disposición en sus

materiales. En este perfil se observa, además de lo ya descrito, que por debajo del reflector K/T tenemos un paquete pequeño pero de gran energía que corresponde a la roca de fusión, estos reflectores se han visto ya en la sección A₀, que también corresponde a la parte Oeste del cráter, situado por debajo de la estructura central.

El reflector energético del Cretácico se observa cortado por las fallas que delimitan los bloques desplazados, lo que lo hace perder la posición horizontal que aparentemente trae desde fuera del cráter.

IV.2.4. Línea C

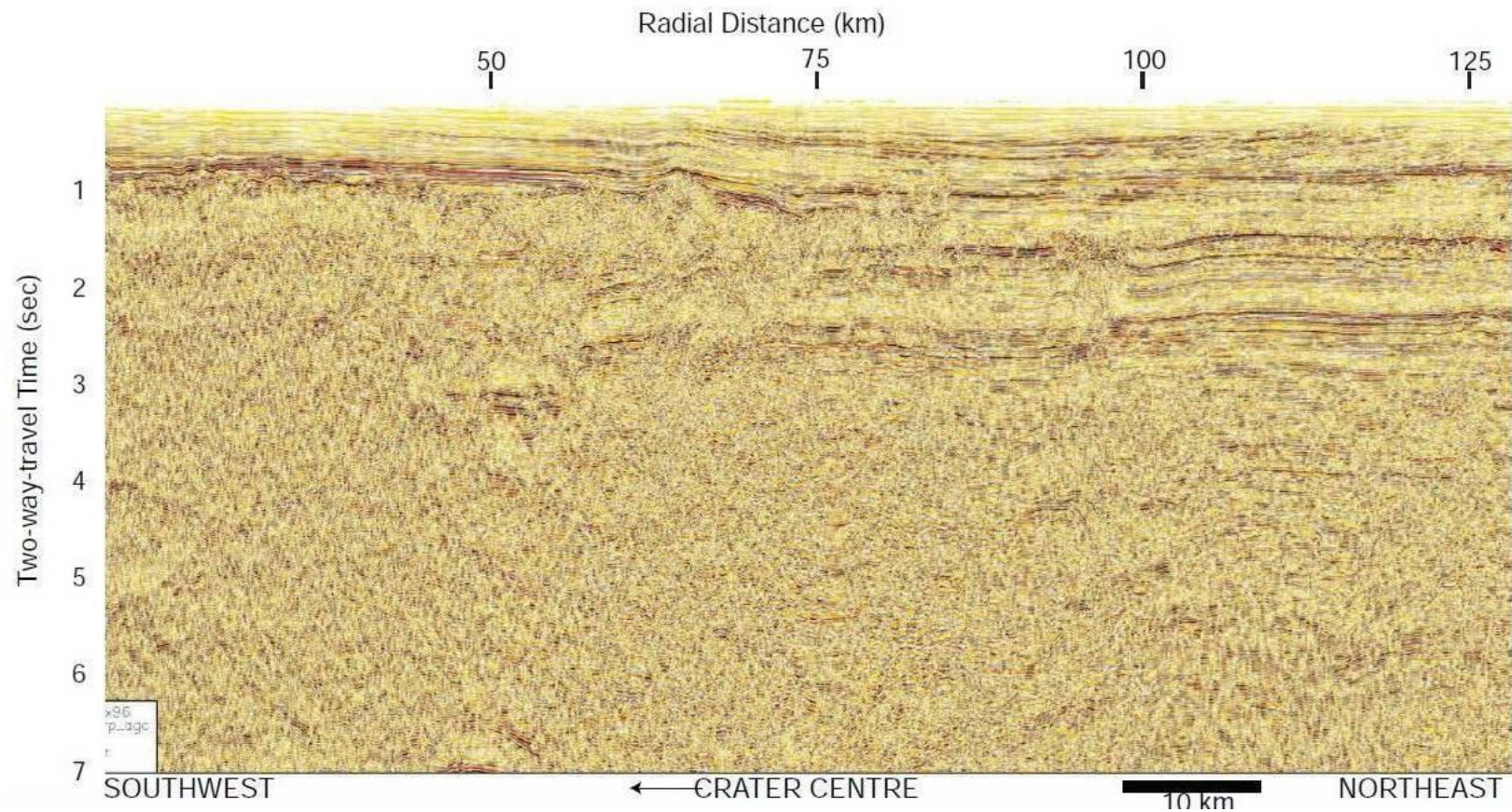


Figura 29. Sección sísmica de la línea C, sin interpretar. El eje vertical marca tiempo doble de recorrido en segundos, mientras que el eje horizontal marca distancia radial en kilómetros.

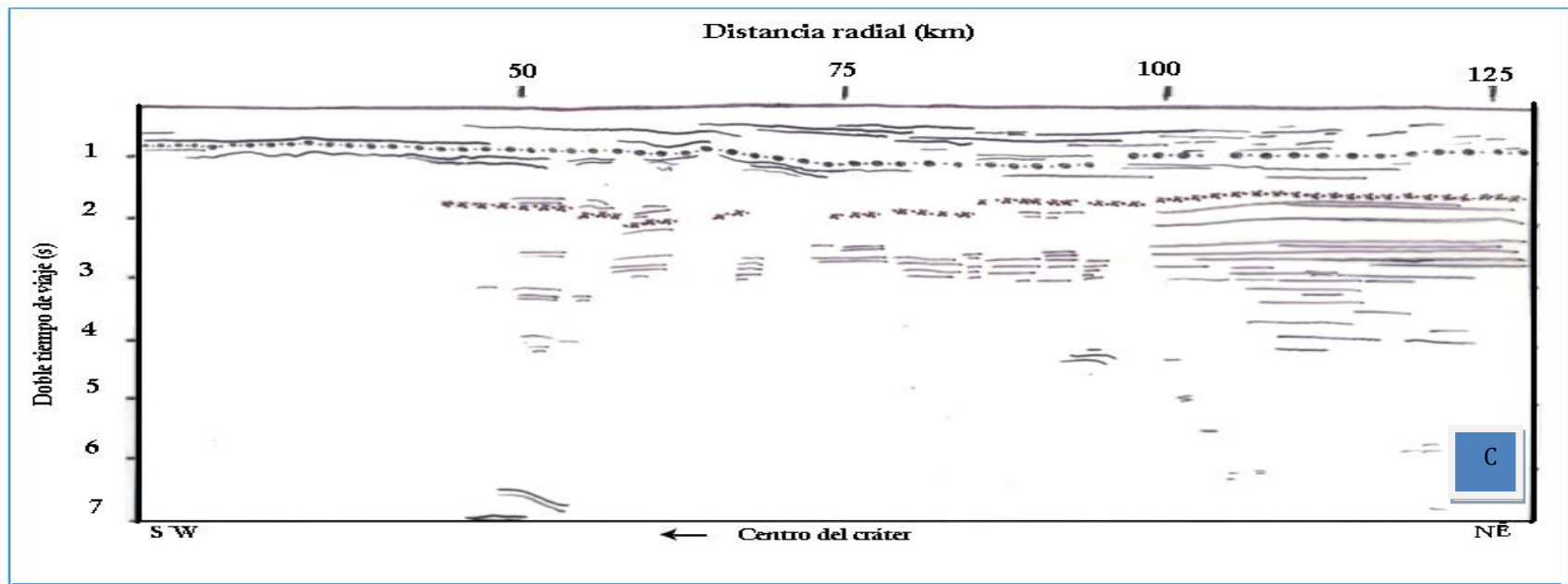


Figura.30. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica C.

Esta interpretación corresponde a la parte estructural de la línea C (figura 30), que corresponde a la sección Este del cráter. En esta sección es muy fácil seguir el reflector K/T ya que permanece continuo por encima del segundo en tiempo doble de registro, con un espesor que parece constante se depositaron los sedimentos de Terciario, los cuales como en las secciones anteriores se muestran como paquetes horizontales de reflectores de no muy altas frecuencias.

Por encima de los 2 segundos en tiempo de registro, se tiene un reflector también de alta energía que corresponde a una secuencia del Cretácico, el cual parece una capa horizontal continua si se comienza a observar desde fuera del cráter, pero a los 100 km, medidos a partir del centro del cráter, tiene un corte, que hace que se desplace ligeramente en profundidad, tiene un nuevo desplazamiento aproximadamente a los 85 km, para desaparecer y reaparecer cerca de los 60 km, donde solo se puede seguir a través de segmentos pequeños.

Aproximadamente a los 3 segundos se tienen paquetes de reflectores de alta energía y aparente continuidad, pero no se relacionan con algún evento geológico importante.

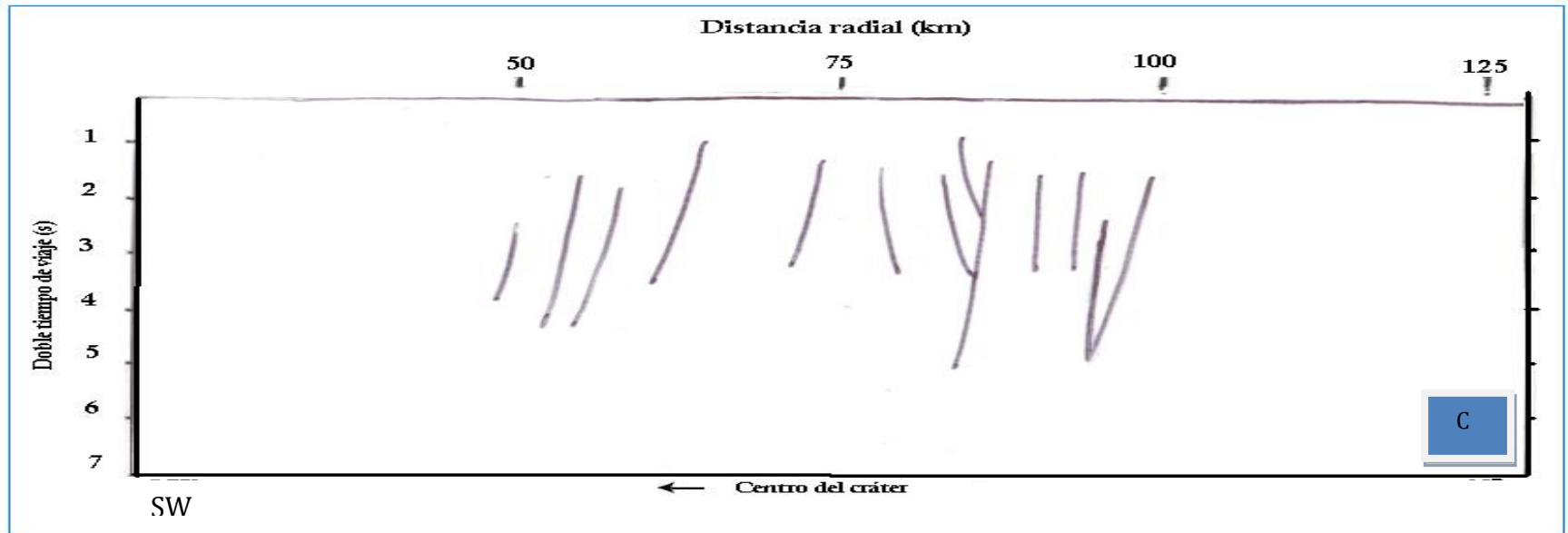


Figura.31. Interpretación estructural de la línea sísmica C.

La línea sísmica C presenta una interpretación estructural similar a las líneas anteriores (figura 31) con la diferencia de que las fallas que presenta no son tan superficiales, ya que el paquete Terciario es más grueso en esta área comparado con lo observado anteriormente.

Se observan las fallas que delimitan los bloques desplazados localizadas en la porción que se acerca más al centro del cráter.

Las fallas que delimitan el anillo interior 1 y el anillo exterior 2 se colocan a los 80 km y a los 100 km aproximadamente.

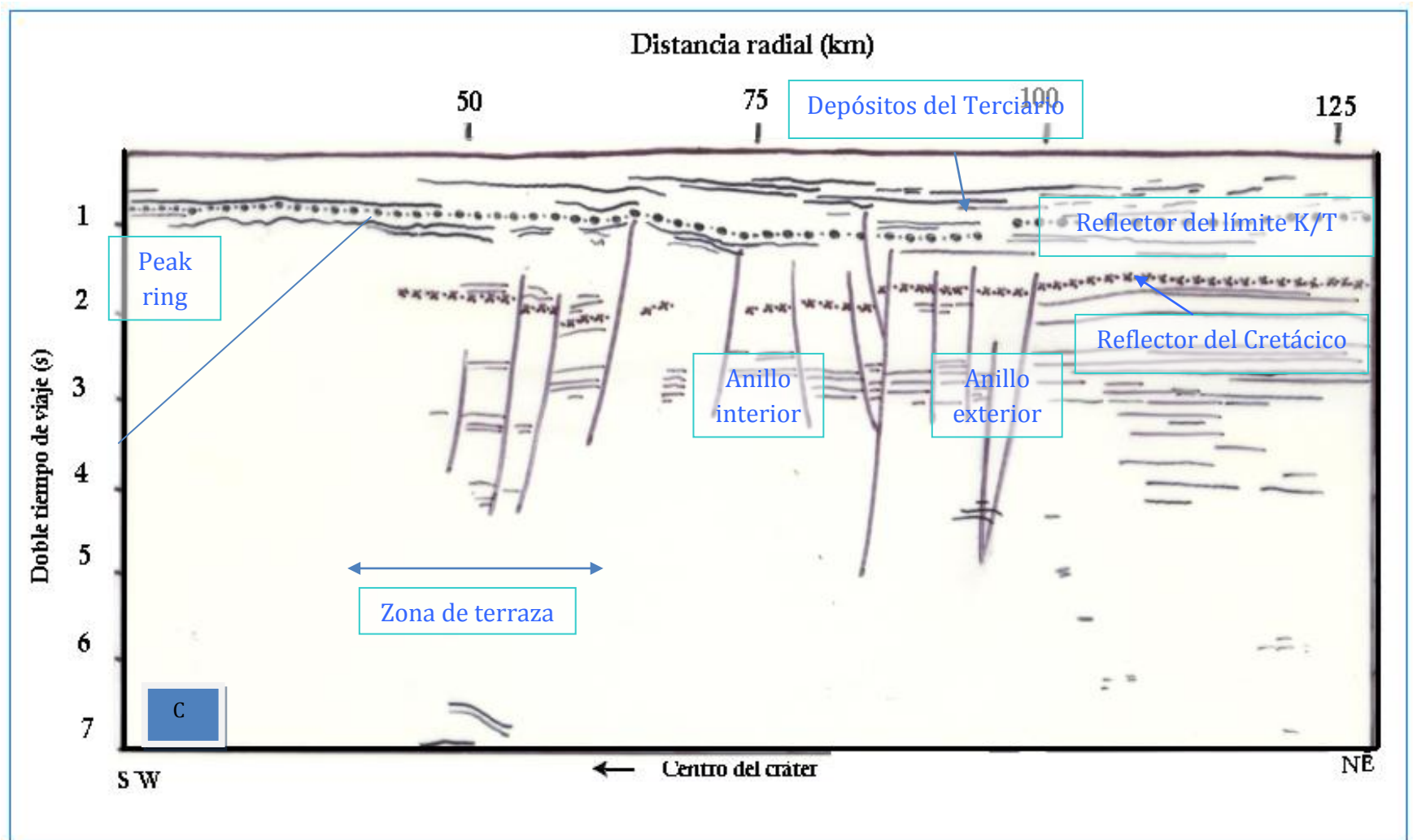


Figura 32. Se muestra una interpretación con ambos aspectos (estructural y estratigráfico) de la sección C.

En esta imagen (figura 32) se colocó la interpretación estructural sobre la interpretación estratigráfica, con lo que se puede visualizar cómo las fallas afectan a los estratos. Se aprecia que la discontinuidad del reflector de alta energía del Cretácico, es propiciada por las fallas que se encuentran por debajo de la estructura central, las cuales fueron provocadas por el colapso de la columna de eyección, provocando los bloques desplazados. Hacia fuera del cráter dicho reflector continúa afectado por las fallas que delimitan los anillos interior 1 a la altura de 80 km y exterior 2 a la altura de 100 km, medidos desde el centro del cráter. El reflector base del Terciario no es significativamente afectado por el fallamiento de la zona.

IV.2.5. Línea R₁

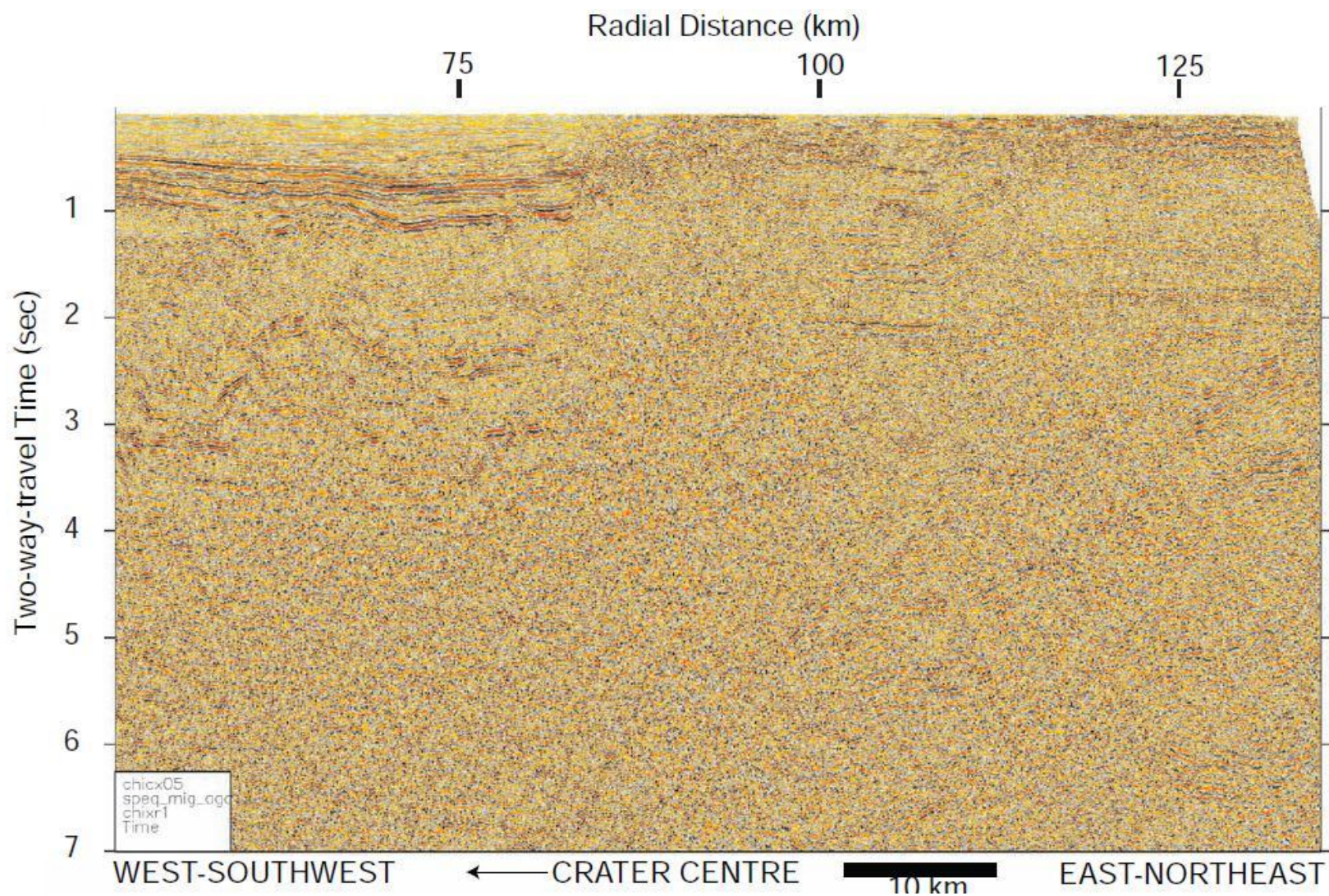


Figura 33. Sección sísmica de la línea R₁, sin interpretar. El eje vertical marca tiempo doble de recorrido en segundos, mientras que el eje horizontal marca distancia radial en kilómetros.

