



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMÁN  
CIENCIAS DE LA TIERRA**



**“MODELADO DE LA ESTRUCTURA DEL CRÁTER DE  
CHICXULUB A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS  
GRAVIMÉTRICOS Y SÍSMICA DE REFLEXIÓN”**

**QUE PRESENTAN:**

**JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ**

**JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**ASESORES**

**ING. EFRÉN MURILLO CRUZ**

**DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI**

**MEXICO D. F.**

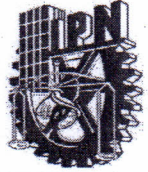
**MAYO 2014**

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMAN



"2014 Año de Octavio Paz"  
"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"  
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"  
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"  
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"  
"50 Aniversario del CECyT Cuauhtémoc"

México, D. F., a 8 de mayo de 2014.

No. de Oficio: E.P. y T. 134.2014

ASUNTO: SE COMUNICA TEMA  
DE TESIS PROFESIONAL

**C. JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ**  
**PASANTE DE LA CARRERA DE**  
**INGENIERÍA GEOFÍSICA**  
**P R E S E N T E**

A continuación comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**"MODELADO DE LA ESTRUCTURA DEL CRATER DE CHICXULUB A PARTIR DE LA  
INTEGRACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS Y SÍSMICA DE REFLEXIÓN"**

**CONTENIDO**

	RESUMEN
	ABSTRACT
	INTRODUCCIÓN
	OBJETIVOS
I.	INTRODUCCIÓN
II.	ÁREA DE ESTUDIO
III.	MARCO TEÓRICO
IV.	GRAVIMETRÍA CHICXULUB
V.	SÍSMICA CHICXULUB
VI.	INTEGRACIÓN
VII.	MODELADO
	DISCUSIÓN
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA



UNIDAD TICOMAN  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Este tema lo desarrollará en conjunto con el **C. JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA**

Atentamente  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

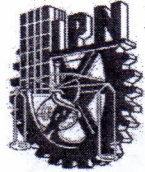
EPF\*mdv.

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMAN



"2014 Año de Octavio Paz"  
"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"  
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"  
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"  
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"  
"50 Aniversario del CECyT Cuauhtémoc"

México, D. F., a 8 de mayo de 2014.

No. de Oficio: E.P. y T. 135.2014

ASUNTO: SE COMUNICA TEMA  
DE TESIS PROFESIONAL

**C. JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA**  
**PASANTE DE LA CARRERA DE**  
**INGENIERÍA GEOFÍSICA**  
**P R E S E N T E**

A continuación comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**“MODELADO DE LA ESTRUCTURA DEL CRATER DE CHICXULUB A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS Y SÍSMICA DE REFLEXIÓN”**

**CONTENIDO**

	RESUMEN
	ABSTRACT
	INTRODUCCIÓN
	OBJETIVOS
I.	INTRODUCCIÓN
II.	ÁREA DE ESTUDIO
III.	MARCO TEÓRICO
IV.	GRAVIMETRÍA CHICXULUB
V.	SÍSMICA CHICXULUB
VI.	INTEGRACIÓN
VII.	MODELADO
	DISCUSIÓN
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFÍA



UNIDAD TICOMAN  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

Este tema lo desarrollará en conjunto con el C. **JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ**

Atentamente  
“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EPF\*mdv.

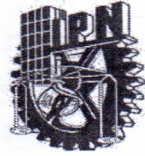


SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMAN



"90 Aniversario del CECyT 1 Gonzalo Vázquez Vela",  
"80 Aniversario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas",  
"70 Aniversario de la escuela Superior de Medicina", y  
"55 Aniversario de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos"

México D. F., a 9 de mayo de 2014.

**M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional por la opción de **Tesis Colectiva**, "**Modelado de la Estructura del Cráter de Chicxulub a Partir de la Integración de Datos Gravimétricos y Sísmica de Reflexión**", presentada por los pasantes de la carrera de **Ingeniería Geofísica** CC. **JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ** y **JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

**TITULARES**

  
M. en C. LEOBARDO SALAZAR PEÑA

  
ING. GABRIELA DE LOS SANTOS CANO

  
ING. EFRÉN MURILLO CRUZ

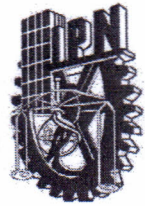
  
ING. ROBERTO LOO GUZMÁN

  
ING. IRAÍS MARÍA LIZETTE ORTÍZ PRIETO





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMAN



"90 Aniversario del CECyT 1 Gonzalo Vázquez Vela",  
"80 Aniversario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas",  
"70 Aniversario de la Escuela Superior de Medicina", y  
"55 Aniversario de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos"

México, D. F., a 29 de abril de 2014

No. de Oficio: E. P. y T. 130.2014

ASUNTO: SE SOLICITA TEMA  
DE TESIS Y ASESORIA

**ING. EFRÉN MURILLO CRUZ  
P R E S E N T E.**

En atención a la solicitud de los CC. **JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA y JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ**, pasantes de la Carrera de **Ingeniería Geofísica**, y en base al Reglamento de Titulación Profesional del I. P. N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso II, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la **Tesis Colectiva** de los pasantes mencionados. Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por los interesados.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

Atentamente  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



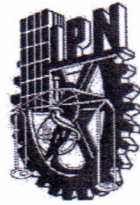
UNIDAD TICOMAN  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

C.c.p.- Ing. Gabriela de los Santos Cano.- Jefa del Departamento de Innovación Educativa.  
Interesados  
Expediente.

EPF\*mdv



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
UNIDAD TICOMAN



"90 Aniversario del CECyT 1 Gonzalo Vázquez Vela",  
"80 Aniversario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas",  
"70 Aniversario de la Escuela Superior de Medicina", y  
"55 Aniversario de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos"

México D. F., a 7 de mayo de 2014.

No. de Oficio: E. P. y T.131.2014.

ASUNTO: Se solicita tema de  
Tesis y Asesoría.

**DR. JAIME HUMBERTO URRUTIA FUCUGAUCHI**  
**INVESTIGADOR TITULAR C**  
**INSTITUTO DE GEOFÍSICA**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**P R E S E N T E.**

En atención a la solicitud de los CC. **JORGE ALFREDO VELASCO ACOSTA** y **JESÚS ANTONIO CHICO HERNÁNDEZ**, pasantes de la carrera de **Ingeniería Geofísica**, y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional, que por la opción de **Tesis Colectiva**, deberán desarrollar los interesados. Por lo que solicito a usted se sirva proponer a esta Subdirección el tema y contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo y la seguridad de mi más distinguida consideración.

Atentamente  
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

  
M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EPF\*mdv



**UNIDAD TICOMAN**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

# Índice

## Abstract

Resumen	5
I. Introducción	6
II. Área de estudios	8
II.1 Plataforma carbonatada de Yucatán	8
II.2 Características geológicas	10
II.3 Geología histórica	14
II.4 Tectónica regional	19
II.5 Bloque de Yucatán	21
III. Marco teórico	22
III.1 Gravimetría	22
III.2 Sísmica	28
IV. Gravimetría Chicxulub	30
V. Sísmica Chicxulub	35
VI. Integración	53
VII. Modelo final	83
Discusión	88
Conclusiones	89
Bibliografía	91
Anexos	93



# AGRADECIMIENTOS

*Al doctor Jaime Urrutia Fucugauchi por ser un excelente asesor, brindarnos su tiempo que es muy valioso y permitirnos trabajar con él ya que nos permitió aprender mucho más de lo estudiado en el proyecto.*

*Al Ingeniero Efrén Murillo por tener el tiempo, disposición para realizar observaciones y sugerencias para la realización de este proyecto.*

*A mis padres Ricardo Chico Rodríguez y Laura Hernández Ceja, que me han dado todo su apoyo a través de todo este largo camino y no rendirse a pesar de mis tropiezos.*

*A mis padres Adela y Primo por estar conmigo y apoyar mis decisiones durante todo este tiempo.*

*A la Esia ticoman por la formación y vivencias que nos acontecieron durante nuestra estadía.*





## **Abstract**

The impact crater of Chicxulub, located in the Yucatan peninsula, has been studied over the years with almost all the determinant geophysical methods, such as gravimetric, and magnetic methods, among others, there's even been core recovery perforations, since this crater is the biggest and most preserved on earth, and it made a major change in earth's life evolution.

This geophysical integration work achieved its goal in generating a model using the gravimetric and seismic data available, and adequate usage of a series of specialized software, such as: Petrel, Oasis montaj, Surfer and Voxler, which allowed us to integrate the data and make an interpretation, the result, a 4 dimension model( $X, Y, Z, \rho$ ), this provides a better understanding of the structure of this complex crater and the lithological rock sequences according to depth.

Seismic interpretations were made from 5 seismic lines, applying filters to achieve the best visualization of the crater's structure, and gravimetric lines over the seismic lines, interpreted with vertical and horizontal gradients, were used to integrate the data.

Once the structural interpretation was achieved, the morphology of the basin's base was observed, it is given by the impact effect which forms the crater, wrapping the craters geometry. Below the crater's basin, seismic attributes of carbonated breccias materials appear, this is a byproduct of the materials rupture at the impact time, the material settled in a chaotic fashion and this is the reason why the fault zone and fractures are dominant in this zone, shown by the gravimetric effects, and shallow reflections of the cretaceous shown in the seismic data.

## RESUMEN

El cráter de impacto del Chicxulub ubicado en la península de Yucatán se ha estudiado a través de los años con prácticamente todos los métodos geofísicos más determinantes tales como gravimetría, magnetometría, entre otros, inclusive se han realizado perforaciones de recuperación de núcleos ya que es el cráter de impacto más grande y mejor preservado en la Tierra y este marcó un cambio mayor en la evolución de la vida.

Este trabajo de integración geofísica, logro su cometido en generar un modelo tras el uso de la información gravimétrica y sísmica existente y el manejo adecuado de una serie de software especializado, tales como: Petrel, Oasis montaj, Surfer y Voxler, que nos permitieron la integración de datos e interpretación hasta llegar a un modelo de 4 dimensiones  $(X, Y, Z, \rho)$  que a su vez proporciona un mejor entendimiento de la estructura de este cráter complejo (peak ring multianillo) y las secuencias litológicas en función de la profundidad.

Se hicieron interpretaciones sísmicas aplicando filtros para obtener mejores capacidades de visualización de la estructura del cráter de cinco secciones sísmicas y los perfiles gravimétricos se tomaron sobre las líneas sísmicas para poder hacer la integración en conjunto con los criterios de interpretación gravimétrica que fueron los gradientes horizontales y verticales.

Una vez que se obtuvo la interpretación estructural, en el que se logró observar la morfología de la base de la cuenca, que está controlada por el efecto del impacto que forma el cráter, delimitando la geometría del cráter. Por debajo de la base del cráter se muestran características sísmicas de materiales de brecha carbonatada, que es producto de la ruptura del material al momento del impacto, dicho material se depositó de forma caótica, y esta es la razón porque la zona de fallas y las fracturas son dominantes en esta zona como lo muestran los efectos gravimétricos y someramente la visualización de los reflectores del cretácico que se muestran en la sísmica.