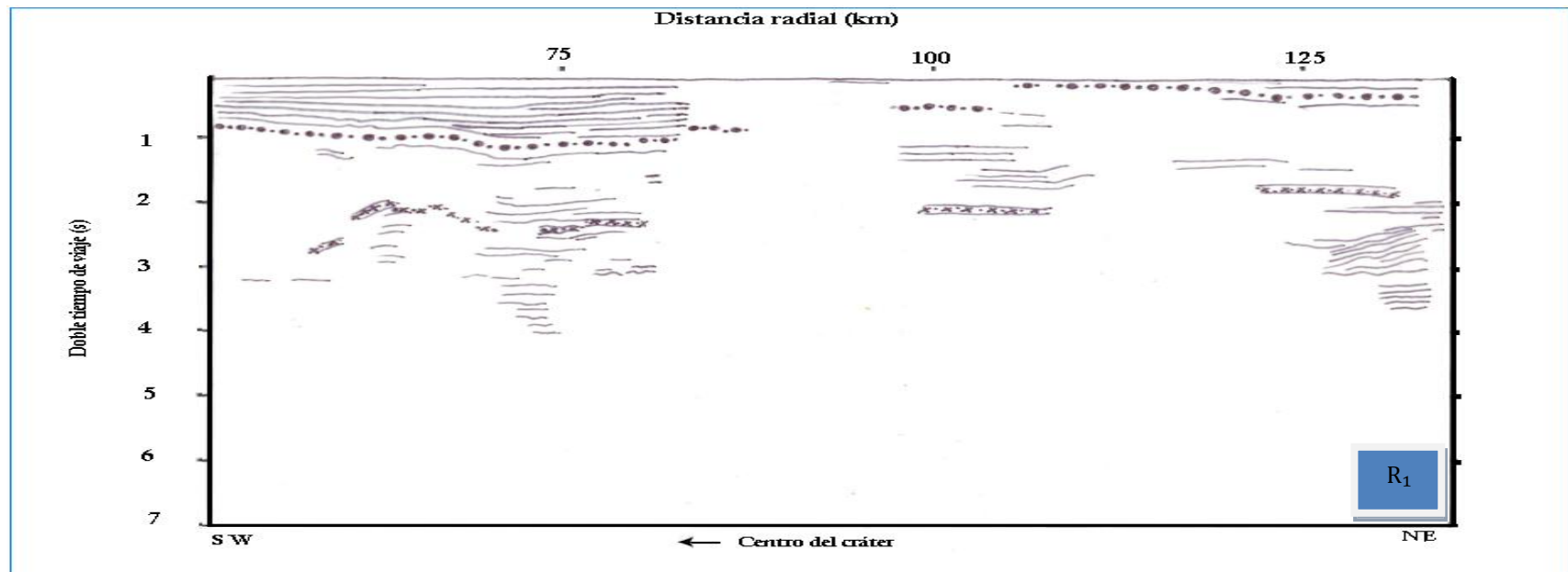


Figura.34. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica R₁.

Interpretación estratigráfica de la sección R₁, se observa en la figura 34, la posición de los paquetes que forman los estratos correspondientes a la zona Este del cráter.

Cercano al centro del cráter y hasta unos 80 km hacia afuera, el paquete de sedimentos del Terciario tiene un espesor grande comparado con el que tiene en el resto de la sección, llegando hasta un poco antes del segundo en doble tiempo de registro.

Por debajo de ellos yace el reflector Cretácico-Terciario, el cual muestra continuidad desde el centro hasta los 85 km, para ser visible en un pequeño segmento nuevamente a los 100 km, donde sufre un desplazamiento que lo lleva casi a la superficie donde continúa aparentemente ya sin cortes.

También es visible otro reflector de alta frecuencia, que no se observa de forma continua pero es posible seguirlo gracias a su carácter energético, debido a su posición (por encima de los 2 segundos) se trata del mismo reflector de muy alta energía perteneciente al paquete Cretácico.

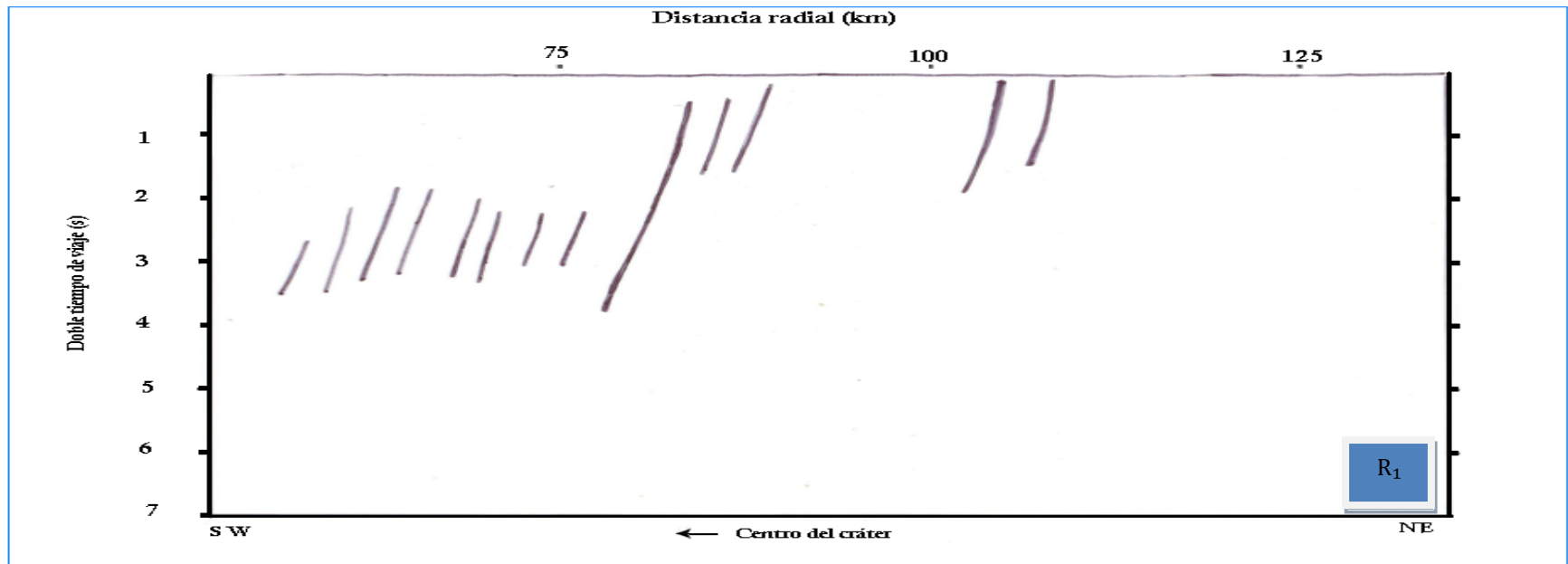


Figura.35. Interpretación estructural de la línea sísmica R₁.

La interpretación estructural (figura 35) coloca nuevamente las fallas asociadas a los bloques desplazados hasta una distancia de 80 km aproximadamente desde el centro del cráter, pasando ésta distancia, una falla más grande que casi

llega a la superficie seguida de fallas que profundizan menos; pasando los 100 km, aproximadamente a los 110-115 encontramos otras fallas ya alejadas de la estructura.

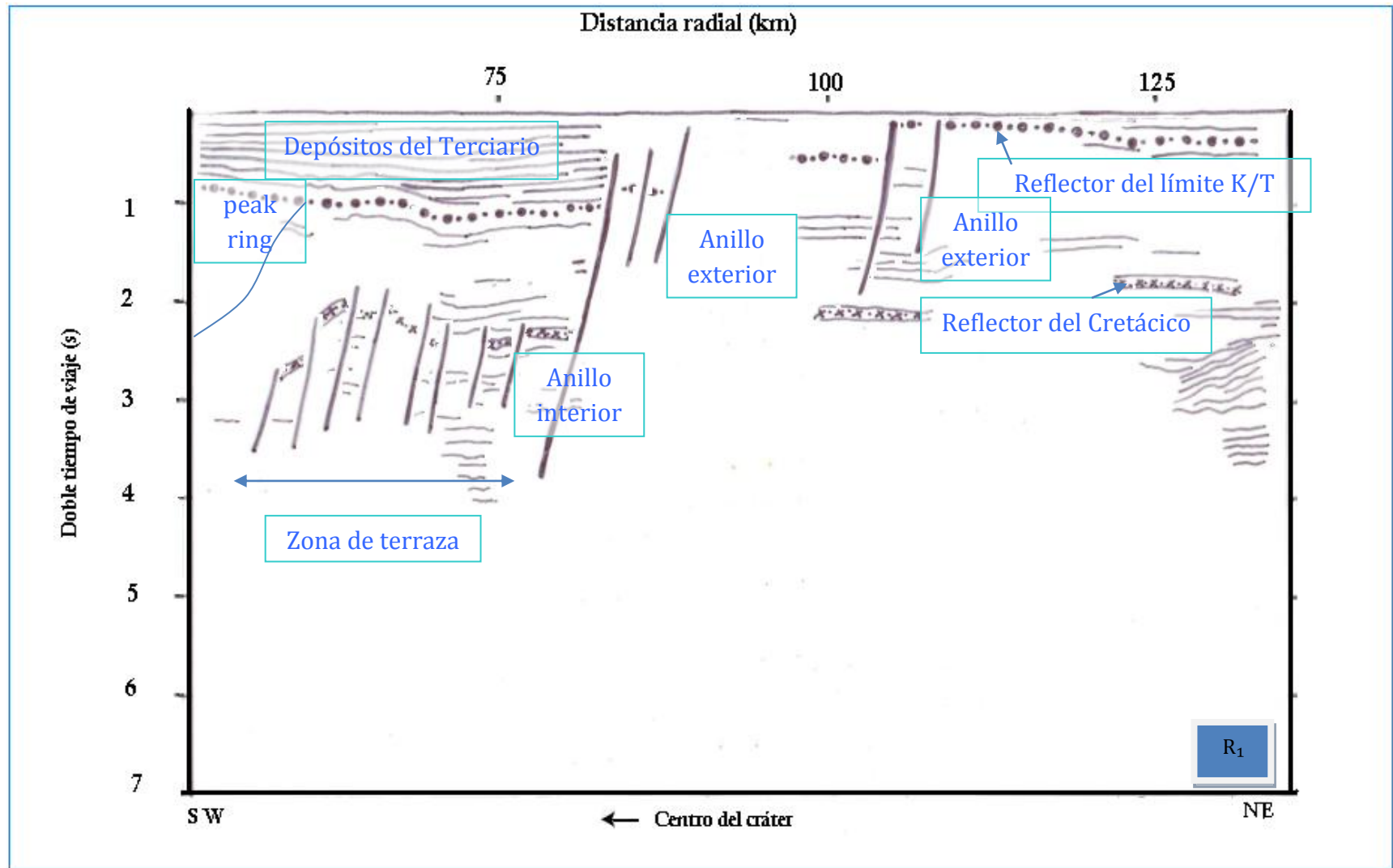


Figura 36. Se muestra una interpretación con ambos aspectos (estructural y estratigráfico) de la sección R₁.

Relacionando las interpretaciones anteriores, obtenemos esta imagen (figura 36), en la que podemos observar cómo las fallas que delimitan los bloques desplazados están afectando al reflector energético del Cretácico, hasta la distancia de 85 km a partir de centro del cráter, donde se pierde, volviendo a verse muy cerca de los 100 km un pequeño segmento de similares características energéticas, que se pierde nuevamente para dejarse ver hasta los 125 km ya en el final de la sección.

El borde del cráter se localiza cerca de los 85 km donde una falla delimita el anillo interior 1 y corta la secuencia Cretácico-Terciario, a partir de aquí es difícil seguir el reflector, aproximadamente a 90 km se localiza otra falla que sitúa al anillo exterior 2; hacia el final de la imagen es posible seguir sin dificultad dicho reflector que es afectado ligeramente por las fallas que delimitan el anillo exterior 3.

IV.2.6. Línea R₃

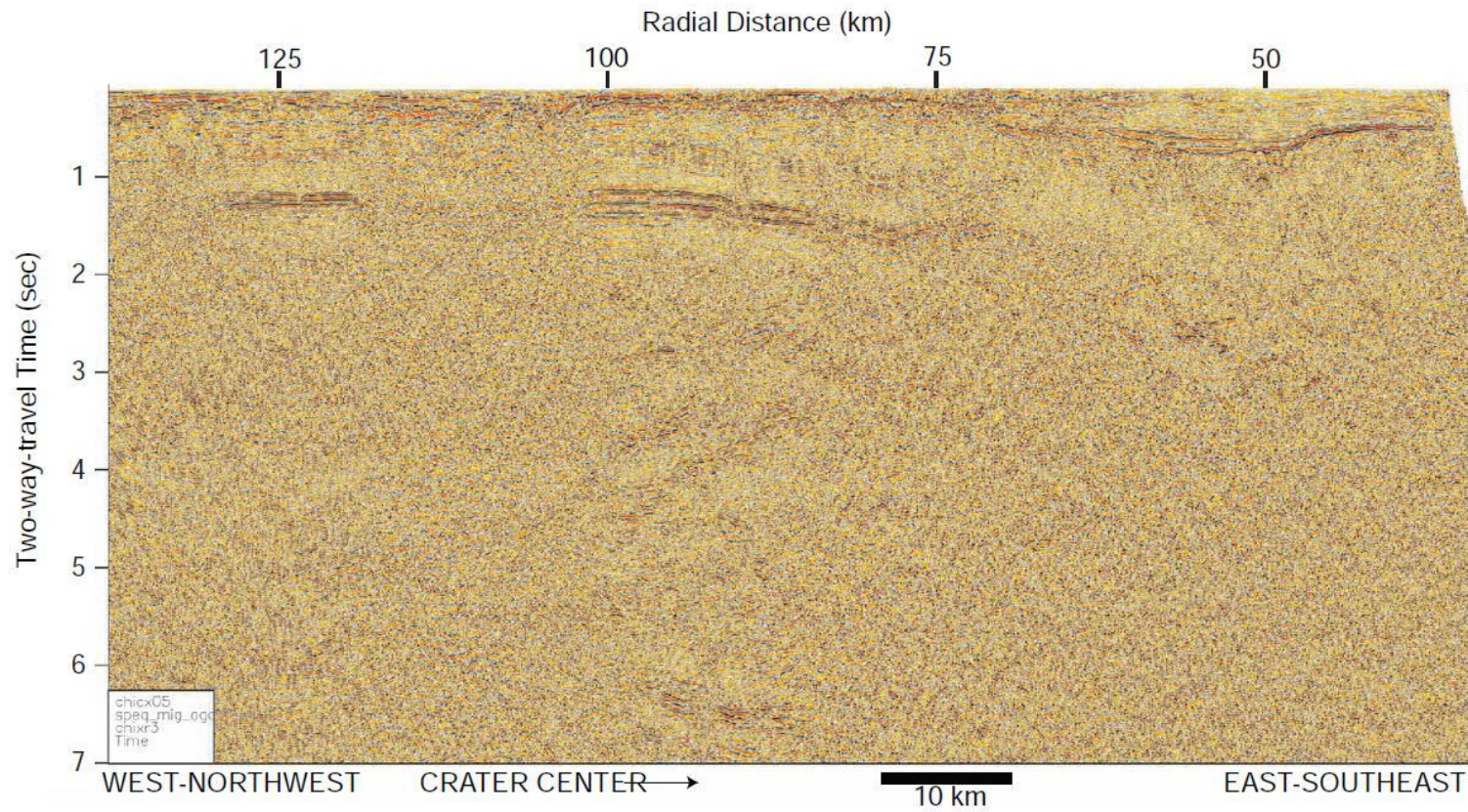


Figura 37. Sección sísmica de la línea R₃, sin interpretar. El eje vertical marca tiempo doble de recorrido en segundos, mientras que el eje horizontal marca distancia radial en kilómetros.