## I.- INTRODUCCIÓN

En los 80, un equipo de investigadores dirigido por Luis Álvarez propuso una teoría para explicar las extinciones masivas de organismos y cambios que marcan la frontera Cretácico/Paleógeno (K/Pg) Los científicos se preguntaban ¿Qué les había pasado a los dinosaurios?, ¿por qué desaparecieron de la faz de la Tierra, cuando eran una de las especies que dominaron los ecosistemas terrestres del planeta por más de 250 millones de años? Álvarez y colaboradores (1980) propusieron que cambios ambientales y climáticos globales se pudieron originar por el choque de un asteroide o cometa con la Tierra, a partir de evidencias geoquímicas como la presencia de cantidades anómalas de iridio en diversas localidades del planeta. El iridio es un elemento raro de encontrar en la corteza terrestre, pero abundante en los meteoritos; además advertían que dada la extensión de los depósitos de iridio localizados, debió ser de grandes dimensiones el cuerpo del que provenían, del orden de 10-14 km de diámetro.

Cuando se publicó la propuesta en la década de los ochenta, fue controversial porque era difícil que un asteroide que impactase la Tierra pudiera causar esta devastación global. Ellos tenían evidencias geoquímicas: el iridio; pero no habían localizado la huella que debía haber dejado el impacto: el cráter, y tomó diez años descubrirlo.

Ingenieros de PEMEX, buscando petróleo localizaron el cráter en la península y las aguas marinas cercanas a Yucatán: Durante una conferencia, Penfield y Camargo (1981) explicaron que habían encontrado el sitio de impacto de un asteroide, un cráter de impacto, e hicieron la correlación con la extinción de los dinosaurios y el trabajo de Álvarez y colaboradores.

En 1991, al analizar la UNAM, la Universidad de Arizona y el Instituto de Ciencias Planetarias y Lunar muestras de pozos hechos por PEMEX se confirmó la teoría de una estructura de impacto, con una edad de unos 66 millones de años (Hildebrand et al., 1991; Sharpton et al., 1992).



En los siguientes años se realizaron nuevos estudios de exploración geofísica, geoquímica y petrografía de las litologías de impacto y otros trabajos, que aportaron nuevas evidencias sobre el origen del cráter y las características estructurales, tamaño y morfología. Los modelados de anomalías gravimétricas y análisis de perfiles sísmicos mostraron que la estructura correspondía a un cráter complejo del tipo multianillo, con un diámetro del orden de 180-200 km o mayor (Sharpton et al., 1993). El siguiente programa de estudio del cráter fue el programa de perforaciones, realizado entre 1994 y 1995. Se perforaron 8 pozos con recuperación continua de núcleos, lo que permitió caracterizar las secuencias de impacto y las rocas carbonatadas pre y post-impacto (Urrutia Fucugauchi et al., 1996).

Se encontró un semicírculo de cenotes en la Península de Yucatán. El anillo de cenotes que rodea el cráter es la única huella visible en la superficie de la Tierra que existe hoy día, porque el cráter está enterrado”.

El caso de Chicxulub ha cambiado la mentalidad científica del mundo, ahora grupos de especialistas buscan cráteres similares en tamaño, de 200 kilómetros, que se puedan enlazar con otras extinciones masivas que han ocurrido en la historia del planeta.

Ahora sabemos que hay casi 200 cráteres de impacto en todo el mundo, causados por asteroides o cometas. Pero muy pocos son del tamaño del de Chicxulub, unos cuatro, cinco. Podemos contarlos con los dedos de la mano.

Además, Chicxulub ha reequilibrado mentalmente a la comunidad científica sobre cómo observar y estudiar la evolución de la Tierra y de otros planetas, porque lo aprendido lo estamos aplicando a Marte, a Venus, e incluso está ayudando a evolucionar los objetivos científicos de misiones espaciales de la NASA.

El objetivo de ésta tesis es a partir del análisis y modelado de datos sísmicos marinos de reflexión y datos gravimétricos e investigar la estructura del cráter.

Para lograrlo es necesario:

- Realizar una interpretación por separado de la sísmica y la gravimetría, para después integrarlos en un modelo.
- Generar modelos tridimensionales en un software especializado, que nos permite interpolar los espacios entre los perfiles.
- Definir la estructura de la cuenca de impacto y los posibles controles estructurales en el depósito de carbonatos del Terciario.

## **II.- ÁREA DE ESTUDIO**

### **II.1. Plataforma Carbonatada de Yucatán**

#### LOCALIZACIÓN

La plataforma carbonatada de Yucatán se localiza en el sector sur del Golfo de México y la parte emergida constituye la península de Yucatán. La plataforma tiene una amplia extensión y ha constituido un elemento tectónicamente estable durante buena parte del Mesozoico y Cenozoico, a partir de la apertura en el Jurásico Medio y la formación del Golfo de México.

El área de estudio se encuentra entre los paralelos 16° a 22° longitud norte y 86° a 91° longitud W del meridiano de Greenwich, con una superficie de 300,000  $km^2$ . (Figura 1).

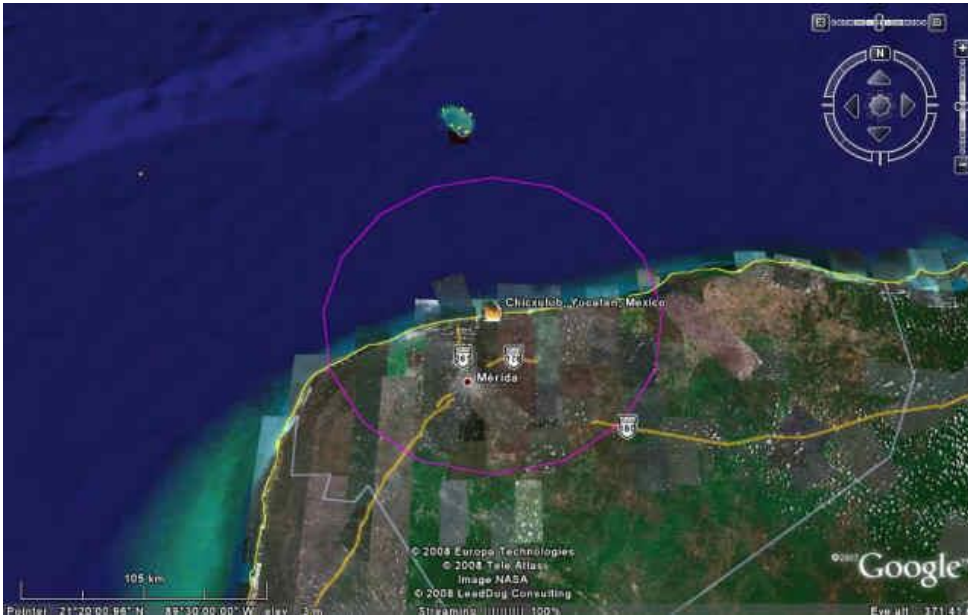


Figura 1. Localización del cráter Chicxulub en la plataforma y península de Yucatán (Google Earth 2010)