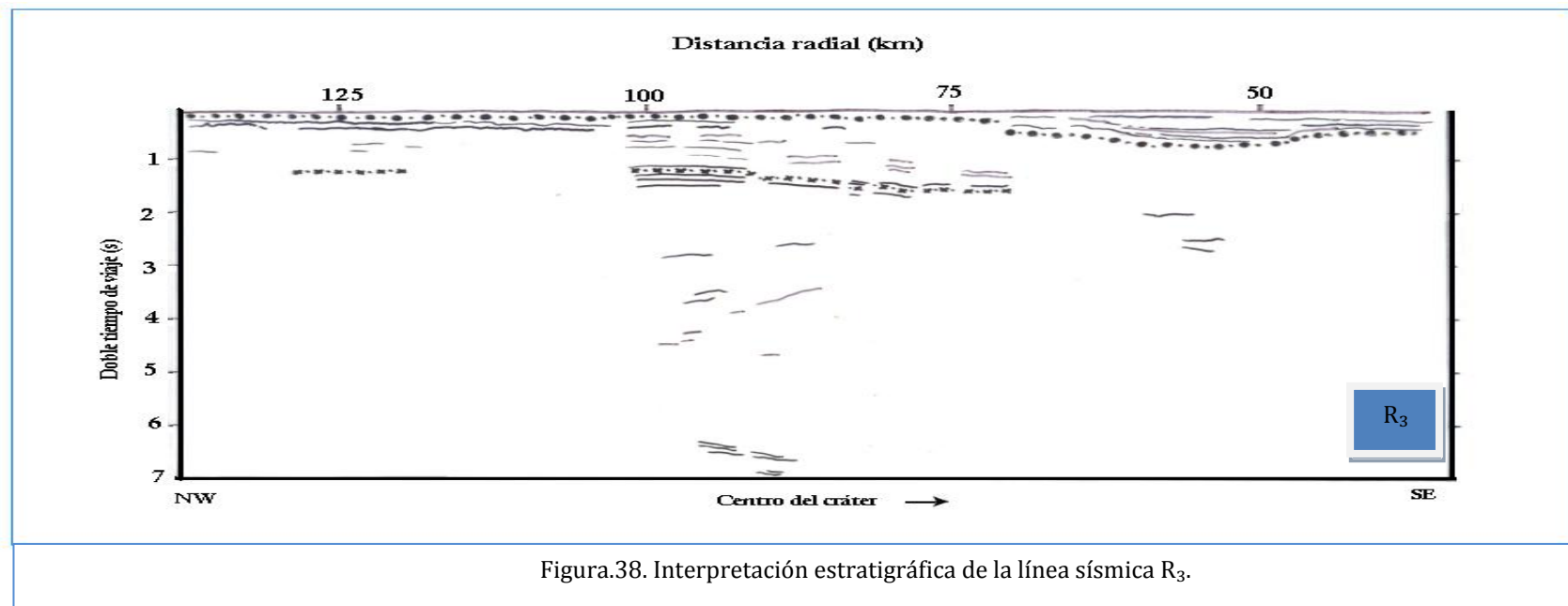
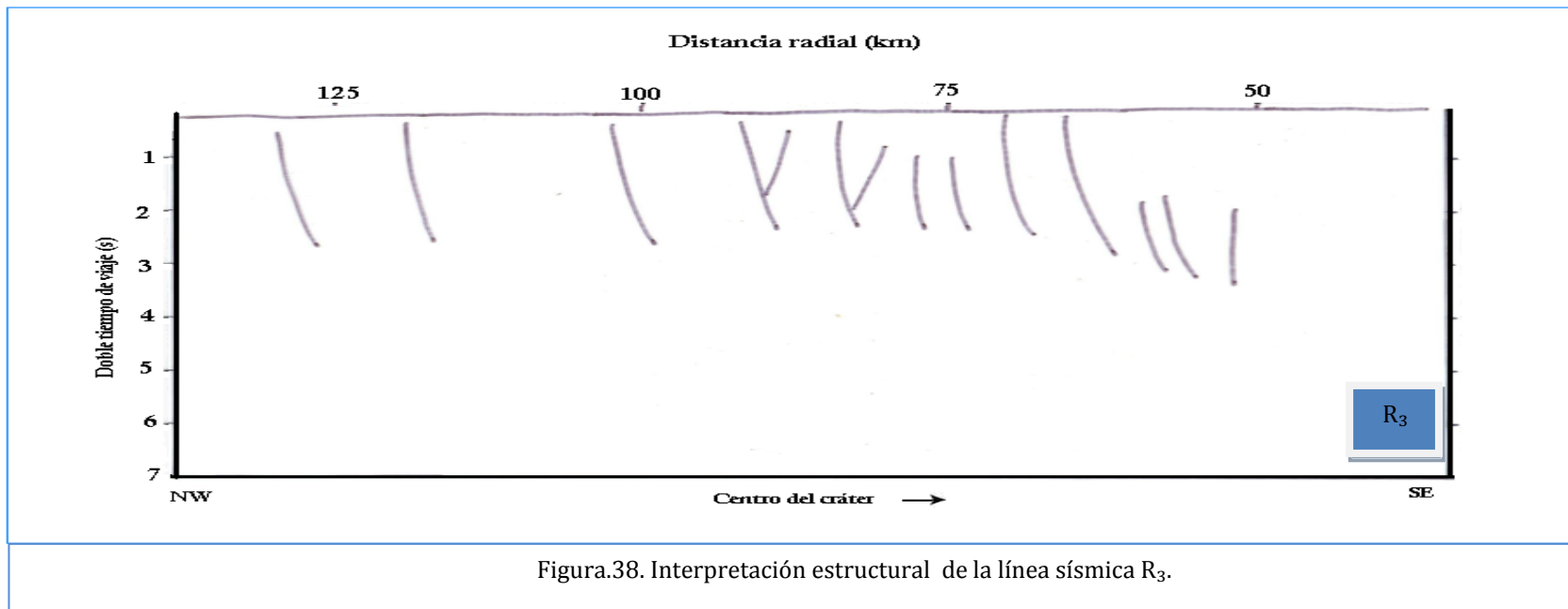


Figura.38. Interpretación estratigráfica de la línea sísmica R₃.

En la interpretación estratigráfica de la sección R₃ (figura 38), se observa la posición de los estratos de la parte Oeste del cráter. Es posible seguir casi completamente el reflector límite del Cretácico-Terciario, solamente se observa un pequeño desplazamiento alrededor de los 70 km desde el centro del cráter, el cual parece delimitar un cuenca muy pequeña donde se observan paquetes de sedimentos del Terciario en una disposición horizontal.

Otros reflectores son poco visibles, en general, la imagen muestra una textura muy uniforme que no permite la apreciación de paquetes de sedimentos. Aún así segmentos cortos entre los 75 y los 100 km a un poco más de 1 segundo en doble tiempo de registro se pueden distinguir y por su carácter energético y se interpretan como el reflector de alta energía del Cretácico que se ha venido siguiendo.



La figura 38 muestra la interpretación estructural de la sección R₃, se observan una serie de fallas en dirección del centro del cráter, las cuales comienzan a los 50 km y terminan más allá de los 125 km.

Desde el centro hasta los 60 km aproximadamente, las fallas se localizan debajo de los 2 segundos de registro, por debajo de la zona central donde se localiza el peak ring. Superada esta distancia continúan las fallas, que algunos autores (Sean P. S. Gulick, et al) marcan a profundidad, debido a que la textura del material, indica en ese intervalo de distancia, un cambio.

Cerca del final de la sección, alrededor de lo 125 km otras fallas son visibles, gracias a la presencia de un pequeño reflector energético, que se distingue dentro de un a porción de material de textura confusa.

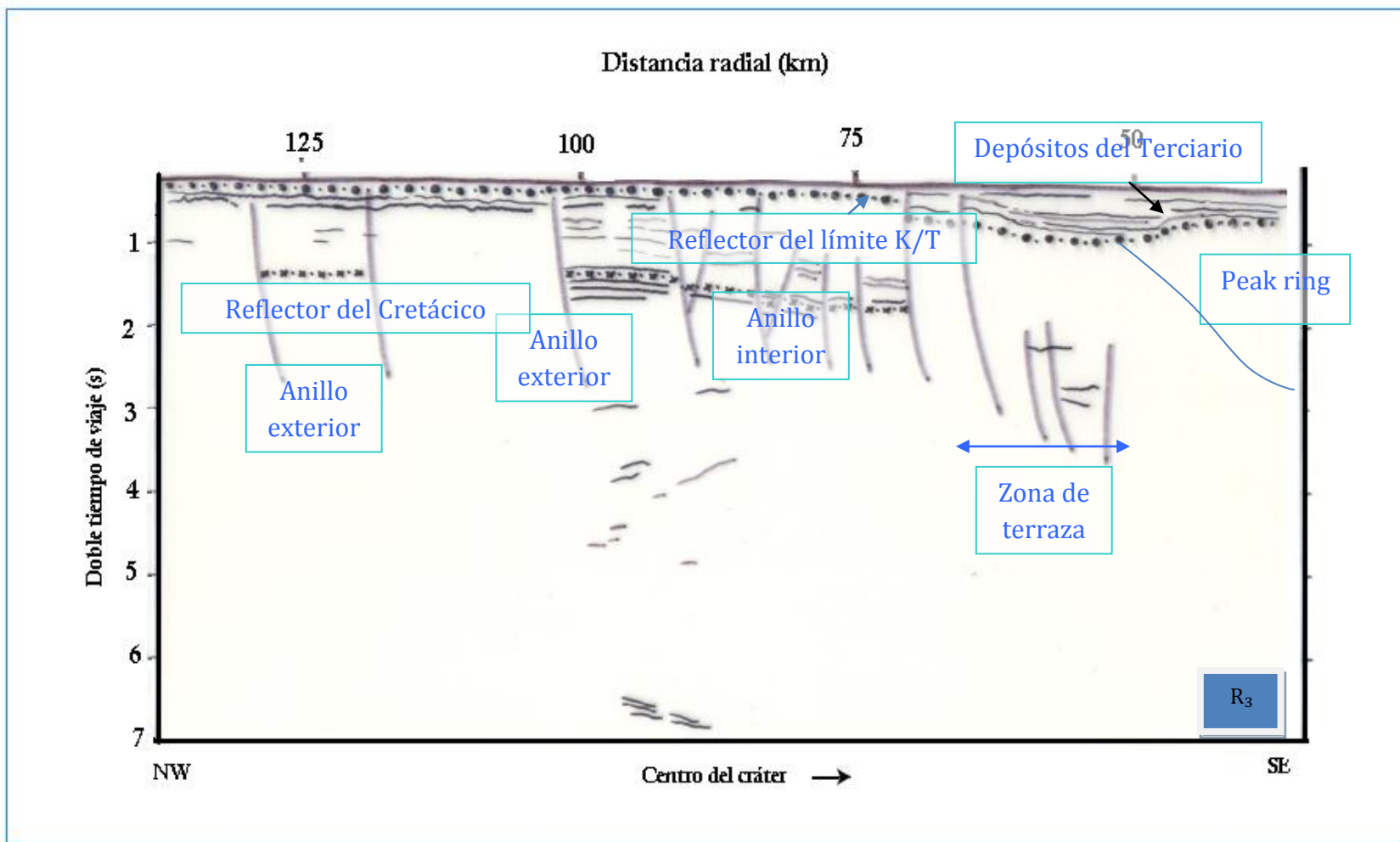


Figura 40. Se muestra una interpretación con ambos aspectos (estructural y estratigráfico) de la sección R₃.

Esta sección muestra, una vez que se empalman las dos interpretaciones (figura 40), que el límite K/T, es deformado por la estructura central y cortado por una falla a la altura de los 70 km que delimita el borde del cráter, después de esos eventos continúa sin ser afectado por el fallamiento producto del impacto.

El anillo interior 1 se localiza aproximadamente a los 90 km, siguiendo el fallamiento se observan los anillos exteriores 2 y 3 pasando los 100 y hasta los 125 km respectivamente.

Es importante destacar que a pesar de ser una sección que describe la parte Oeste del cráter no facilita la visibilidad de la roca fundida de impacto debajo del peak ring, como lo venían mostrando las secciones correspondientes a dicha zona del cráter.

IV.2.7. Línea R_{6a}

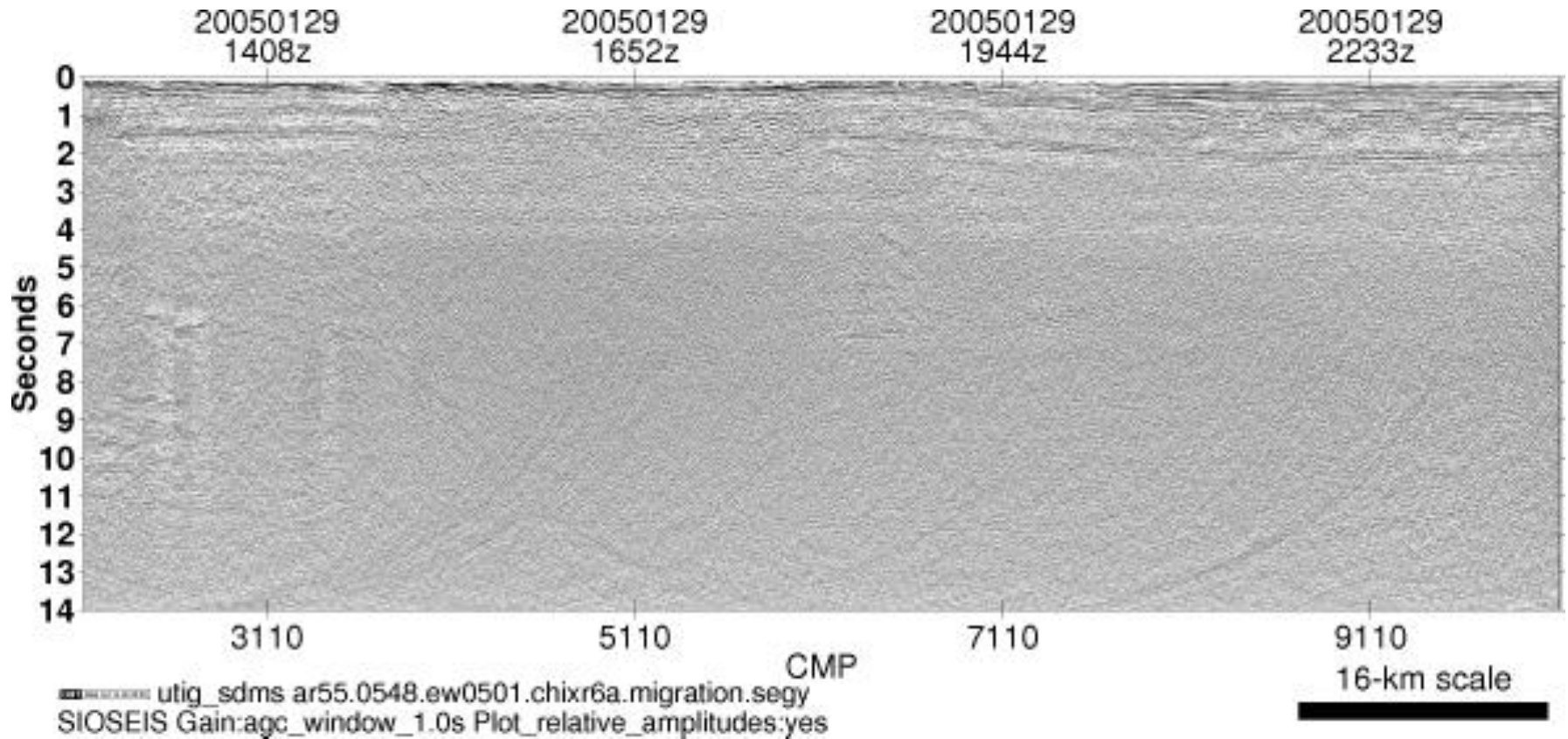


Figura 41. Sección sísmica R_{6a}. Ésta sección sigue una trayectoria circular alrededor del cráter, unida a la sección siguiente la R_{6b} forman la circunferencia Norte del cráter.

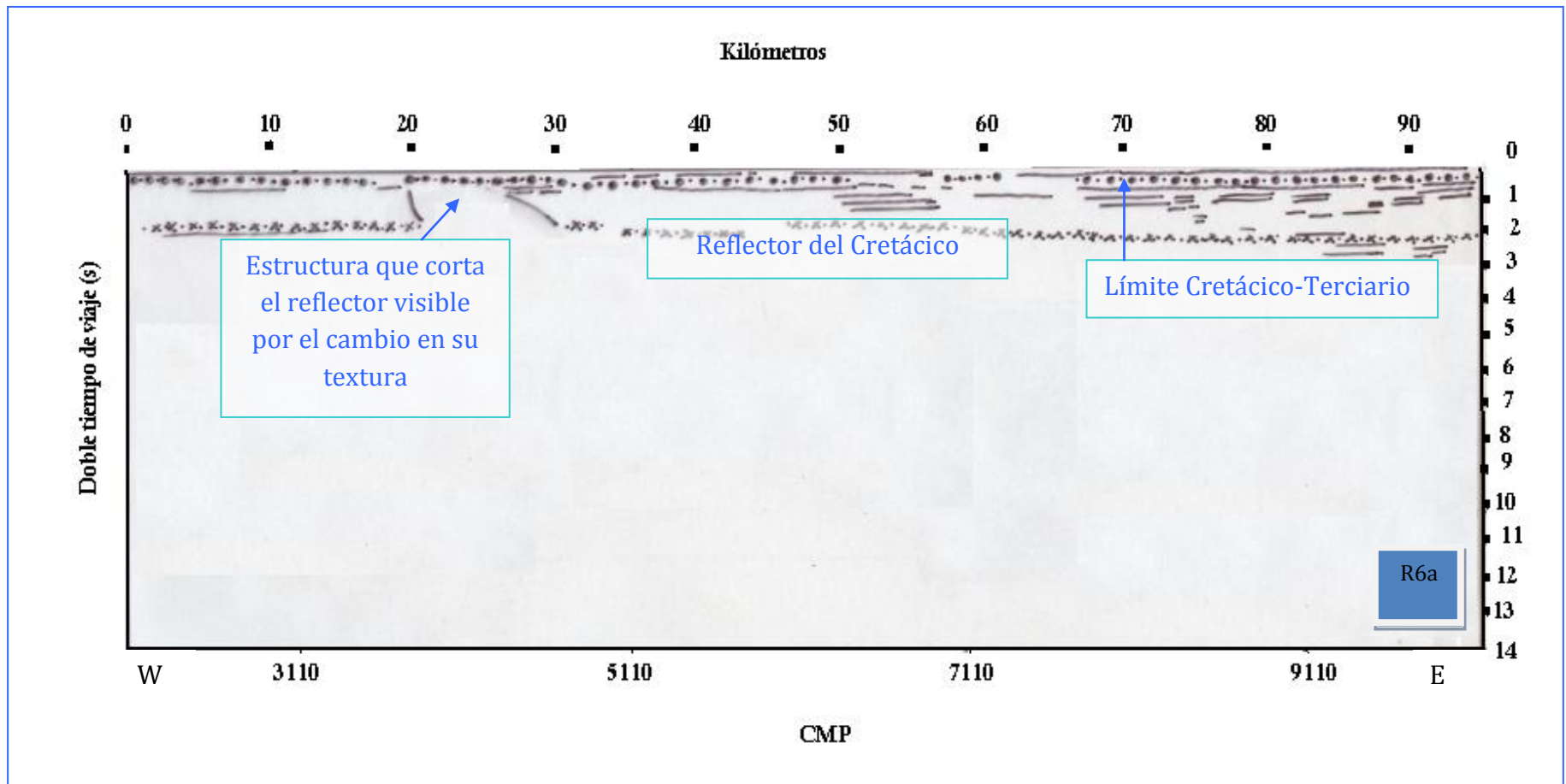


Figura 42. Interpretación estratigráfica de la sección R_{6a}.

Para ésta sección, dadas las condiciones de la imagen, (figura 42) sólo se obtuvo un modelo para interpretar, es el que se refiere a la parte estratigráfica. Ya que debido a la textura del material no se observa ningún rasgo estructural, que afecte los estratos. Se identifica el reflector base del Terciario, por encima del segundo en tiempo doble de registro, paquetes de sedimentos horizontales yacen debajo y por encima de dicho reflector, son líneas muy finas que se observan casi continuas.

Observando de Este a Oeste, el reflector de alta energía del Cretácico, se localiza justo a los 2 segundos en doble tiempo de registro, pero conforme nos movemos a la parte Oeste el reflector ya subió ligeramente de los 2 segundos. Existe un rasgo que llama la atención, entre el kilómetro 20 y el 30 hay una estructura que se aprecia, debido al cambio de textura del material, que corta la continuidad de nuestro reflector.

Esta sección corta a las líneas R₃ y B, haciendo una aproximación probablemente las interseca entre los 70 y 90 km medidos desde el centro del cráter y al rededor de los 10 y los 60 kilómetros respecto al tamaño de la propia línea.

IV.2.8. Línea R_{6b}

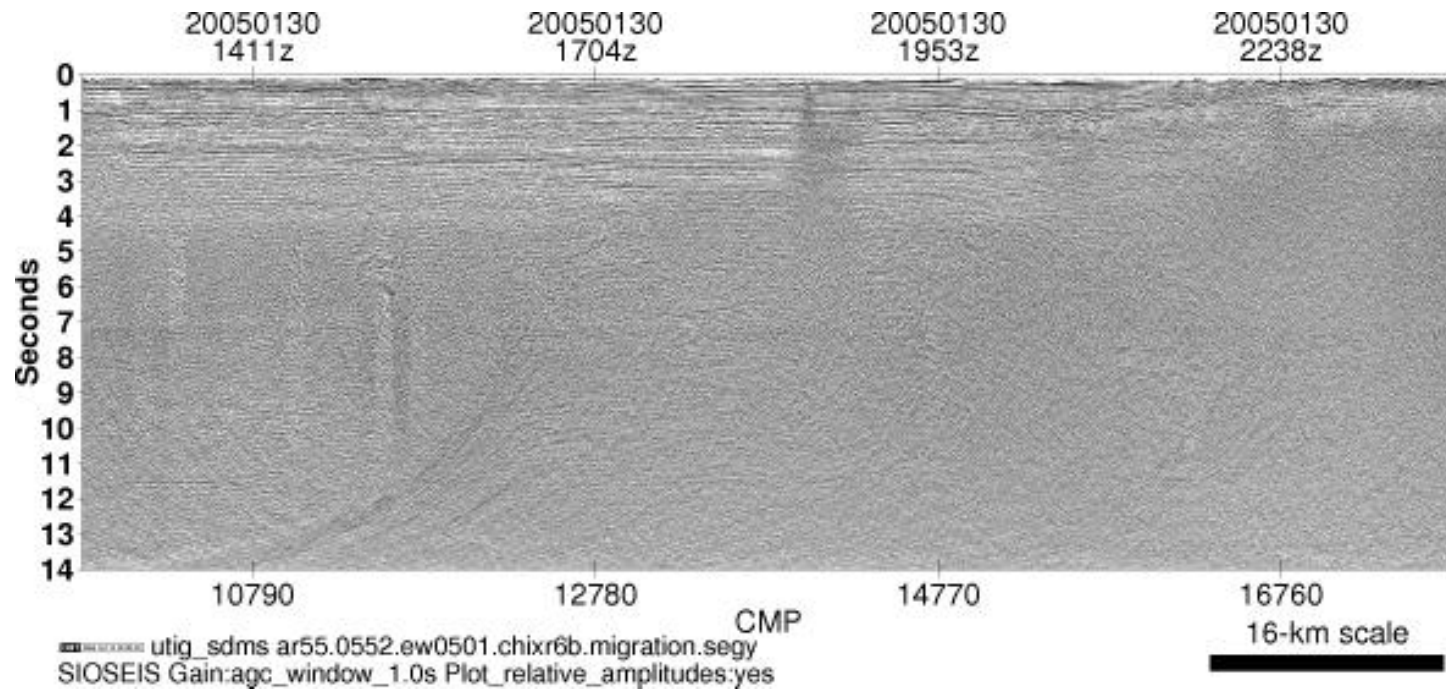


Figura 43. Sección R_{6b}. Continúa la trayectoria circular de la línea anterior, formando el semi-círculo Norte del cráter.

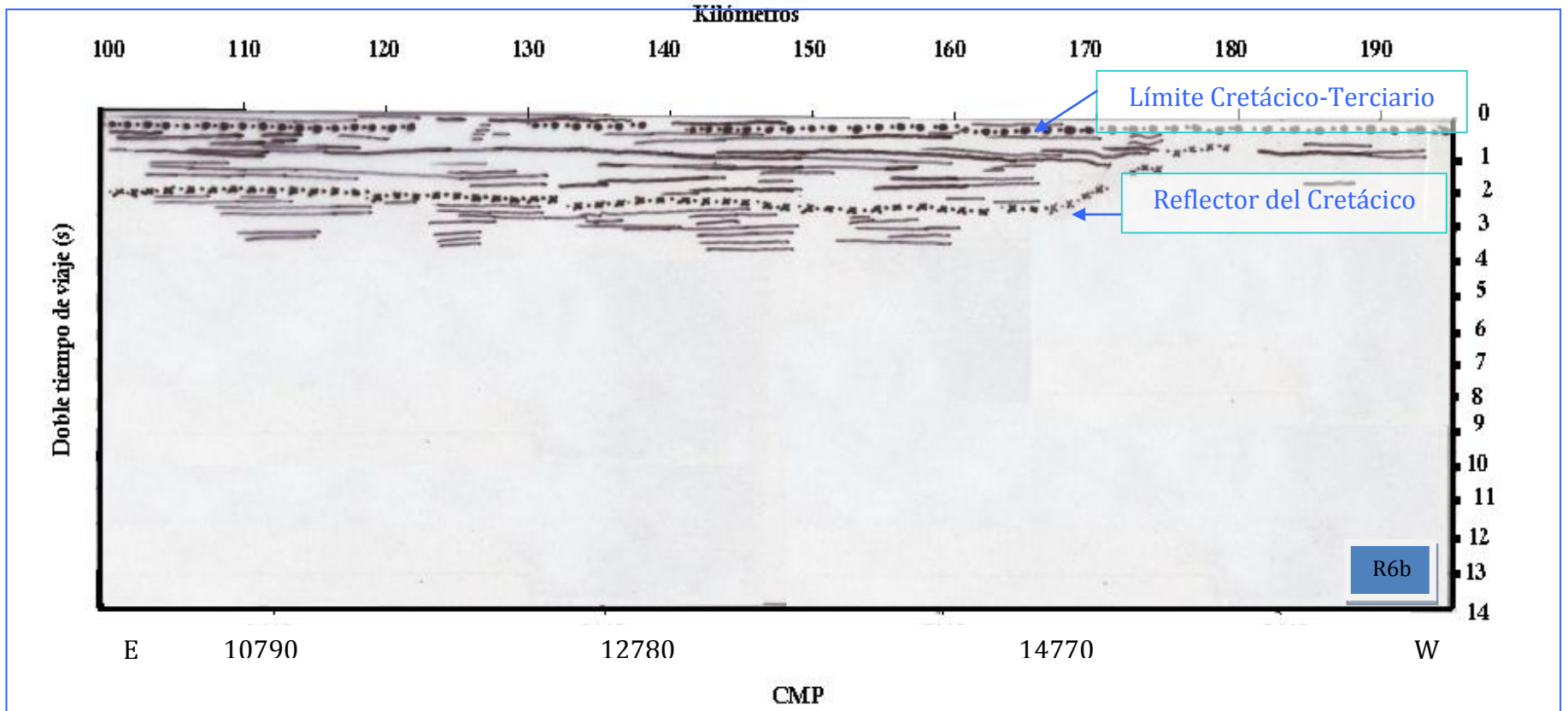


Figura 44. Interpretación de la sección R_{6b}.

Para ésta sección la única interpretación (figura 44) es la estratigráfica, ya que no se reconoce ningún patrón que de algún control estructural. La línea continúa la sección anterior para formar un solo perfil circunferencial al cráter, corta los perfiles A₁, R₁ y C, que son líneas radiales al centro del cráter, aproximadamente a 80, 80 y 70 km respectivamente.

Las posiciones que corresponden sobre la línea circunferencial son aproximadamente 190, 170 y 140 km respectivamente, referenciadas al tamaño de todo el perfil circular.

Los reflectores que se observan son paquetes horizontales muy bien dispuestos a lo largo de toda la imagen, se distinguieron al igual que en el resto de las secciones los reflectores del Cretácico-Terciario y otro muy energético correspondiente al Cretácico, ya que correlacionan muy bien su posición en todas las secciones.

Algo que resalta de esta imagen es la forma en que el reflector energético dentro de la columna del Cretácico se acuña unos 30 km antes de que la línea termine, desplazándose desde los 2 segundos hasta alcanzar un poco menos del segundo en doble tiempo de registro.

IV.3. Integración de los datos de pozo

Para realizar una mejor interpretación de las secciones sísmicas que se estudian es necesario ligar los horizontes propuestos, con información litológica y estratigráfica obtenida de los núcleos conseguidos en los pozos perforados.

En las diversas investigaciones realizadas en torno al cráter Chicxulub, se han llevado a cabo programas de perforación de pozos y recuperación de núcleos por parte de la UNAM, la Comisión Federal de Electricidad CFE y PEMEX.

A continuación se muestra una imagen satelital que muestra la posición de los pozos perforados en los diferentes programas de investigación, así como el borde del cráter delimitado por el anillo de cenotes y el punto amarillo muestra el centro del cráter. (Figura 45).

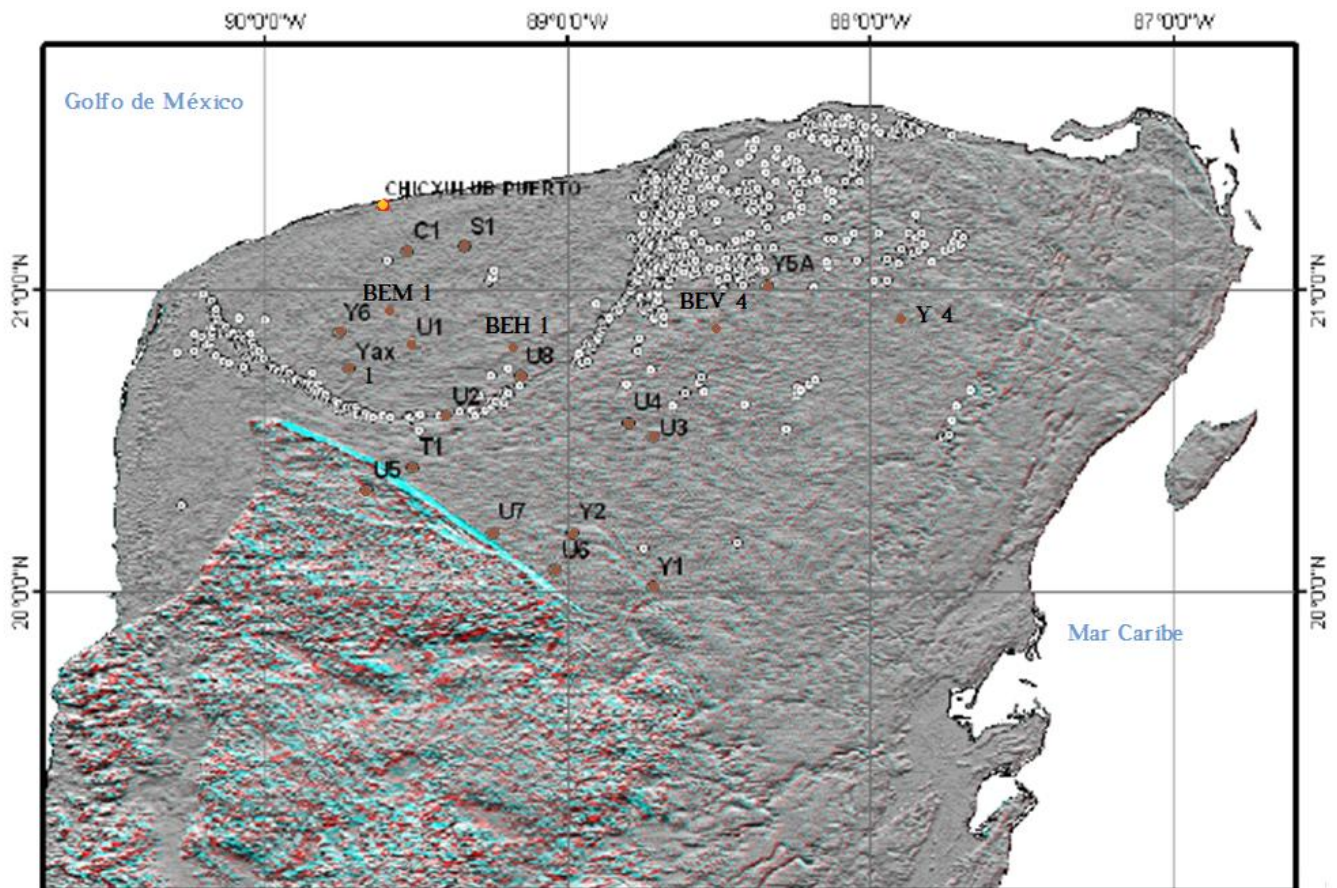


Figura 45. Distribución de las perforaciones existentes para el estudio del Cráter Chicxulub. Imagen modificada de J. Urrutia-Fucugauchi / Chicxulub-Drilling Seismic 2010.

La siguiente tabla muestra la ubicación de pozos y profundidad de extracción de muestras en la exploración. (Tabla 4).

Pozo	Localidad	Longitud	Latitud	Profundidad de extracción	Profundidad a la parte superior de la capa de material de eyecta
BEM-1	Mérida	89.60°W	20.91°N	350	
BEH-1	Huhí	89.20°W	20.82°N	150	
BEV-4	Valladolid	88.50°W	20.86°N	300	250
UNAM-5	Santa Elena	89.66°W	20.34°N	503	332
UNAM-7	Tekax	89.25°W	20.20°N	700	222
UNAM-6	Peto	89.04°W	20.07°N	702	257
UNAM-1	Timucuy	89.52°W	20.81°N	155	
UNAM-8	Huhi	89.16°W	20.71°N	101	
UNAM-3	Kancabdzanal	88.72°W	20.51°N	138	
UNAM-4	Piste	88.80°W	20.56°N	63	
UNAM-2	Tecoh	89.40°W	20.58°N	560	
YAX-1	Yaxcopoil	89.72°W	20.74°N	1511	795

Tabla 4. Perforaciones para estudiar el Cráter Chicxulub. Modificada de J. Urrutia-Fucugauchi et al. / C. R. Geoscience 340 (2008) 801-810

Con el análisis del material que proporcionan los núcleos extraídos es posible realizar una correlación que nos permita dibujar una columna estratigráfica para visualizar la composición y cambios del material que compone el área de estudio.

En Mérida, donde se localiza el pozo BEM-1, la secuencia de carbonatos está formada por intercalaciones de micrita (roca sedimentaria formada por partículas calcáreas que varían en diámetro desde 0,06 hasta 2 mm), que han sido depositadas mecánicamente y no de la solución, las partículas, que la componen son fósiles, guijarros y gránulos de rocas carbonatadas, y oolitos (nódulos esféricos con estructura concéntrica, se transportan y ordenan por corrientes de agua), calizas y calciruditas (dolomita o piedra caliza formada de piezas gastadas o rotas de coral o de conchas o fragmentos de piedra caliza más gruesa que la arena; los intersticios están llenos de arena o calcita, en total unidos con cemento calcáreo). En el área entre Mérida y Huhi, las secuencias son más abundantes en depósitos de coquina (sedimentos compuestos principalmente por caparzones calcáreos de organismos marinos, como bivalvos, gasterópodos y corales en diferentes proporciones de materiales clásticos y diverso grado de compactación) blanca o crema. En profundidad

existe baja consolidación del material, con horizontes de calcarenitas (roca formada por la filtración de agua a través de una mezcla de fragmentos de conchas calcáreas y arenas de cuarzo, causando su disolución).

Analizando el pozo BEH-1 correspondiente al área de Huhí, se encontró que está formada por micrita, caliza, que muestra fragmentos de microfósiles junto con algún grado de disolución y roca dolomítica de gris a gris rojizo. En el área entre Huhí y el borde del cráter, la secuencia muestra gran proporción relativa de calcarenitas con calizas, calizas dolomitizadas, coquina y estructuras coralinas recristalizadas.

Para el área de Valladolid, pozo BEV-4, la secuencia está formada hasta los 250 m por caliza micrítica, teniendo horizontes arcillosos, en parte alterados por la disolución, además de calciruditas fosilíferas y horizontes ricos en arcilla. Entre los 250m y los 284m están presentes las brechas carbonatadas, están caracterizadas por abundantes clastos de calizas, dolomitas, yeso y anhidritas; es en éste intervalo de 34m, es donde se propone la existencia de la capa de brecha del impacto. Por debajo de 284m y hasta los 300m la secuencia está compuesta por caliza dolomitizada y horizontes de lutita.

Analizando la información de los materiales del pozo en el área de Tekax, UNAM-7 (sector Sur del cráter), el cual se encuentra a una distancia radial similar a la de BEV-4, (sector Este del cráter), podemos decir que, las brechas de impacto en ésta zona están formadas por dos diferentes unidades: la unidad superior rica en su base de clastos de fusión localizados entre 222.2m y 384m; la unidad inferior rica en carbonatos y clastos de evaporitas por debajo de los 384m, los cuales forman una secuencia de margas y evaporitas.

En la región de Peto, pozo UNAM-6, las brechas superiores se encuentran entre los 257m y los 283m, mientras que las brechas carbonatadas están localizadas aproximadamente entre los 283m y los 540m. Tanto este pozo como el UNAM-7 están localizados por fuera del borde del cráter y fuera también de las anomalías gravimétricas de los anillos. El resto de las brechas carbonatadas y de los carbonatos quizá correspondan a los bloques desplazados dentro del paquete Cretácico. Una secuencia similar de carbonatos sólo se observa en el registro del pozo UNAM-6 que muestra abundantes cantidades de yeso y anhidrita.

Una vez realizados estudios macroscópicos y petrográficos en el material de los pozos BEM-1 que se encuentra a 50 km del centro del cráter, BEH-1 localizado a 76 km respecto del centro del cráter y BEV-4 alejado 120 km del mismo punto, se propone de manera simplificada la siguiente columna litológica. (Figura 46).

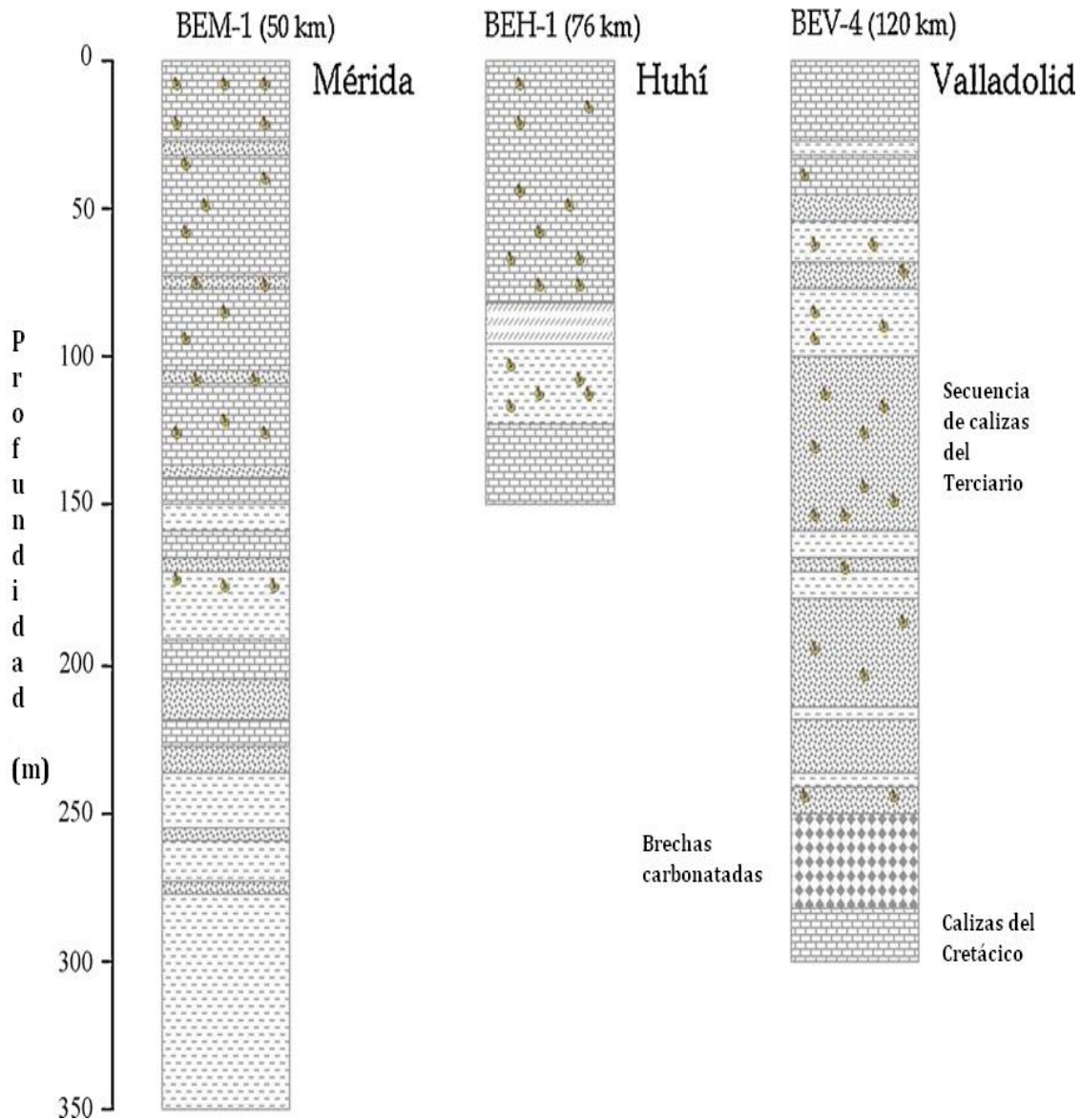


Figura 46. Columnas litológicas de 3 pozos, que describen la sección Este del cráter. Modificado de J. Urrutia-Fucugauchi et al. / C. R. Geoscience 340 (2008) 801-810

En los pozos más lejanos del centro del cráter (zona de terraza) YAX-1 las brechas de se presentan aproximadamente a 800 m y están formadas por una secuencia de 100 m de espesor, compuesta por el basamento y la roca de fusión, ricos en brecha extendiéndose en la parte superior la caliza de Cretácico, formando una zona de terraza con bloques inclinados que delimitan el borde del cráter. (Figura 47).