Los límites geomorfológicos de la península de Yucatán se encuentran en el norte y parte noroeste del talud continental del Banco de Campeche, al sur incluye el Petén de Guatemala y las montañas Mayas en Belice, al oriente por el talud continental del mar del Caribe, ya que la plataforma continental es muy angosta, al oeste la planicie costera del Golfo de México, al SE del estado de Campeche y oriente del estado de Tabasco. La región estudiada en el extremo oriental de la República Mexicana, consiste en una plataforma con potentes estratos constituida por rocas carbonatadas, donde en la superficie es reconocida como secuencia que va desde el Paleógeno hasta el Cuaternario.

La topografía tiene poco contraste en altitud, carece de una red fluvial. El escurrimiento es casi totalmente subterráneo, lo que ha dado origen a un gran sistema de formas kársticas en las que se incluyen a los cenotes y sistemas de cuevas con cientos de metros de profundidad y decenas de kilómetros de longitud. (Figura 2)



Figura 2. Imagen de satélite de la península de Yucatán, sur del golfo de México y Caribe, en que se puede apreciar los rasgos morfológicos en la península de Yucatán, sur de México y Centroamérica.

## II.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La provincia está limitada por el litoral del Golfo de México, tiene una anchura media de 350 km y una longitud de 500 km. De esta área limitada, tres cuartas partes pertenecen a México, una octava parte a Guatemala y otra más a Belice. Sus características son diferentes a las del resto del país, tanto en la uniformidad de su superficie como a las persistentes formaciones kársticas que le cubren y a la total ausencia de corrientes de aguas superficiales. Está considerada, la península de Yucatán, como una gran plataforma calcárea caracterizada por tener rocas de edad cenozoica y también por estar compuesta de sedimentos marinos calcáreos, depositados en un ambiente de plataforma de margen pasiva. (Figura. 3)



Figura 3. Límites de la plataforma de Yucatán

La superficie es bastante plana, con una suave e imperceptible inclinación de sur a norte. No hay elevaciones de importancia, sólo está una pequeña cadena de 100 km de largo y 5 km de ancho con 100 m de elevación máxima, que se extiende de Sahcabá y Muna a Ticul y Tul, que se le conoce con el nombre de Sierrita de Ticul, que se encuentra en la parte sur del Estado de Yucatán con rumbo  $N55^{\circ}W$ , estos rasgos fisiográficos resultaron de un fallamiento normal y sus elevaciones máximas son de 100 a 150 metros. Así mismo, la península se le pueden reconocer cuatro regiones fisiográficas (Weidie, 1985), en donde todas sus rocas aflorantes en la superficie son carbonatos, en las que se presenta una gran variedad de rasgos kársticos que están muy relacionados con la elevación de la región y la profundidad del nivel freático, formando así las regiones fisiográficas: (Fig. 4)



Figura 4. Geología simplificada de los carbonatos de la península de Yucatán. Se muestran las secuencias de depósitos carbonatados más jóvenes (Weidie, 1985)

**a.- Cenotes kársticos (Planicie del Norte),** Esta planicie se encuentra al norte y noreste de la Sierrita de Ticul, extendiéndose hasta la línea de costa del Golfo de México y el Caribe, con 250 km desde el área de Peto hasta Cabo Catoche al noreste y un mínimo de 50 km desde Mexcanú hasta Celestúm al noreste. Las alturas se incrementan desde la costa hacia tierra adentro hasta unos 35-40 m cerca de la base de la Sierrita de Ticul. Donde el relieve local raramente excede los 10 m y disminuye hacia la costa.

**b.- Sierrita de Ticul,** ésta se encuentra en la parte sur del estado de Yucatán, con rumbo N 55° W y con aproximadamente 160 km de largo, extendiéndose desde Mexcanú hasta el área de Polycuc, tiene rasgos fisiográficos que son el resultado de un fallamiento normal y sus elevaciones máximas son de 100 a 150 m.

**c.- Cerros kársticos (Planicie del Sur),** se encuentran al sur de la Sierrita de Ticul y continúan hasta el pie de las montañas en la Sierra Madre, en los estados

de Tabasco y Chiapas, el arco de la Libertad al norte de Guatemala y las montañas Maya en el norte de Belice, presentan elevaciones máximas de 300 m en la parte central al oriente de Campeche, la porción oriental de la planicie es cortada por la zona de falla del río Hondo; hacia el occidente el plegamiento de los carbonatos causa ondulaciones topográficas en las que se extiende desde el oriente de Campeche hasta el Golfo de México.

**d.- Distrito del Bloque Afallado (oriente),** abarca desde Belice hasta Tulum en Quintana Roo, presenta una topografía caracterizada por sierras y depresiones con rumbo N-NE, las cuales reflejan la ocurrencia de horst y grabens de la zona de falla del río Hondo, donde la mayoría del distrito presenta elevaciones de 50 a 100 m y el relieve es aproximadamente cerca de 25 m.