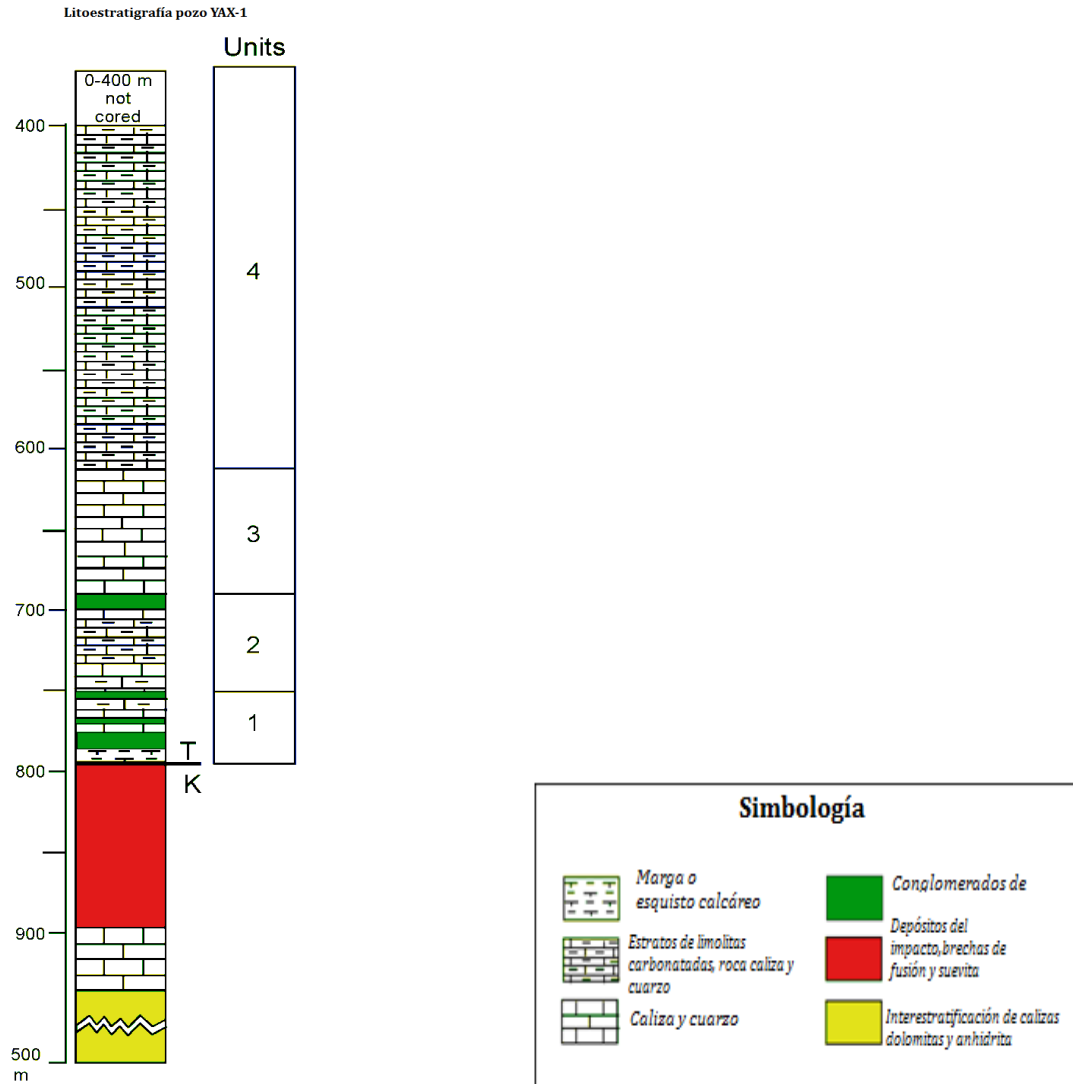


Figura 47. Columna litoestratigráfica del pozo YAX-1. Imagen modificada de J. Urrutia-Fucugauchi / Chicxulub-Drilling Seismic 2010.

Respecto a la brecha carbonatada, no es posible observarla en la columna litológica de los pozos cercanos al centro del cráter C1, S1 y Y6. Desde el análisis de la información de pozo se observa que las brechas carbonatadas están ausentes dentro de la cuenca del cráter. (Figura 48).

Estratigrafía a través de la estructura de impacto Chicxulub (pozos perforados por PEMEX)

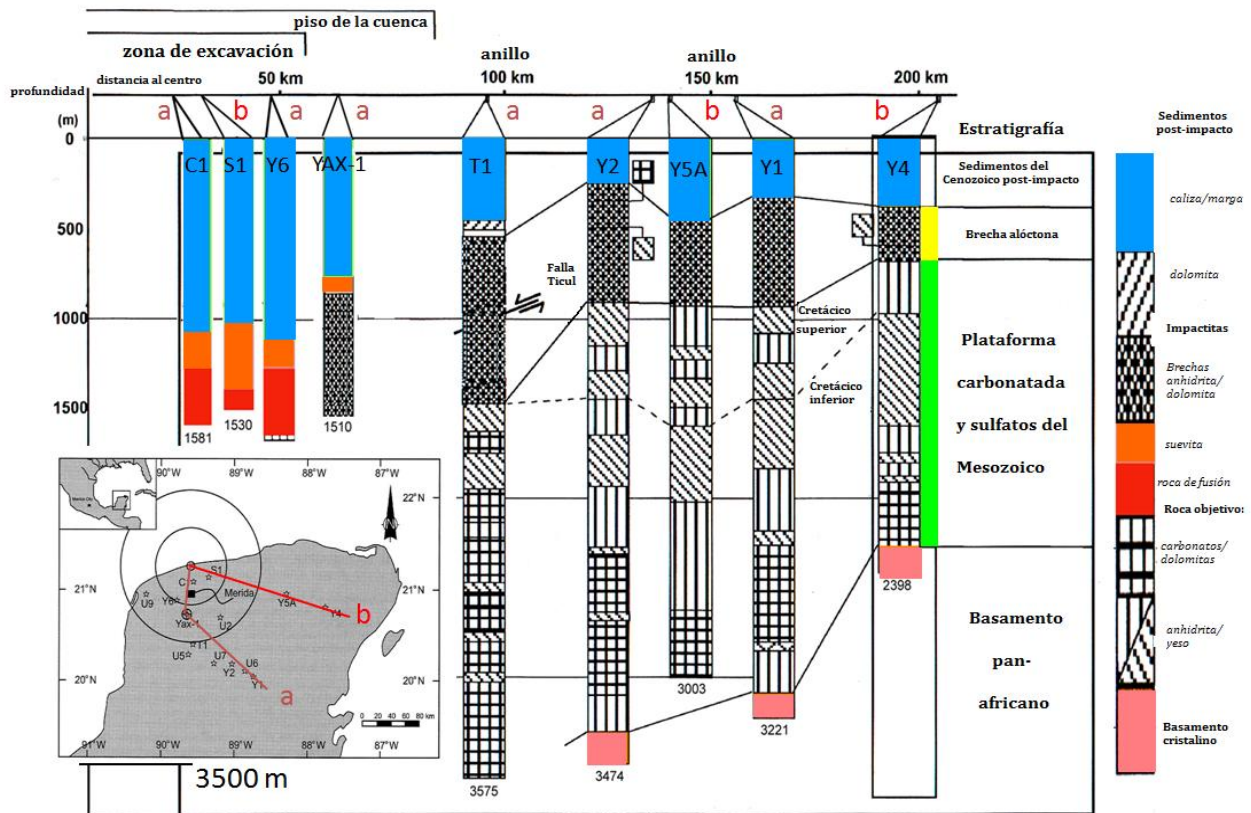
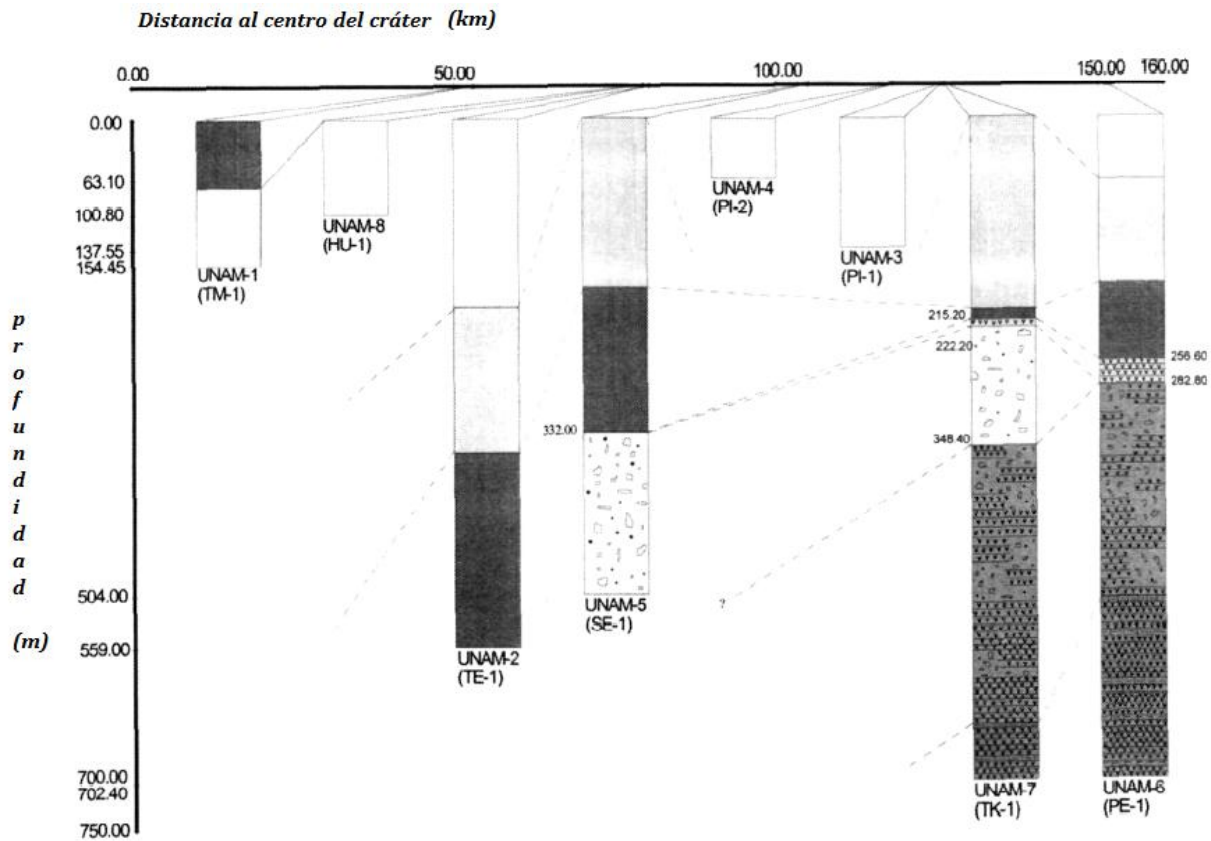


Figura 48. Figura que muestra las columnas litológicas de los pozos perforados por PEMEX. Imagen modificada de J. Urrutia Fucugauchi/ Chicxulub-Drilling Seismic 2010.

A su vez la Universidad Nacional Autónoma de México, organizó el programa científico de perforaciones cuyo fin fue recuperar núcleos continuos de la zona de impacto del cráter Chicxulub. Se perforaron cinco pozos durante 1994 (UNAM-1 a UNAM-5) y tres más en 1995 (UNAM-6 a UNAM-8). El objetivo se fijó en investigar la secuencia carbonatada del Terciario dentro y fuera de la estructura y recuperar las muestras de las brechas de impacto. Las perforaciones UNAM-5, 6 y 7, cruzaron el límite K/T y fueron recuperadas las muestras de las brechas de impacto. (Figura 49).



Litología

- Coquinas y calcarenitas fosilíferas**
- Calcarenitas y calizas arcillosas**
- Caliza cristalina dolomitizada**
- Calizas arcillosas con nódulos silíceos y evaporitas**
- Yeso y anhidrita**
- Brecha polimíctica (con abundantes clastos del basamento)**
- Brecha polimíctica (con abundante yeso y clastos de anhidrita) intercalada con horizontes irregulares de evaporitas**
- Yeso y anhidritas con calizas arcillosas**

Figura 49. Descripción esquemática de la litología y ubicación de los pozos perforados por la UNAM a partir del centro del cráter. Imagen modificada de Rebolledo-Vleyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marín, L., Trejo-García, A., Sharpton, V. and Soler-Arechalde, A (2000) 'UNAM Scientific Shallow-Drilling Program of the Chicxulub Impact Crater', International Geology Review, 42:10,928 — 940

Los datos de pozo con los que se cuenta, fueron tomados de perforaciones terrestres, así que para poder correlacionar la litología con las secciones sísmicas marinas, es necesario proyectar ciertos pozos sobre las líneas de interés.

En la imagen siguiente (figura 50), se observan datos esquematizados de la línea A, con su correspondiente relación litológica y la posición que tienen los pozos respecto a ésta línea.

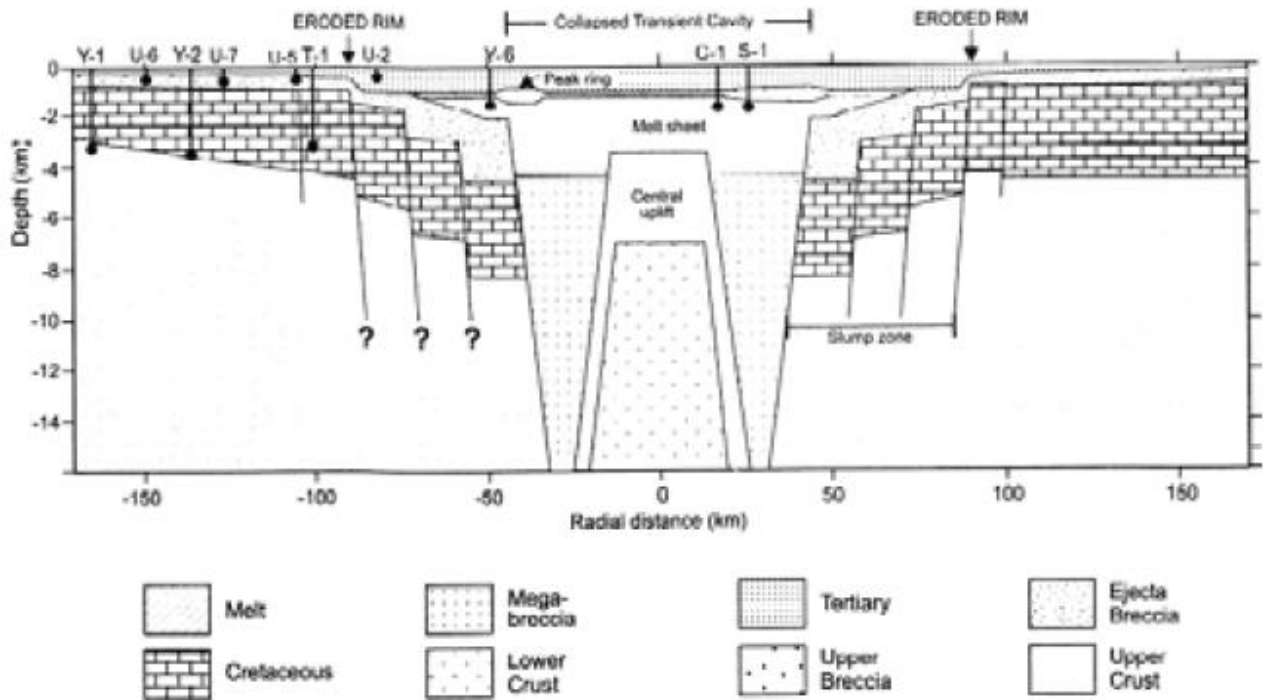


Figura 50. Esquema de una sección transversal que cruza el centro del cráter (línea A), mostrando la litología correspondiente, así como la proyección de varios pozos perforados en tierra. Imagen modificada de Pilkington e Hildebrand 2000).

Los datos marinos de sismica de reflexión obtenidos de Este a Oeste con los que se construyeron perfiles paralelos a la línea de costa muestran que los carbonatos de Terciario están caracterizados por sus reflectores de altas frecuencias, que pueden ser seguidos a través de la cuenca. El sector Este muestra diferentes características en comparación con el sector Oeste, con diferencias en su historia de relleno caracterizadas por geometrías más complejas y paquetes cliniformes.

V. Discusión

La presencia de una estructura dentro de las secuencias carbonatadas en el sector noroeste de la península de Yucatán se infirió a partir de los estudios gravimétricos realizados por Petróleos Mexicanos en las décadas de los 40s y 50s. El programa exploratorio de perforación documentó la ocurrencia de rocas con texturas volcánicas en el sector central de las anomalías gravimétricas y la ausencia de depósitos de hidrocarburos. A partir del análisis de datos de anomalías aeromagnéticas y gravimétricas y los pozos exploratorios, la estructura se interpretó en términos de un posible cráter de carácter volcánico o de impacto de edad Cretácico tardío (Penfield y Camargo, 1981). Los datos fueron posteriormente re-interpretados en términos de un cráter de impacto con edad correspondiente a la frontera Cretácico/Terciario (Hildebrand et al., 1991; Sharpton et al., 1992). En los estudios iniciales se interpretó un diámetro de 180 km para el cráter. El tamaño y morfología de la estructura fueron re-analizados en estudios subsecuentes y se propusieron diámetros en el rango de 170 km a 300 km, con diferentes geometrías y naturaleza de las unidades formando el cráter. Recientemente, con la integración de los datos de geofísica y de los pozos exploratorios la estructura se ha re-interpretado en términos de un cráter complejo multi-anillo con un diámetro de alrededor de 200-240 km. Desde su descubrimiento, no se ha detenido su estudio, en éste capítulo se exponen y discuten los resultados de este trabajo y resultados previos de otros estudios sobre las características estructurales, geométricas, litológicas y origen y formación del cráter. Las líneas sísmicas marinas adquiridas en 1996, se han utilizado (Morgan et al, 1999) para confirmar que el cráter es una cuenca multi-anillo, documentada inicialmente de los datos gravimétricos (Sharpton et al., 1993).