La geología de la plataforma de Yucatán no presenta grandes complicaciones estructurales, ésta se trata de una secuencia sub-horizontal de carbonatos y evaporitas depositadas durante el Cretácico Inferior-Cuaternario. Encontrándose sobre este basamento una acumulación de capa gruesa de sedimentos marinos del Paleozoico Tardío, seguidos por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas que corresponden a una cuenca carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano. (Figura 5)





Figura 5. Mapa de provincias fisiográficas de México (tomada de [http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/pcn/antologia/cnant\\_4\\_11.html](http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/pcn/antologia/cnant_4_11.html)) 21/03/2014 10:51am). La provincia marcada por el número 11 corresponde a la península de Yucatán

### II.3 GEOLOGÍA HISTÓRICA

#### Evaporitas Yucatán

**Cretácico inferior (Ki)** El Cretácico Temprano fue el principio de una etapa extensa de depósitos de carbonatos y evaporitas que se continuó en la plataforma de Yucatán hasta el Cuaternario. El nombre de Evaporitas Yucatán, López Ramos (1973,1975) lo propone para esta secuencia que se encuentra en los lechos rojos (Formación Todos Santos, en la que la parte norte y centro de Yucatán pertenecen al Cretácico Inferior y en la parte de Guatemala y Belice son de probable edad Cretácico Inferior a Cretácico Medio.



En la parte más baja del Cretácico se tienen estratos de cuarzo, limos y dolomía, los cuales se puede decir que se acumularon en la planicie de supramarea sobre las areniscas jurásicas, esto cuando el nivel del mar transgredió el oriente. (Figura 6)

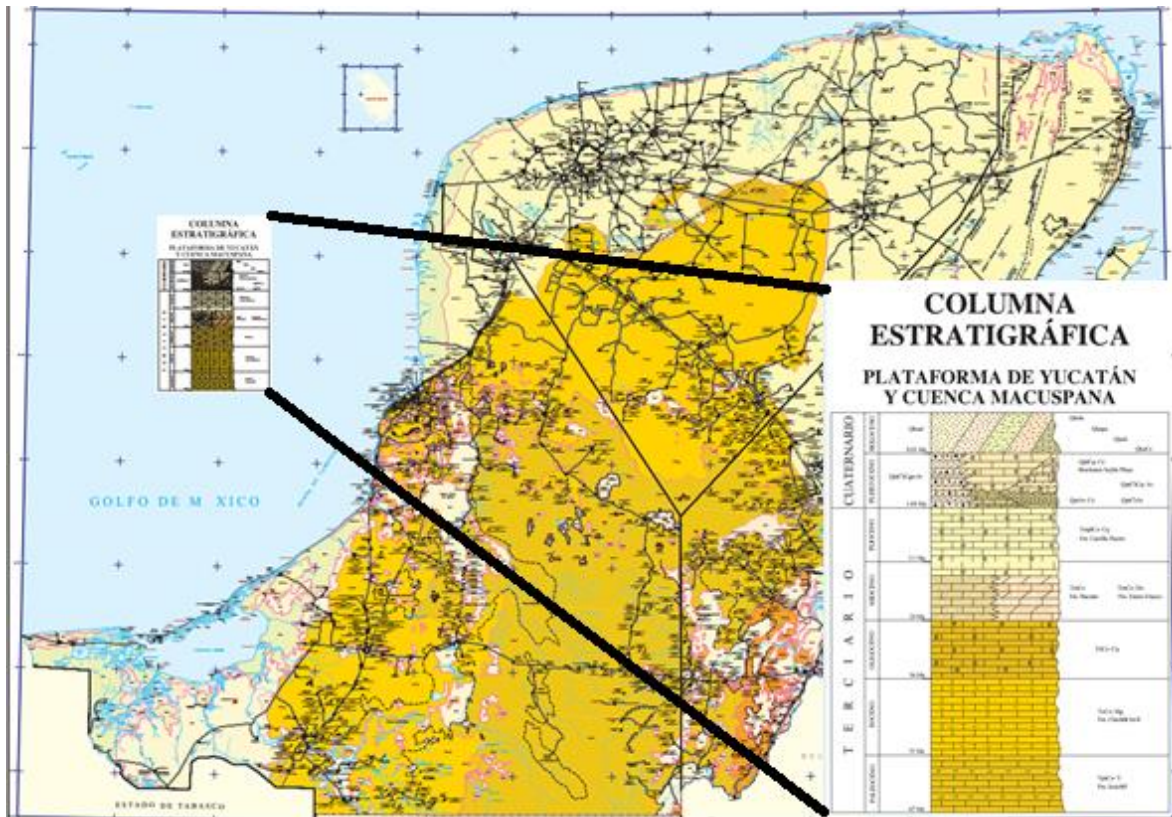


Figura 6. Carta geológico-minera de Yucatán (tomado de [http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas\\_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pdf/peninsula.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pdf/peninsula.pdf))

**Cretácico Superior (Ks).** En 1952, G. Flores realizó un reconocimiento en las montañas Maya de Belice en donde encontró una serie de calizas, calizas dolomíticas y dolomías con una delgada capa de arenisca, cuya fauna pertenece desde tipo lagunal hasta depósitos de post-arrecife.

## **Cenozoico**

### *Formación Icache (Paleoceno-Eoceno inferior, E-P)*

Esta formación se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas o bien simplemente recristalizadas, lo que explica la ausencia de fósiles (Álvarez, 1969). López Ramos para el año de 1975 describió que al atravesar el pozo Corinto No 1 encontró una secuencia de más de 500 metros y no llegó a la base de la misma por lo que no se sabe el espesor exacto.

### *Formación Chichen Itzá (Eoceno Medio-Superior, E).*

Las rocas de esta formación son calizas con abundante fauna, presentan ligeras variaciones litológicas lo que permite dividirla en tres miembros: Miembro Xbacal, Miembro Pisté y Miembro Chumbec; fue depositada sobre una base casi plana, por lo que no ofrece grandes variaciones en los ambientes de depósito es decir, se depositó bajo condiciones muy similares, lo cual puede ser diferenciado sólo mediante la micro fauna.