Con datos del pozo Yaxcopoil-1, Vermeesch y Morgan (2008) mejoraron el modelo de la parte central del cráter, proponiendo un modelo de velocidad con el cual infieren diferentes características del cráter:

1. La existencia de la brecha entre la roca del Terciario y la roca de fusión. La brecha posee una velocidad entre 5.8 y 6 km/s.
2. Señalan la posibilidad de un levantamiento central en forma cóncava hacia arriba con velocidad mayor a 6.2 km/s relacionada con roca de fusión.
3. El levantamiento central se angosta conforme la profundidad aumenta.
4. El Peak ring o anillo central, en la parte oeste es una zona de baja velocidad y lo identifican con la zona de megabrecha.

En la opinión de diversos autores, Chicxulub ofrece una única oportunidad para entender la formación de los anillos durante el colapso del material en grandes cráteres de impacto. Morfológicamente Chicxulub parece ser una cuenca multianillo, conteniendo en su estructura dos diferentes anillos externos con escarpes asimétricos opuestos hacia dentro, además de que su topografía interior muestra una estructura de tipo peak ring.

A manera de resumen se puede decir que los principales elementos que se han podido identificar en los perfiles sísmicos de reflexión, son características que incluyen un anillo exterior; una cuenca central cubierta con sedimentos post-impacto del Terciario; una zona de terrazas que forma una frontera con un segundo anillo hacia al centro del cráter y finalmente la estructura en el interior del cráter que se ha definido como un anillo central o peak ring. (Figura 51).

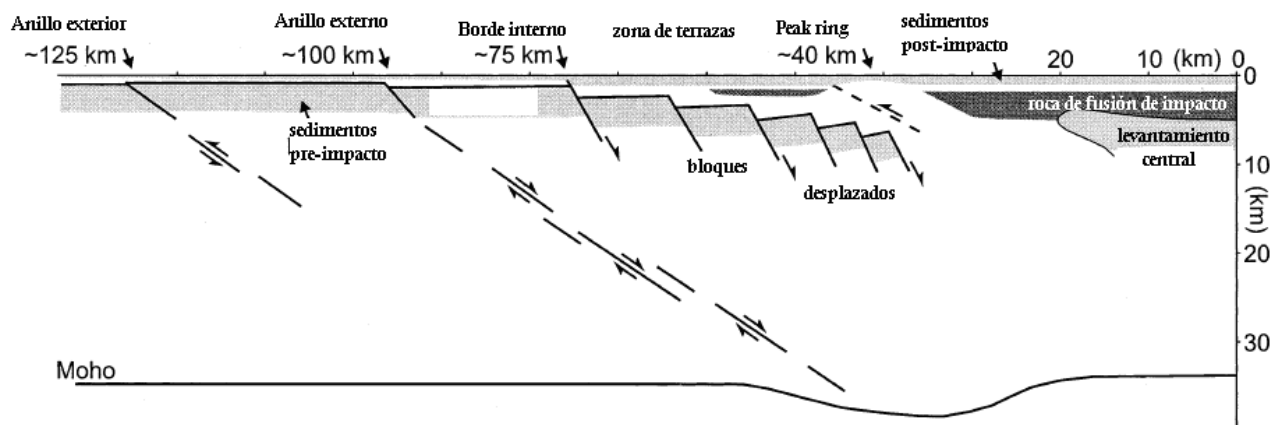


Figura 51. Esquema de una sección cruzada sintetizando los principales elementos, estructuras observadas en los datos sísmicos. Imagen modificada de J.V. Morgan et al. / Earth and Planetary Science Letters 348 183 (2000) 347-354.

A continuación se presenta la interpretación realizada de cada línea, con su descripción correspondiente, así como notas e imágenes de otros autores, en los que se basa éste trabajo. Los pozos se proyectan sólo en el perfil A₀, para mostrar su posición y obtener una relación con la litología.

Cabe señalar que en éste trabajo se hace referencia a un reflector muy marcado dentro de la secuencia del Cretácico, que es continuo por encima de los 2 segundos en doble tiempo de viaje y que se ha marcado con una línea punteada de la siguiente forma [.x.x.x.x.], debido a sus características de alta energía y gran continuidad, lo podríamos considerar como el límite inferior del Cretácico, pero debido a que para el sector Noreste de la Península, no se ha confirmado la existencia de secuencias del Jurásico, no se manejará de esa manera; la discusión al respecto se basa en que para la zona del sur de la península, hacia las Montañas Mayas, Guatemala y Belice, se ha podido

muestrear material sedimentario, como Capas Rojas del Jurásico-Cretácico de la Formación Todos Santos, y sobre estas mismas rocas, los depósitos de material sedimentario y evaporítico de la Formación Cobán [López Ramos 1983], es por esto que la información con la que se cuenta no es concluyente para obtener una columna geológica bien definida entre las partes Norte y Sur de la península y por lo que en nuestra interpretación se consideran todos los reflectores como parte de la columna del Cretácico.

V.1. Línea A₀

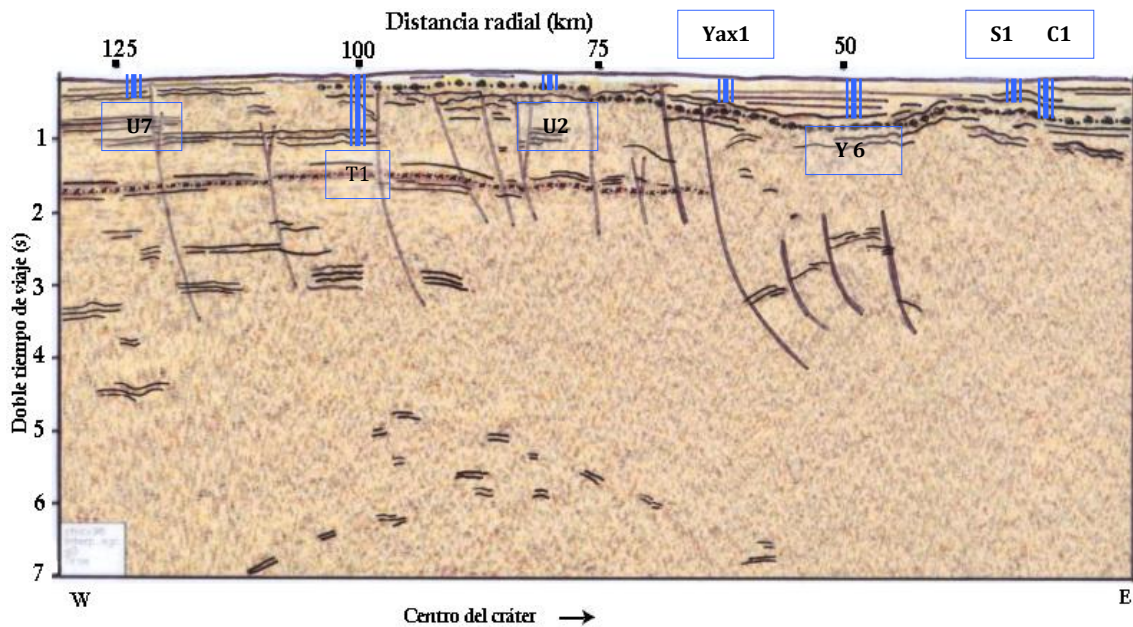


Figura52. Línea A₀ con sus diagramas de línea correspondientes con lo interpretado.

Este perfil (figura 52), se orienta de SW a NE, tiene una longitud aproximada de 160 km, se interpreta el contacto Cretácico-Terciario, gracias a un reflector de alta energía, que se encuentra a menos de 1 segundo en doble tiempo de viaje y que es visible a lo largo de todo el perfil, sobre él se pueden distinguir sin dificultad los depósitos del terciario, por ser paquetes de sedimentos horizontales de baja energía. Coincidente con dicho reflector (contacto Cretácico-Terciario), tenemos el reflector del anillo central (peak ring), debajo del cual se tienen láminas de material fundido.

Se observan fallas asociadas a las estructuras del anillo central (peak ring) aproximadamente a 60Km a partir del centro del cráter y de los anillos: interior 1 y exteriores 2 y 3, ubicados a distancias mayores a los 90 km. Debido a estas fallas, a un radio menor a 60km se encuentran en profundidad los bloques desplazados (slump blocks) que se orientan hacia el centro del cráter y están cubiertos por material del impacto.

Por encima de los 2 segundos en doble tiempo de viaje, encontramos otro reflector de alta energía, dentro del Cretácico, es visible desde el extremo SW hasta el extremo del anillo interior (inner ring) aproximadamente a 60 km del centro del cráter, sufre fallamiento a lo largo de su trayectoria pero es posible distinguir su continuidad, una vez que se acerca al centro del cráter se pierde y sólo se observan algunos segmentos, a partir de los 60km, que caen hasta los 3 segundos, dentro de un área denominada zona de terrazas.

Otros reflectores menos energéticos y sin aparente continuidad se localizan por debajo de los 2 segundos. Por debajo de los 5 segundos aproximadamente, se propone, se encuentra el basamento de la corteza, debido al cambio en la textura y en la disposición de los segmentos de reflectores observados.

Los pozos proyectados sobre la línea, son:

- UNAM 7, a 120 km desde el centro del cráter, este pozo mide aproximadamente 800m de profundidad, corta toda la secuencia Terciaria hasta su límite con el Cretácico superior.
- El T1, cercano a los 100 km, con una profundidad de 3100 m, de él se obtienen datos de los paquetes Terciario y Cretácico, ya casi llega hasta su base.
- Yax 1, cercano a los 60 km, con una profundidad de 1600 m, corta por completo el espesor del Terciario y toca su límite con el Cretácico.
- Y6, cercano a los 50 km, sobre pasa los 1600 m de profundidad. Su posición corresponde a la estructura del peak ring, por lo que hacia lo más profundo se puede encontrar roca fundida del impacto.
- Los pozos S1 y C1 se encuentran entre los 20 y 30 km muy cerca uno del otro, con profundidades que son aproximadas a los 1600 m, siendo el primero más pequeño que el segundo por una diferencia mínima. Situados muy cerca del centro del cráter, poseen datos de toda la columna del Terciario y de la roca de fusión, ya que se encuentran muy próximos a la base del peak ring.

Morgan y otros colaboradores, proponen en 1999 que sobre la línea A₀ se pueden identificar tres criterios para definir a Chicxulub como una cuenca multianillo:

1. Que posee al menos dos anillos visibles como escarpes asimétricos en la topografía de la superficie del cretácico superior.
2. La separación entre los anillos es mayor a la distancia entre terrazas para un cráter de un solo anillo.

3. Los anillos se extienden en una gran porción del cráter.

V.2. Línea A₁

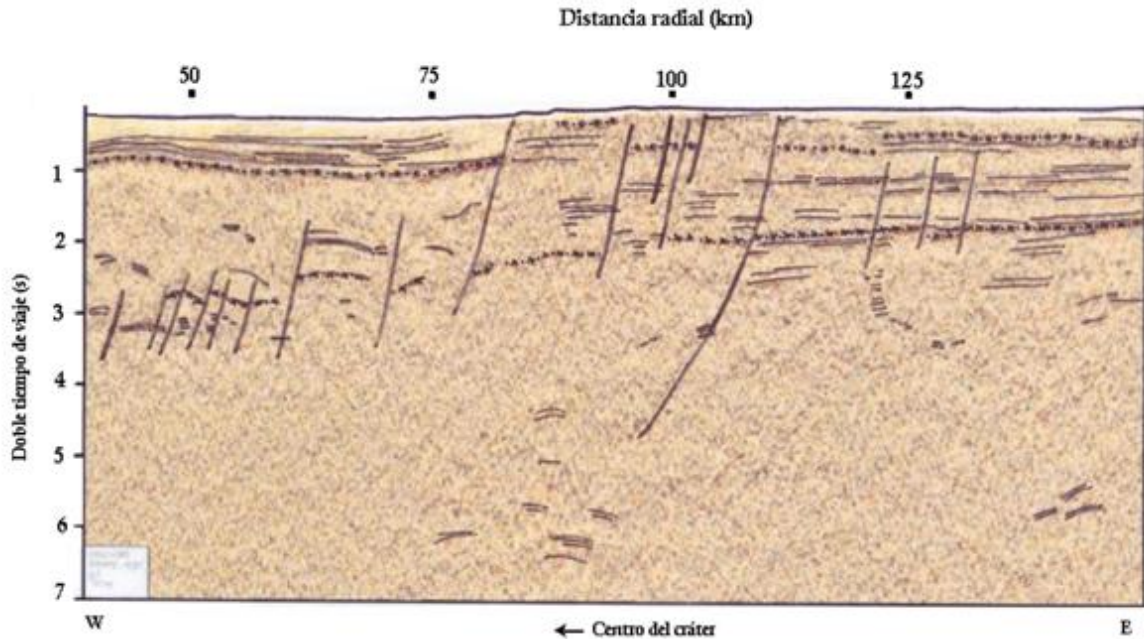


Figura 53. Línea A₁ interpretada con diagramas de línea.

En la figura 53 se muestra el perfil de la línea A₁, orientado SW-NE que se encuentra unido al perfil anterior y tiene una longitud aproximada de 160 km, en él se puede interpretar el contacto Cretácico – Terciario, siguiendo un reflector de alta energía por encima del segundo de viaje, que también se interpretó en la sección A₀, los paquetes horizontales del terciario se encuentran por encima de dicho reflector; a una distancia de aproximadamente 85km a partir de centro del cráter se observa una falla, que rompe su continuidad, volviendo a ser claro hacia el final de la sección cerca de los 150 km a partir del centro del cráter.

En dirección Este-Oeste, es decir, de afuera hacia dentro del cráter, podemos seguir un reflector también de alta energía por encima de los 2 segundos doble tiempo de viaje, que se espera sea el mismo reflector del Cretácico que se ha venido siguiendo lo largo de todas las secciones. Se corta al encontrarse con unas fallas cerca de los 125km pero aún así se puede distinguir sin dificultad, conforme avanza hacia el centro del cráter, pasando los 110km se pierde y solo se puede seguir algunos de sus fragmentos.

Se observa también un sistema de fallas asociadas a las estructuras anulares del cráter. Debajo del Peak Ring o anillo central, se observan una serie de fallas que dan origen a una zona de terrazas caracterizada por tener sus bloques desplazados y

orientados hacia el centro de la estructura y se localizan hasta una distancia aproximada de 80 km. Continuando con las fallas correspondientes al anillo interior 1 o inner ring que comienzan poco antes de lo 100 km y ya para el final de la sección se observan unas pequeñas fallas que definen los anillos exteriores 2 y 3, a distancias aproximadas de 110 y 115 km respectivamente.

Por debajo de los 5 segundos se propone, se encuentre el basamento de la corteza, por el cambio en la textura del material, además de que no se aprecian paquetes de reflectores que indiquen algún evento o marca geológica.

En esta línea Morgan no pudo encontrar un escarpe debajo de la orilla del cráter y propuso una falla a una distancia de 62 km y otra a 128 km partiendo del centro del cráter, pero no tuvo elementos para confirmar que se tratara de los anillos interior y exterior visualizados en la parte Oeste del cráter.

V.3. Línea B

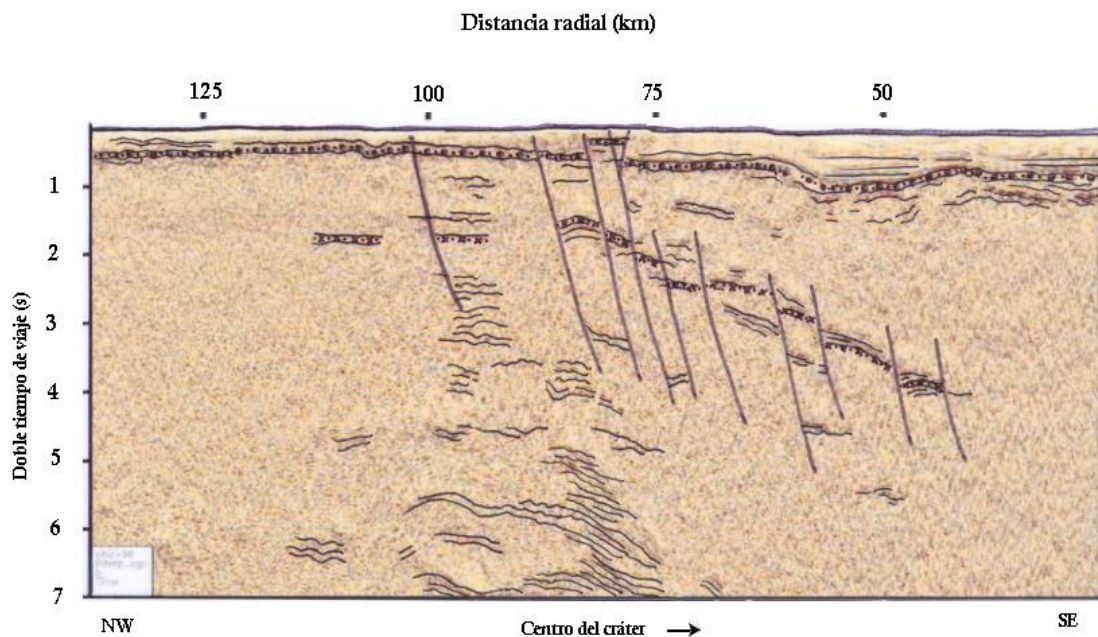


Figura 54. Línea B, interpretada.

Línea sísmica B (figura 54), es radial al centro del cráter, orientada NW-SE, de aproximadamente 120 km de longitud. Muestra a lo largo de todo el perfil el reflector que en las secciones anteriores se ha tomado como el límite Cretácico - Terciario, por ser un reflector de alta energía, que concuerda con el límite del Peak Ring y sobre el cual se observan paquetes de depósitos pertenecientes al Cenozoico de menor energía y por debajo muestra pequeños reflectores que se asocian a un evento de fusión de

material. Analizándolo desde el centro del cráter se observa por encima del segundo de viaje de manera continua, hasta pasar los 75 km, donde sufre fallamiento, además de colocarse por encima del nivel que viene manejando, a pesar del fallamiento es fácil seguirlo hasta el final de la imagen.

En este perfil no se reconoce otro horizonte de gran continuidad y energía, por encima de los 2 segundos, que es donde se encuentra el reflector de alta energía del Cretácico, sólo se observan trozos de reflectores, pero ninguno alcanza la continuidad que se había observado en perfiles anteriores, por lo que es difícil distinguirlo. Entre los 40 y 80 km distancia radial al centro del cráter y los 1.5 y 4 segundos doble tiempo de viaje, se observan una serie de fallas que cortan un reflector de alta energía, que probablemente sea el límite mencionado.

Las fallas marcan los diferentes anillos. Por debajo del Peak Ring, se extienden una serie de bloques desplazados, que caen en dirección del centro del cráter, hasta los 75 km a partir del centro. Otras fallas continúan hacia la parte exterior delimitando en anillo interior 1 o inner ring, que llega a los 100 km aproximadamente y continúan en menor medida hasta los 100 km donde se interpretó el anillo exterior 2. Otros autores proponen que el fallamiento sigue, delimitando otro anillo exterior, el número 3 pasando los 125 km.