## **Oligoceno**

Para el Oligoceno Inferior se presenta como una calcarenita pulverulenta, quebradiza, suave, blanca y rosácea; con caliche en bancos de 1 a 1.5 metros de espesor y su contenido faunístico principales de Eulipidina sp. Nummulitides sp. Y Biloculina sp. El Oligoceno superior está constituido por una caliza y calcarenita pulverulenta coquinoide, con abundantes restos de moluscos, briozoarios, algas y miliólidos.

## **Mioceno**

### *Formación Bacalar (Mioceno Inferior)*

Fue definida por J. Butterlin en 1958, consiste de calizas blandas, pero con nódulos duros que pueden formar verdaderos niveles, éstas pasan a margas blancas en los niveles inferiores y a veces se presentan finas capas de yeso. Estos datos fueron reportados por López Ramos (1975), quien consideró que su espesor debió alcanzar “varios centenares de metros”.

## **Pleistoceno-Holoceno**

### *Calizas de Moluscos*

Son calizas coquiníferas masivas con tonalidades de blanco a crema. Su fauna comprende sobre todo moluscos de aspecto moderno. Probablemente las calizas consolidadas pertenecen al Pleistoceno y las capas superiores más blandas y costeras pertenezcan al Reciente. (Figura 7)



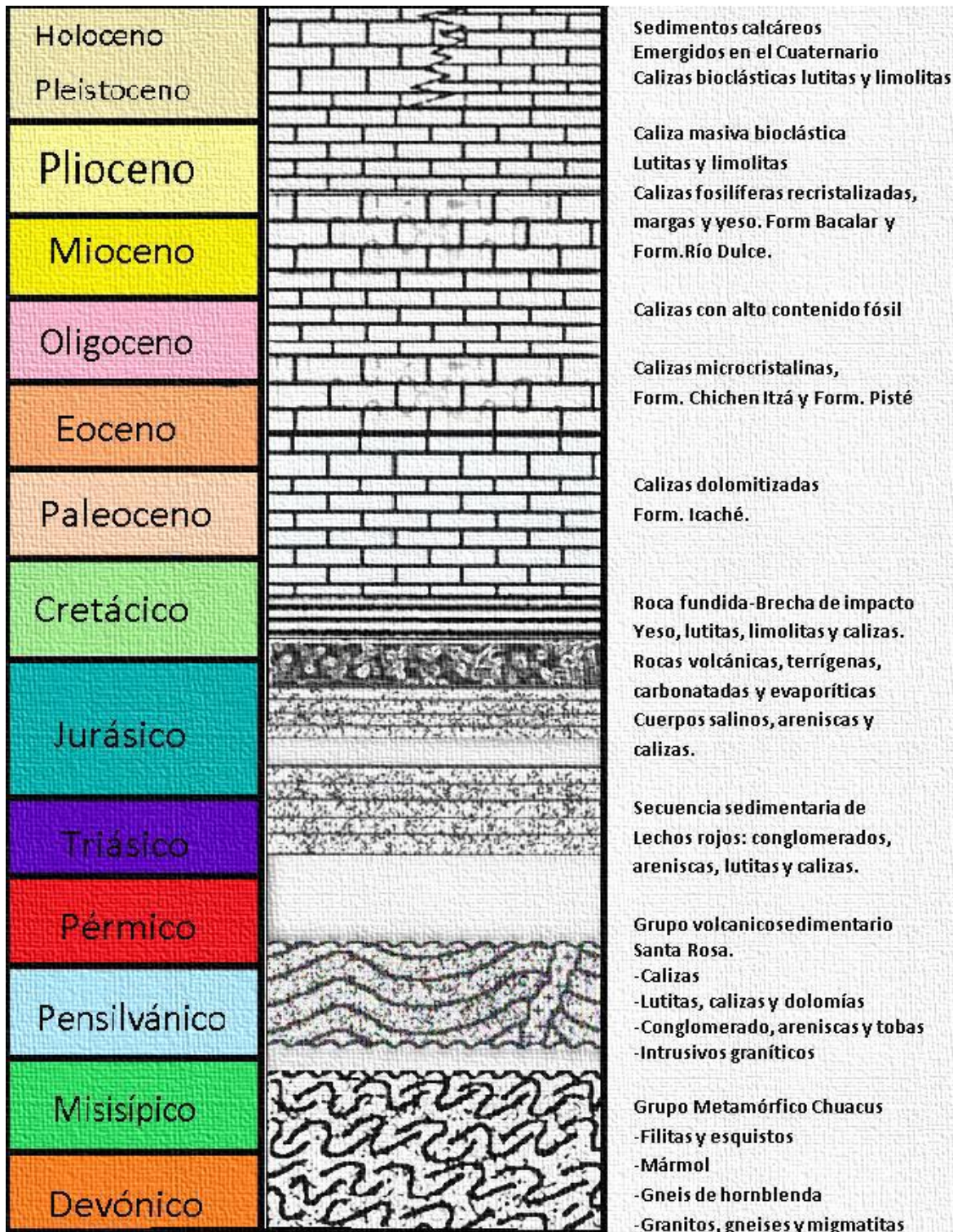


Figura 7. Columna estratigráfica de la península de Yucatán (tomada de López Ramos, 1975).