Collins et al. (2008), proponen que el comienzo de la zona de terrazas ocurre a diferentes distancias radiales, dependiendo el perfil que se estudie. (Figura 55)

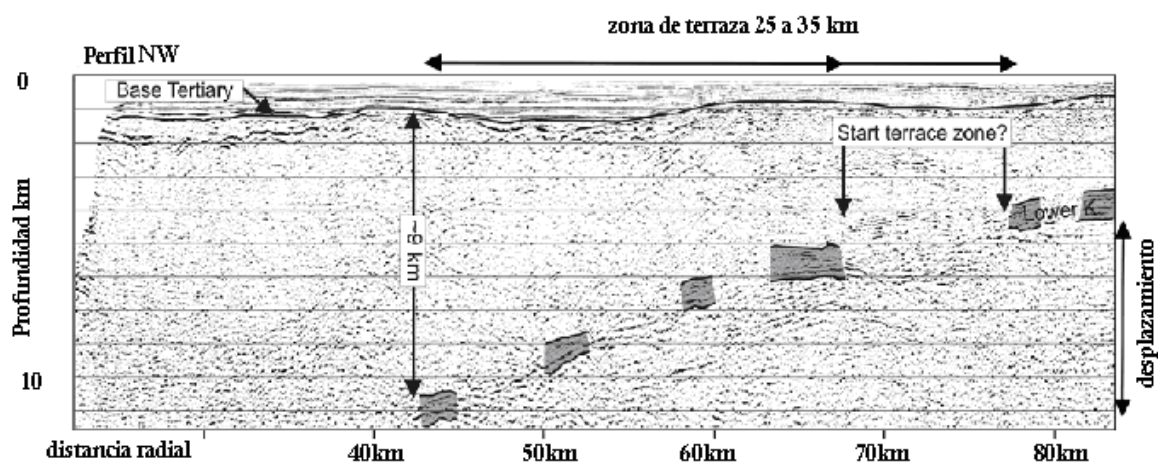


Figura 55. Perfil B, localizado en el cuadrante NW del cráter, donde se muestra la geometría NW de la zona de terraza que se extiende desde los 77 km hasta los 43 km, midiendo desde el centro del cráter. Imagen modificada de Collins et al. / Earth and Planetary Science Letters 270 (2008) 221–230.

Este perfil muestra el largo desplazamiento de aproximadamente 6km sobre una distancia de 25 a 35 km, mostrando también que el reflector más profundo del Cretácico se encuentra 9 km por debajo de la mitad de la base del Peak ring. (Collins et al 2008).

V.4. Línea C

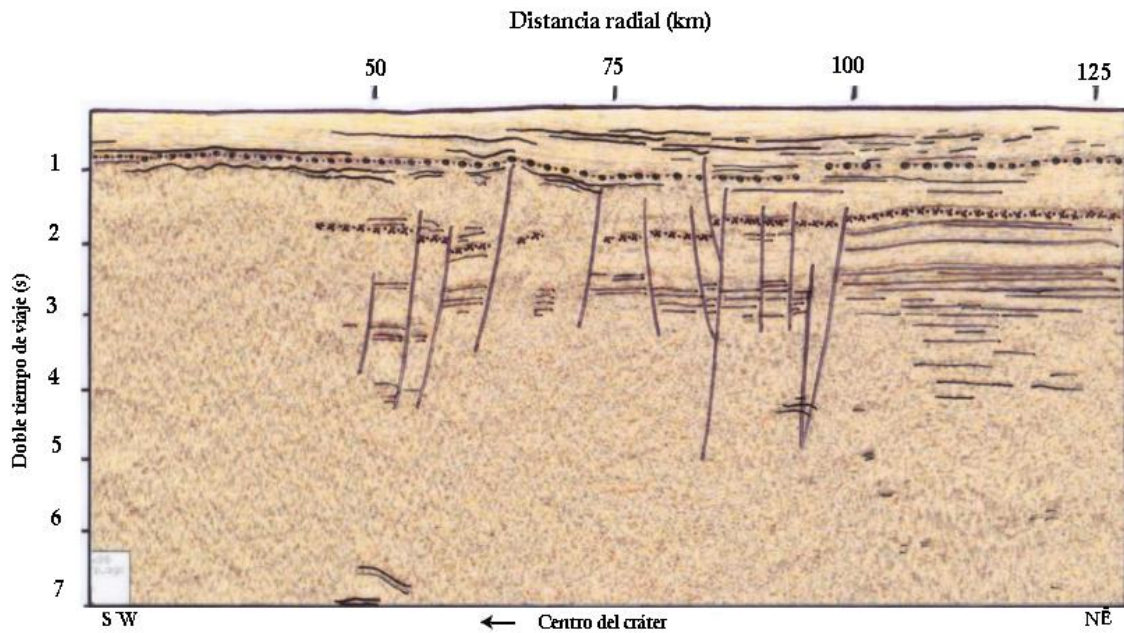


Figura 56. Interpretación de la línea C, imagen en tiempo doble de viaje contra distancia radial al centro del cráter.

Este perfil (figura 56), es en el que se pueden seguir mejor todos los reflectores ya mencionados en las secciones precedentes, la calidad en la continuidad de los reflectores es muy buena. Mide cerca de 130 km y va de SW-NE.

El reflector energético que se ha considerado como el límite Cretácico – Terciario, se puede seguir por toda la sección casi sin interrupciones, ni desviaciones significativas que impidan su reconocimiento, por encima del segundo doble tiempo de viaje, alrededor de los 60 y los 90 km comenzando en el centro del cráter, es afectado por dos fallas, que son las únicas que lo cortan, pero nos sigue resultando de fácil seguimiento; en comparación con lo visto en las secciones pasadas, los paquetes que definen sedimentos del Cenozoico ocupan un espesor mayor y constante a lo largo de todo el perfil, caracterizándose por ser de poca energía y teniendo un depósito horizontal.

Existe otro reflector de alta energía, que también ya se maneja en secciones pasadas dentro del Cretácico, en este caso se encuentra desde el extremo NE hasta los 70 km, es decir, va de afuera hacia adentro de nuestra estructura, se observa por encima de los 2 segundos doble tiempo de viaje, a esta distancia es afectado por una falla y a partir de aquí ya no es posible seguirlo de manera continua, aunque por debajo del peak ring cerca de los 60 km se puede ver afectado por un sistema de fallas.

En esta imagen aparece un nuevo reflector de alta energía que no se había visto en las secciones anteriores, se localiza entre los 2 y 3 segundos doble tiempo de viaje, se puede seguir desde el extremo NE hasta los 65 km dirigiéndose hacia el centro del cráter, donde es cortado por una falla, continúa en fragmentos más pequeños y desaparece cerca de los 50 km.

Las fallas que afectan el perfil, definen los diferentes anillos que caracterizan la estructura del cráter. A partir de los 50 km observamos los bloques que definen la zona de terrazas por debajo del Peak Ring, son fallas normales que buzanan hacia el centro del cráter. Más allá de los 60 km las fallas que dan lugar al inner ring o anillo interior hasta llegar a los 90 km donde definimos los anillos exteriores.

G.S. Collins et al, interpretan el intervalo donde se localiza la zona de terrazas que comienza a los 58 km y termina cerca de los 45 km desde el centro del. Este perfil es localizado en el cuadrante NE del cráter e ilustra uno de los extremos de la geometría de las terrazas. La zona de terrazas, muestra un pequeño desplazamiento de 2km sobre una pequeña distancia de 15km y el reflector visible más interno debajo del cretácico está a solo 6.5 km debajo del borde exterior en la topografía del peak ring. (Figura 57)

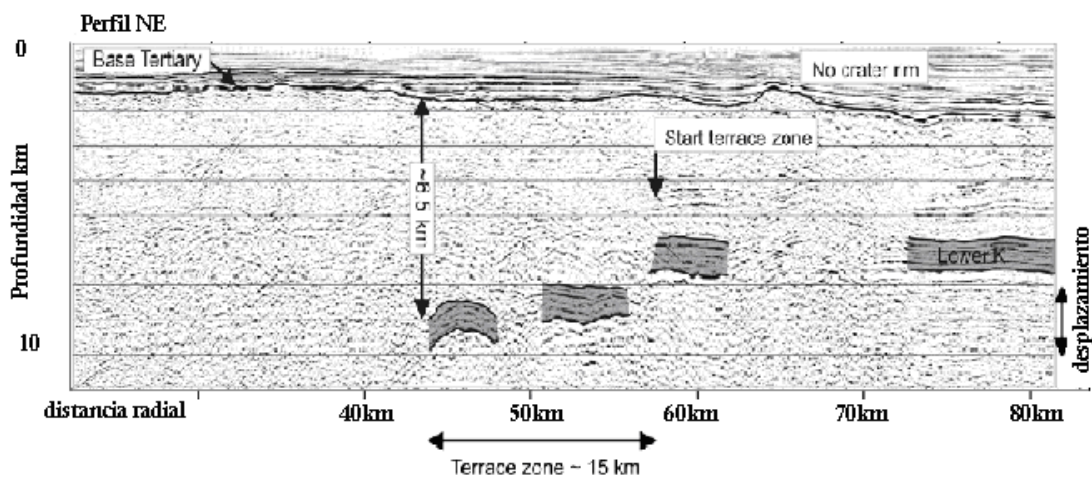


Figura 57. Perfil C, muestra la zona de terrazas de la sección NE del cráter. Imagen modificada de Collins et al. / Earth and Planetary Science Letters 270 (2008) 221–230.

V.5. Línea R₁

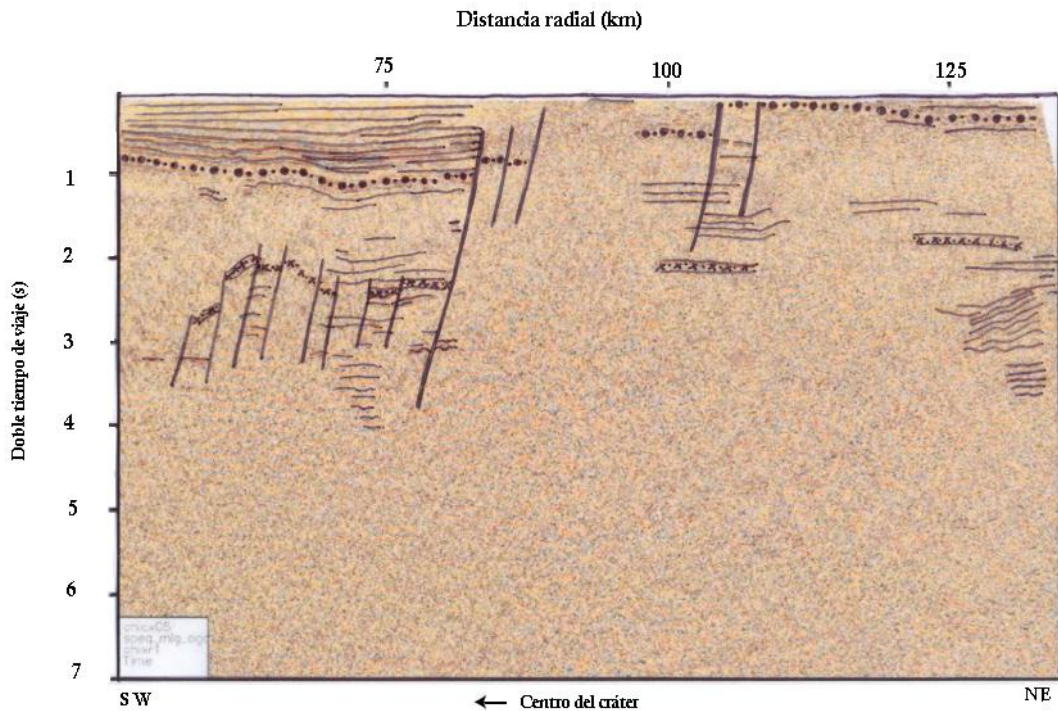


Figura 58. Perfil interpretado de la línea R₁.

La figura 58, muestra el perfil de aproximadamente 75 km de longitud que va en dirección SW – NE, en el que podemos seguir nuestro reflector Cretácico – Terciario, coincidente con la base del Peak Ring, ya que es el de mayor energía dentro de la imagen. Comienza por encima del segundo en doble tiempo de viaje aparentemente, ya que si ponemos atención en la escala de distancia nos podemos dar cuenta de que ya estamos relativamente lejos del centro del cráter, por lo que el reflector continúa por debajo del segundo en tiempo doble de viaje, hasta los 80 km en distancia radial, donde es cortado por una falla, es posible seguirlo hasta el final de la sección, con ligeras dificultades ya que por momentos la textura en el material no permite diferenciarlo. Entre los 100 y 110 km es cortado por diversas fallas, pero es posible seguirlo. Por encima de él encontramos los depósitos del Cenozoico claramente diferenciados por ser paquetes horizontales, aunque en esta sección a diferencia de las otras los reflectores se ven mejor, más continuos y sobre todo el paquete inmediato superior al límite muestra alta energía.

El horizonte de alta energía dentro del Cretácico se observa muy poco, como un reflector no tan intenso como se muestra en las líneas anteriores, además de que es difícil seguirlo ya que no es continuo y en grandes partes no se observa. Los fragmentos que se pueden seguir se encuentran por debajo de los 2 segundos de doble tiempo de viaje y nos ayudan a determinar los bloques desplazados por debajo del Peak Ring.

Las fallas asociadas a la zona de terrazas, se encuentran por debajo del Peak Ring y definen una serie de bloques que se han desplazado desde los 2 segundos hasta por debajo de los 3 segundos y hasta los 80 km de distancia radial al centro del cráter. Después de esta longitud tenemos las fallas que delimitan el anillo interno o inner ring, hasta los 90 km donde también se observan fallas que delimitan el outer ring o anillo exterior, hasta los 110 km.

Fuera ya de la estructura del cráter y de las fallas que lo delimitan, el material se observa homogéneo, a excepción de un área pequeña más allá de los 125 km y por encima de los 3 segundos que se ve como un paquete de reflectores inclinados, que están metidos en secuencias aparentemente horizontales.

V.6. Línea R₃

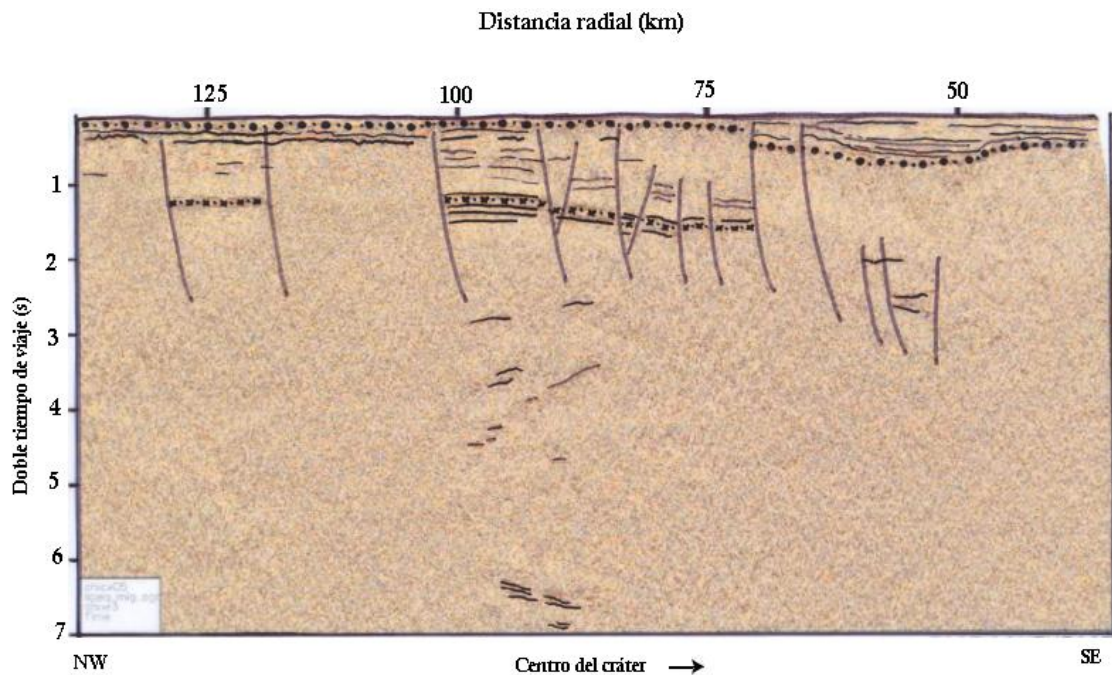


Figura 59. Interpretación de la línea R₃.

Esta línea radial (figura 59) al centro del cráter tiene dirección SE – NW, mide aproximadamente 130 km de longitud. Es posible seguir el reflector que hemos considerado como la frontera entre el Cretácico y el Terciario a lo largo de toda la imagen, ya que es un reflector de alta energía, que se sitúa por encima del segundo en doble tiempo de viaje, como ya mencionamos este reflector también coincide con la base del Peak Ring, alrededor de los 50 km y hasta la parte que tiende al centro del cráter. Tiene cierto comportamiento hasta antes de los 70 km, marca una forma cóncava, sobre la cual se observan depósitos de terciario como paquetes horizontales de reflectores poco energéticos, en ese punto comienza a ser afectado por fallas, pero es fácil seguirlo ya que sigue continuo hasta el final de la imagen pero en una posición cercana a la superficie.

Analizando de NW a SE, es decir, de afuera hacia adentro de la estructura, tenemos al horizonte que hemos seguido dentro del Cretácico por debajo del segundo en doble tiempo de viaje, el cual no es muy continuo, se ve afectado por diferentes fallas a lo largo de todo el perfil y su desplazamiento nos ayuda a definir la zona de terrazas y los diferentes anillos.

Las fallas que se observan en esta imagen delimitan el Peak Ring cerca de los 70 km partiendo del centro del cráter, creando entre 2 y 3 segundos la zona de terrazas,

desplazando los bloques en dirección del centro de la estructura. Hacia los 100 km definen el anillo interno o inner ring y posteriormente los anillos exteriores hasta los 130 km.

La roca que se encuentra por fuera y por debajo de los anillos de fallas se ha interpretado como roca del basamento debido a su textura y a que no se observa ningún reflector que indique actividad geológica.

V.7. Línea R_{6a}

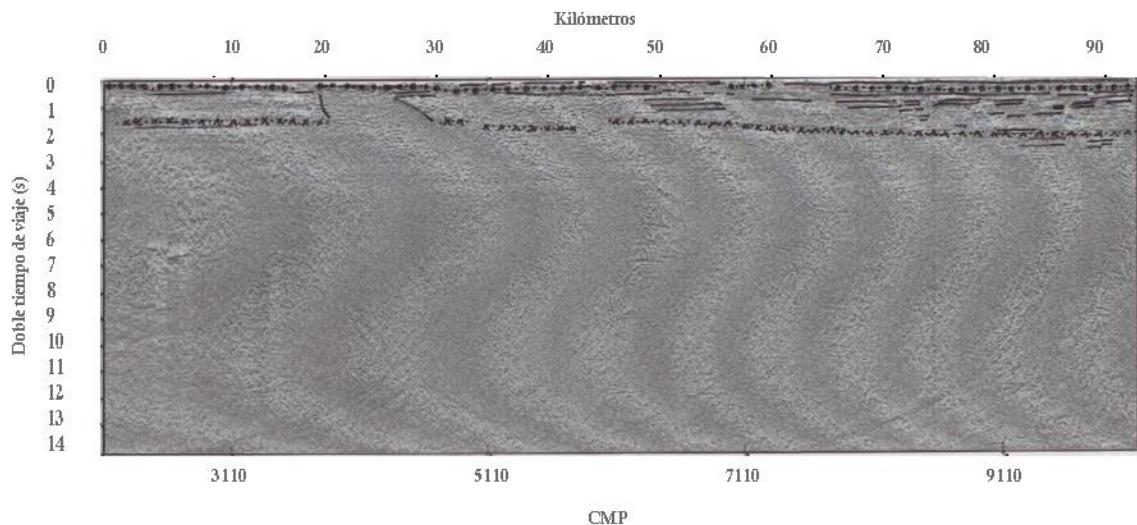


Figura 60. Interpretación del perfil R_{6a}.