## II.4. TECTÓNICA REGIONAL

La evolución geológica del sureste mexicano es analizada en contexto regional del Golfo de México que inicia su apertura con la fragmentación y dispersión de la Pangea. La sedimentación en esta depresión comienza con el depósito de lechos rojos continentales durante el Triásico Tardío y el Jurásico Temprano, después de lo cual, durante el Calloviano, se produce una invasión por aguas marinas provenientes del Pacífico que cubren una extensa zona con poca circulación, poco tirante de agua y alta evaporación, condiciones que favorecieron al depósito de grandes volúmenes de sal en la zona central de la cuenca. Desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Tardío la sedimentación estuvo dominada por carbonatos, cambiando a clásticos a principios del Paleógeno a causa de la Orogenia Laramide, evento tectónico que formó la Sierra Madre Oriental. Durante el resto del Paleógeno la sedimentación clástica se fue alojando en grandes depocentros formados en el antepaís de la Sierra Madre Oriental y en las porciones sur y suroccidental del Golfo de México, en donde el Macizo de Chiapas aportó un gran volumen de sedimentos, mientras que sobre el Bloque de Yucatán continuaba el depósito de carbonatos de plataforma somera. En el Mioceno medio, durante el Serravaliano, la compresión derivada del movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos contra la terminación meridional de la Placa de Norteamérica, formó los pliegues y fallas de la cadena de Chiapas-Reforma-Akal sobre el nivel de la sal del Calloviano; posteriormente estas estructuras se bascularon hacia el NNW cuando la sal se movilizó hacia el norte. El cambio de posición de la masa de sal generó nuevas antitéticas regionales, que limitan las Cuencas del Sureste. El movimiento gravitacional de los depósitos cenozoicos causó finalmente inversión tectónica en las cuencas neógenas, siendo esta más evidente en la Cuenca de Macuspana.

El sureste mexicano se refiere a la zona comprendida al oriente del Istmo de Tehuantepec y al occidente de la Península de Yucatán, incluyendo parte del área marina meridional del Golfo de México, aproximadamente entre las coordenadas geográficas 91° a 95° de longitud al oeste de Greenwich y de 16° a 20° de latitud

norte. El sureste mexicano es una de las áreas más complejas de Norteamérica. Esta complejidad se debe a que los movimientos de las placas tectónicas Norteamericana, del Caribe y de Cocos, convergen en esta región desde el Oligoceno Tardío (Pindell y Dewey, 1988; Morán-Zenteno et al., 2000); la Placa Norteamericana tiene un movimiento relativo hacia el oeste respecto a la del Caribe, mientras que la de Cocos se mueve hacia el noroeste en dirección hacia las dos primeras. Las estructuras resultantes de esta actividad tectónica durante el Mesozoico y Cenozoico presentan tendencias estructurales diversas, así como también edades de deformación diferentes. Después de este evento orogénico, como resultado del desalojo de grandes volúmenes de sal y arcilla, se formaron cuencas extensionales cuya dirección de extensión está orientada casi a 90° de los ejes de los pliegues de la cadena. Sin embargo, la Sierra de Chiapas es una cadena plegada y cabalgada que no presenta en su frente tectónico una cuenca de antepaís, como es el caso de las cadenas de la Sierra de Zangolica y de la Sierra Madre Oriental. Del borde occidental del Golfo de México.

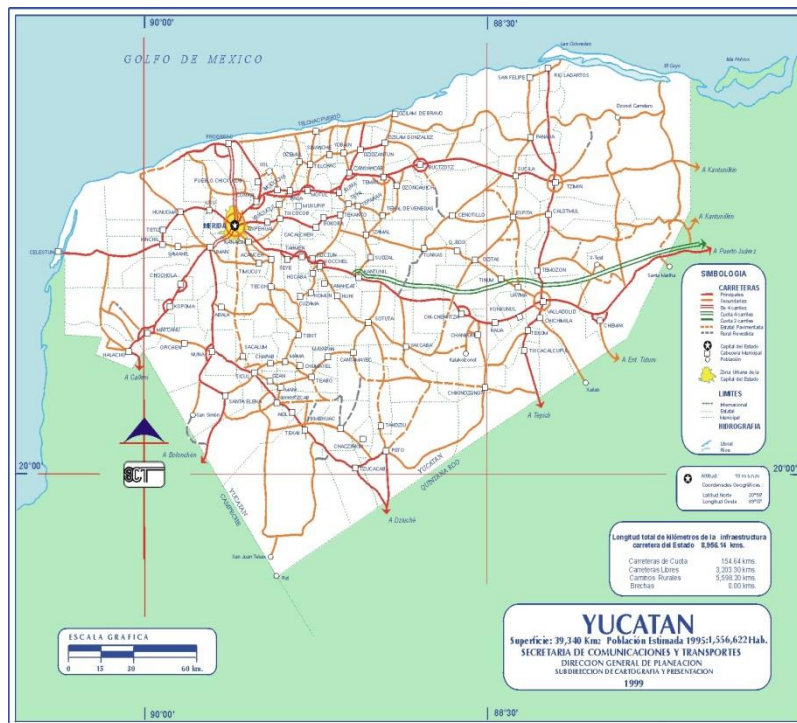


Figura 8. Mapa Paleogeográfico fuente: INEGI. Estado de Yucatán División Territorial de 1810 a 1995 Edición

## II.5. BLOQUE DE YUCATÁN

El bloque de Yucatán, tiene como límites, la corteza oceánica del Golfo de México al norte y al occidente. Entre el bloque estable y la corteza oceánica existe un estrecho margen de rift con pendiente hacia el norte, que se caracteriza por el rápido adelgazamiento de la corteza continental. Al noreste, en el área del sureste del Golfo de México, el Bloque de Yucatán está separado de los terrenos del sur de Florida, por un complejo sistema de rift del Jurásico Medio a Tardío de orientación noroeste (Marton, 1994).

El límite del Bloque de Yucatán se define por el margen de la plataforma carbonatada del Cretácico Inferior (Buffler y Sawyer, 1985; Buffler y Thomas, 1994). Para el sector ESE, el Bloque está limitado por el borde continental sumergido de Yucatán. El límite sur está definido por la zona de falla Polochic-Motagua (Donnelly et al., 1990); aunque éste es un límite de placas actual y dicha zona se asume que estuvo cerca de la margen Mesozoica del Sur de Yucatán, debido a la ausencia de más datos.