El perfil sísmico mostrado en la figura 60, forma parte de un perfil semi-circunferencial de la porción Norte del cráter, fue prospectado a una distancia radial de 120 km respecto al centro del cráter, su longitud es aproximadamente de 90 km. Esta línea comienza en las coordenadas 21°30'N, 90°20'W y se une a la línea R_{6b}.

Se muestra la imagen en segundos doble tiempo de registro contra puntos medios comunes (CMP), y también contra una distancia que es la medida de la circunferencia que dibuja, a diferencia de las secciones anteriores que se marcaban en distancias al centro del cráter, aquí esta consideración no se puede tomar, ya que se supondrá que todos los puntos se encuentran a la misma distancia del centro de la estructura.

Este perfil en asociación con el que se discutirá a continuación, cortan a los perfiles radiales que se vieron con anterioridad, es decir, que en algún punto se cruzan lo que permite una relación entre todas las imágenes y a su vez mejora la calidad de la interpretación, ya que se pueden hacer inferencias sobre lo que se está observando.

En el caso de esta sección, se cruza con las secciones R₃ y B, además de acercarse sin llegar a tocar a la línea A₀. Haciendo una aproximación en distancias de esos puntos de cruce, se dan en la línea R₃ a 70km medidos a partir del centro del cráter y a 10 km de donde comienza la línea R_{6a} y para la línea B a 90 km medidos desde el centro del cráter y a 60 km del inicio de la línea radial, justo antes de que realice un pequeño quiebre en su trayectoria circular. En este punto hay que destacar que esos empalmes reflejan en las secciones radiales la posición del borde del cráter.

Debido a que no cruza el cráter observamos la disposición de los sedimentos, sin las afectaciones de la parte central, como lo son las fallas provocadas por el impacto y el colapso del material, además de que tampoco se aprecian reflectores que se puedan considerar roca de fusión, ni los que fueron afectados por el fallamiento provocando su desplazamiento. Lo que aquí se visualiza son reflectores homogéneos, paquetes de sedimentos horizontales, por lo que es fácil seguir los que hasta ahora hemos resaltado, que son, un reflector del Cretácico que continúan situándose alrededor de los 2 segundos y el límite Cretácico-Terciario muy por encima del segundo de viaje.

Otra peculiaridad en este perfil es una estructura que no se distingue con facilidad, pero da la impresión de ser una intrusión, que corta el reflector base del Cretácico, entre el kilómetro 20 y 30 de la longitud de la línea.

V.8. Línea R_{6b}

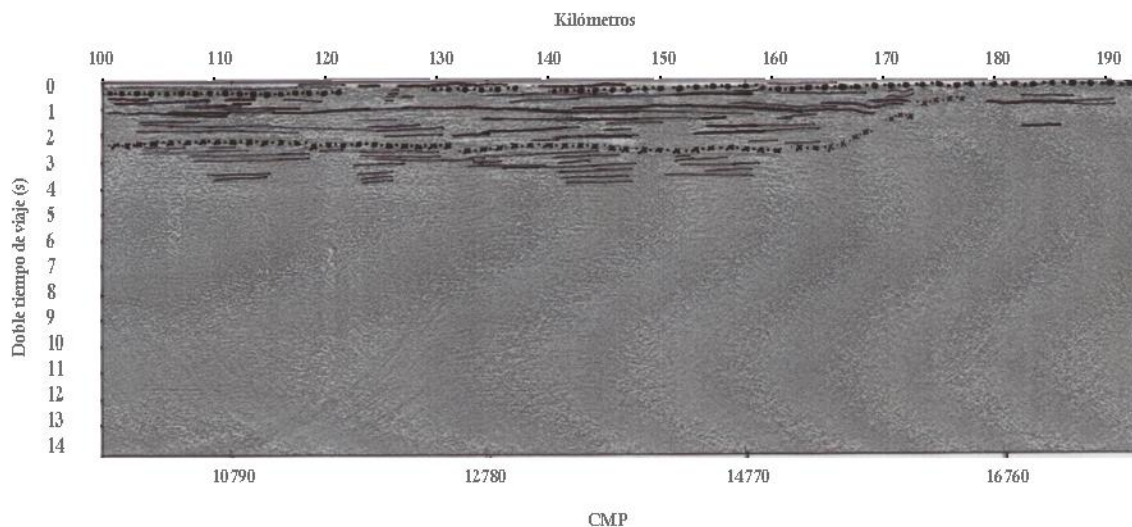


Figura 61. Imagen de la línea interpretada R_{6b}.

La figura 61, muestra la continuación de la línea anterior, este perfil tiene aproximadamente la misma medida (90-100 km) y al ser la prolongación de la línea

R_{6a}, se tiene a 120 km radiales del centro del cráter. Finaliza en la coordenada 21°40'N, 88°50'W.

Esta línea corta a los perfiles radiales C, R₁ y A₁, a distancias aproximadas de 70,80 y 80 km respectivamente sobre dichas líneas en relación con el centro del cráter. Las posiciones de los cruces sobre la línea R_{6b} son 140, 170 y 190 km distancias medidas desde el inicio del perfil radial.

Lo interesante de mencionar estas distancias es que es ahí donde se puede observar en las líneas radiales, el anillo interior 1 y el borde del cráter. Lo que finalmente nos hace pensar que la línea R₆ fue prospectada siguiendo muy de cerca en borde de cráter y el primer anillo interior.

Por su posición no será posible observar la estructura interna del cráter, así como tampoco las fallas asociadas al peak ring ni la zona de terrazas. Es debido a esto que los reflectores son paquetes que siguen horizontales a lo largo de toda la imagen, con excepción del reflector dentro del Cretácico que se acuña unos 30 km antes del final de la sección, desplazando el horizonte casi 2 segundos por encima de la posición que conserva en toda la extensión de la circunferencia.

Finalmente se puede describir la estructura de Chicxulub y decir que el borde para la cuenca post-impacto es producido por la amplitud del escarpe para la zona de terrazas, que se forma por una serie de bloques desplazados que colapsan hacia el interior abajo del piso del cráter.

Si Chicxulub fuese un cráter simple peak ring, entonces esta amplitud de escarpe podría ser equivalente al borde del cráter, sin embargo, principalmente los desplazamientos en el objetivo estratigráfico fuera de la cuenca post impacto revelan un anillo lejano (exterior ring), haciendo a Chicxulub una cuenca multianillo de aproximadamente 200km de diámetro. Este anillo exterior está asociado con reflectores de la corteza que buzcan o se inclinan cerca de 35° hacia el centro del cráter. Estos reflectores conectan los desplazamientos en el pre-impacto observados en la estratigrafía del Cretácico con un borde desplazado en el moho hacia la base de la corteza, sugiriendo que ellos representan la corteza completa fallada.

Acercándonos al centro del cráter, se puede definir la estructura de anillo central o peak ring, se han observado en los diferentes perfiles los reflectores que se inclinan o buzcan hacia el centro del cráter y representan el límite entre dos regímenes de

colapso, con la formación del peak ring como el colapso del levantamiento central y con el colapso interior de la zona de terrazas con los bloques desplazados.

En términos de un fluido dinámico, el peak ring pudo representar una forma de brinco hidráulico donde existe un cambio lateral en la velocidad; en términos geológicos podría representar una pared “colgando” sin forma desde el tope de una rampa.

Debajo del peak ring se observa un pequeño reflector de baja frecuencia correspondiente al material fundido del impacto, que se encuentra por debajo de las secuencias del Terciario.

Nuestra zona de estudio está formada por alto, medio y nulo fallamiento (zona anular interna y externa: inner outer and exterior rings). Además de contrastes de impedancia por 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). [Christeson et al 1992, Britan et al 1992].

Toda la zona que está debajo del cráter y hasta los 4.2 segundos (alrededor de 5.8 km) responde espectralmente con frecuencias altas, medias y bajas; predominando las altas (20 a 31 hertz), asociadas con brecha tipo bunte y roca de fusión (melt). Algunos autores proponen que la brecha está debajo de las depresiones anulares y el anillo central (peak ring), [Kring et al 2004; Brittan et al 1999]. Nuestra propuesta está de acuerdo en que el peak ring oeste está formado por la acumulación de brecha con poca roca de fusión ya que en esta zona se encuentran frecuencias altas (28 a 31 hertz). Mientras al peak ring del lado este está formado, en su mayoría, por fragmentos de roca calcárea (frecuencias de 8 a 19 hertz) y menos brecha tipo bunte con roca de fusión.

Se puede observar que las terrazas no alcanzan a unirse debajo del cráter (truncas por el fallamiento de los reflectores inclinados, “dipping reflectors” resultante del colapso gravitacional del levantamiento central y el rebote de las orillas del cráter transitorio; quedando los extremos como las paredes de una sub-cuenca cuya longitud de la base es de alrededor de 10Km (comprende las distancias radiales de 28Km hasta 38 Km del lado Oeste) y una altura aproximada de 2.5 Km (profundidades de 2.7 km a 5.2 km: aproximadamente 2 a 4 segundos en doble tiempo de viaje). Dicha cuenca subterránea almacena principalmente roca de fusión (Christeson et al 1999) y, conforme la profundidad es menor, comienza a manifestarse diferentes porciones de roca calcárea y brecha de tal forma que las tres unidades terminan por cubrir la parte superior de las terrazas. Suponemos que en la parte central (distancia radial de 25 km) cercana a la brecha tipo suevita, existe mayor cantidad de roca de fusión (melt), mientras que

hacia el Oeste (entre la brecha tipo suevita y las terrazas) se encuentra más brecha tipo bunte que roca de fusión (en la distancia radial del peak ring y la depresión anular). En el otro lado, hacia el Este, se presume encontrar mayor cantidad de roca calcárea debajo de la estructura central, acompañada con brecha tipo bunte. Estas porciones no se mantienen constantes respecto a la distancia ya que debajo de la depresión anular se encontrará mayor cantidad de brecha tipo bunte acompañada con un poco de carbonatos y roca de fusión.

Correlacionando entonces las partes en las que se ha dividido el cráter podemos con la ayuda litológica proporcionada por los pozos describir la composición de cada sección.

- El relleno del cráter es del terciario, se compone de paquetes de sedimentos carbonatados, que tienen procesos de formación distintos.
- El piso del cráter está compuesto de brecha tipo suevita. Esta es una roca de impacto con densidad menor que la roca de fusión, por ello, fue desplazada hacia la parte más superficial. [Salguero Hernández 2008].
- La brecha tipo suevita no se distribuyó homogéneamente en toda la cuenca de impacto. En la parte Este, la unidad concentra mayor volumen que la parte Oeste. Asimismo, entre la distancia 30 y 40 km oeste, se identificó una zona morfológicamente anómala y rica en brecha tipo suevita, encerrada al Oeste por brecha tipo bunte y al este por roca de fusión. Este excedente puede explicar la desproporción en la distribución de la brecha tipo suevita a lo largo de toda la cuenca.
- La secuencia mesozoica presenta un gran acuñamiento en el flanco Oeste, debido a las fallas de los anillos: interno y externos. En comparación con la parte Este, los horizontes sólo fueron altamente fracturados.
- Los datos gravimétricos proponen un levantamiento central desplazado hacia el cuadrante suroeste. [Salguero Hernández 2008]
- Es posible que se encuentren bloques del basamento entre los 5.5 y 7.5 km de profundidad, inmersos en un gran volumen de roca fundida. Lo anterior, exhibe novedosas características al interior del cráter transitorio en dicha profundidad, si comparamos con modelos previamente propuestos.

VI. Conclusiones

El análisis estructural y estratigráfico en ocho perfiles sísmicos marinos de reflexión que se presentan en este trabajo, permite definir las características de la cuenca de impacto Chicxulub e inferir posibles controles estructurales y la estratigrafía de las secuencias carbonatadas y unidades formadas en el impacto. A partir de la interpretación de los datos sísmicos y su correlación con información de pozos, podemos concluir:

El análisis de las secciones permite establecer la posición y continuidad del reflector que marca el límite entre el Cretácico y el Terciario. Este reflector, que presenta topografía variable, permite definir la base del cráter y la geometría de la cuenca para el depósito de los carbonatos del Terciario.

Se identifican las secuencias carbonatadas del Terciario, que presentan reflectores bien definidos y continuidad lateral dentro de la cuenca. Los depósitos forman varios paquetes, correspondientes a cambios en el ambiente de depósito, cambios en el nivel del mar dentro de la cuenca y se observan como paquetes bien definidos, continuos y horizontales.

Se identifica otro reflector de muy alta energía y gran continuidad en la parte profunda fuera del cráter, dentro de la secuencia del Cretácico, gracias al cual es posible definir el fallamiento de la zona por debajo de la base del cráter.

En las secciones, se identificó la continuidad lateral de los reflectores más energéticos y esta información se usó para inferirlos en aquellas partes donde no era fácil su seguimiento.

Las fallas observadas, cortan a los horizontes ya mencionados, lo que nos permite estudiar, la geometría del cráter, sus anillos y sus bordes, así como la estructura central de "peak ring".

En la zona del cráter se observan cuatro niveles aparentes de fracturamiento/fallamiento. El primero fue el provocado al momento del impacto debido a la excavación de la cuenca o cavidad transitoria; el segundo, ocurrió al momento en que se desplomó la columna de eyecta y el levantamiento central, lo que definió la estructura peak ring; el tercero, originó la zona de terrazas por debajo de la estructura central y el último se dió por la compactación diferencial de las brechas al acomodarse se desplazaron hacia profundidad.

Con las imágenes que resultaron de éste trabajo se logra visualizar la forma del cráter y los controles estructurales que afectan las secuencias sedimentarias de la zona y la geometría y características del cráter Chicxulub.

Bibliografía

Bacon, M., Redshaw, T., Simm, R., 2007, 3-d Seismic Interpretation, Cambridge University Press.

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., Torres-Talamante O., 2007. Cenotes en el área Maya. Revista arqueología mexicana, INHA v. XIV, núm., 83

Collins, G. S., Morgan, J., Baeton, P., Christeson G. L., Gulick, S., Urrutia-Fucugauchi, J., Warner, M., Wünnemann, K., 2008. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. Earth and Planetary Science Letters, v. 270, p 221-230.

Del Valle-Toledo, E., 2007. Prospección Sismológica, Apuntes de la materia de Prospección sismológica curso 2007-2, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gulick, S. P. S., Barton, P. J., Christeson, G. L., Morgan, J. V., McDonald, M., Mendoza-Cervantes, K., Pearson, Z. F., Surendra, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Vermeesch, P. M., Warner, M. R., 2008. Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater, Nature Geoscience, v. 1 doi:10.1038/ngeo103

Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo, Z. A., Jacobson, S. B., Boynton, W. V., 1991. Chicxulub crater: A possible Cretaceous/ tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico, Geology, v. 19, p. 867-871.

Mendoza-Cervantes, K., 2007. Mapeo de la Estructura del Anillo Central al Interior del Cráter de Impacto de Chicxulub con Base en Perfiles Sísmicos de Reflexión 2-D, Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mendoza, M., Ortíz-Pérez, M. A., 2000, Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México, investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, núm. 43, p. 7-31.

Morgan, J., Christeson, G., Gulick, S., Grieve, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Barton, P., Rebolledo, M., and Melosh, J., Joint IODP/ICDP scientific drilling of the Chicxulub impact crater, Workshop reports.

Morgan, J., Warner, M., 1999, Morphology of the Chicxulub impact: Peak-ring crater or multi-ring basin?, Geological Society of America Special Papers 1999, 339, p. 281-290.

Morgan, J., Warner, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Rebolledo-Vieyra, M., and Melosh, J., 2005. Chicxulub Crater Seismic Survey Prepares Way for Future Drilling, EOS, Transaction American Geophysical Union, v. 86, no. 36, p. 325-332, 6.

Morgan, J.V., Warner, M.R., Collins, G.S., Melosh, H. J., Christeson, G.L., 2000. Peak ring formation in large impact craters geophysical constrains From Chicxulub. Earth and planetary science letters, v. 183, p.346-354.

Muñoz-Martín, A., 2004, Elementos de prospección sísmica, Universidad Complutense de Madrid - Facultad de Ciencias Geológicas - Departamento: Geodinámica - Programa de Doctorado, Biblioteca virtual J. García-Siñeriz.

Ortiz-Alemán, C., Urrutia-Fucugauchi, L., Rebolledo-Vieyra, M., Soler-Arechalde, A. M., y Delgado-Rodríguez, O., 2002, Investigaciones geofísicas sobre cráteres de impacto y el cráter Chicxulub (Yucatán, México). Instituto de Geofísica UNAM, cuaderno 13.

Padilla-y-Sánchez R.J., 2007. Evolución geológica del Sureste Mexicano desde el Mesozoico al Presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín Sociedad Geológica Mexicana., v. 59, p. 19-42.

Pindell, J. L., 1985. Alleghanian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and Proto-Caribbean. Tectonics, v. 4, p. 1-39.

Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo-García, A., Sharpton, V. and Soler-Arechalde, A. 2000, UNAM Scientific Shallow-Drilling Program of the Chicxulub Impact Crater, International Geology Review, v. 42:10, p. 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, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

Salguero-Hernández, E., Urrutia-Fucugauchi, J., Ramírez-Cruz, L., 2010, Fracturing and deformation in the Chicxulub crater: Complex trace analysis of instantaneous seismic attributes. Revista Mexicana de la Ciencias Geológicas, v. 27, núm. 1, p. 175-184.

Salvador, A., 1991, Origin and development of the Gulf of Mexico Basin, in A. Salvador, ed., The Gulf of Mexico Basin: Geology of North America, v. J, p. 389-444.

Sharpton, V.L., Dalrymple, G.B., Marin, L., Ryder, G., Schuraytz, B.C. Urrutia-Fucugauchi, J., 1992. New Links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, v. 359, p. 819-821.

Sheriff, R.E, 1980. Seismic stratigraphy. International human resources Development Corporation,

Urrutia-Fucugauchi, J., Chávez-Aguirre, J. M., Pérez-Cruz, L., De la Rosa, J. L., 2008, Impact ejecta and carbonate sequence in the Eastern sector of the Chicxulub crater, *C. R. Geoscience*, v. 340, p. 801-810.

Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Rebolledo, M., and Grieve, R., 2008, Future integrates ICDP-IODP of the Chicxulub impact crater: scientific targets, *Geophysical Research Abstracts*, v. 10.

Urrutia-Fucugauchi, L., Pérez-Cruz, L., 2009, Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces, *International Geology Review*, v. 51:12, p. 1079-1102.

Vail, P.R., Andemard, F., Balman, S.A., Eisner, P.N., Perez-Cruz, G., 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.). *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer, Berlin, pp. 617–659.

Wittmann, A., Kenkmann, T., Hecht, L. and Stöffler, D., 2007, Reconstruction of the Chicxulub ejecta plume From its deposits in drill core Yaxcopoil-1, *Geological Society of America Bulletin*, v. 119, p. 1151-1167.

Yilmaz Özdoğan, *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.

Portal de internet del Institute for Geophysics at the Jackson School of Geosciences of The University of Texas at Austin, Marine Geoscience Data System.