Con respecto al Bloque de Yucatán se tienen dos interpretaciones, esta por Pindell (1985) en la que sugiere que la enorme área representada por el complejo Granítico del Batolito de Chiapas, donde plutones Permo-Triásicos intrusionan rocas metamórficas Precámbricas (López Ramos, 1979), en la que no forman parte del Bloque de Yucatán y está separado de éste por la falla transforme "Tamaulipas-Golden Lane-Chiapas".

Sin embargo, se ha argumentado que no existe evidencia clara y precisa para dicha falla transforme (Salvador, 1991). Para 1987, el mismo autor sugirió que la transforme occidental que se requería para dar lugar a la apertura del Golfo, debería cruzar el sur de México hasta el Istmo de Tehuantepec.

Estudios paleomagnéticos en la porción sur del Bloque indican una rotación tectónica en sentido contrario a las manecillas del reloj desde una paleoposición en la parte norte del Golfo hasta su posición actual (Molina et al., 1992).

### III. Marco teórico

#### III.1. Gravimetría

La gravimetría es la ciencia que estudia la atracción entre los cuerpos especialmente relacionada con la Tierra. Forma parte de los métodos de exploración geofísica y tiene aplicaciones en estudios de geofísica, geodesia y geodinámica. También está relacionada la medida del peso de un cuerpo, un campo gravitacional y la densidad de los diferentes materiales en la corteza e interior del planeta.

#### Fundamento físico

La Primera Ley de Newton establece que existe una fuerza de atracción entre dos masas  $m_1$  y  $m_2$  separadas por una distancia  $r$ , representada por la siguiente fórmula:

$$G = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

#### Constante de Gravitación Universal (G)

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$$

#### UNIDADES

El valor de  $g$  en el Sistema Internacional vendría dado en  $m/seg^2$ , pero en honor a Galileo se definió el Gal =  $1cm/seg^2$ . Como dijimos, necesitaremos valores tan pequeños como el milgal =  $1mgal = 0,001 Gal$  o la unidad gravimétrica  $ug = 0,1 mgal$ . Para trabajos de microgravimetría se utiliza el centésimo de milgal, es decir  $0,01 mgal$ .



## El gravímetro

Este instrumento se encarga de medir las diferencias de gravedad las cuales son mediciones relativas que son detectadas por el instrumento por medio de un elemento interno del mismo el cual puede ser un péndulo, un resorte o algún elemento electrónico en los gravímetros más actuales, el cual permite medir cambios relativos de medida.

Estas mediciones no tienen unidad física, pero el resultado final se da en miligales después de usar una constante la cual es diferente para cada gravímetro dependiendo del fabricante.

## CORRECCIONES

Como las mediciones de gravedad se realizan en la superficie topográfica y la gravedad normal se determina a nivel de geoide, es necesario bajar las primeras al nivel del mar, que es aproximadamente el nivel del mar bajo los continentes. Para ello se considera por separado cada efecto.

### Gravedad observada

Esta se obtiene por medio de un datum y la gravedad relativa del instrumento de medición que refleje en cada una de las estaciones.

El datum es la información de una estación base fija, teniendo esta su gravedad absoluta y su altura.

## Gravedad teórica

Debido a que la tierra no es perfectamente esférica presentando un achatamiento en los polos, la gravedad tiende a aumentar mientras más cerca estemos. Quedando la formula final basada en el elipsoide de revolución como:

$$g = 978.0327(1 + 0.0053024 \text{ sen}^2 \theta - 0.0000057 \text{ sen}^2 2\theta)$$

Donde  $\Theta$  es la latitud a la cual se encuentra la estación.

## Corrección por terreno

El fin de esta corrección es hacer más realista el escalón de Bouger, ya que pueden haber valles abajo del punto de medición o topografía más alta sobre el plano. Hoy en día esta corrección se efectúa utilizando modelos digitales de elevación y programas computacionales

## Corrección de Aire Libre:

Para este análisis basta suponer la Tierra como esférica y no rotacional. Si la altura sobre el nivel del mar cambia por la topografía, la gravedad será distinta porque cambia la distancia al centro de la Tierra quedando la fórmula:

$$C_{Al} = -0.0386(h)$$

Corrección de Bouguer:

Entre el nivel del mar y la estación de medición hay una masa, que por estar debajo aumenta el valor medido. Esta masa debe ser eliminada para que nuestra medición sea comparable con el valor teórico al nivel del mar obtenido con la Fórmula Internacional. La Teoría de Potencial demuestra que las masas ubicadas encima del nivel del mar no producen atracción, siempre que se trate de un cuerpo esférico como la Tierra. Si bien la corrección que determina Bouguer no es exacta, es suficiente para la precisión de nuestras mediciones. Esta inexactitud surge de considerar a la masa interpuesta como una losa plana horizontal de espesor igual a la altura sobre el nivel del mar por un lado, y la densidad de esta placa igual a la densidad en la superficie por el otro. Esta corrección no tiene en cuenta los valles y montañas ya que son como aplanados con la aplicación de la placa.

$$C_b = -0.4191 \rho h$$

$\rho =$  densidad promedio o estimada del suelo

Esta corrección será negativa porque la placa bajo la estación aumenta el valor de la gravedad, y para llegar al nivel del mar debemos eliminarla. Como el método gravimétrico permite determinar contrastes de densidad entre cualquier cuerpo o estructura y su entorno, la densidad de esta placa tiene mucha importancia ya que puede dar lugar a interpretaciones erróneas.

Anomalías de aire libre

Esta anomalía se calcula como si la medición gravimétrica hubiese sido echa a la elevación de la estación pero sin tomar en cuenta la atracción de material entre esa elevación y el nivel de referencia o en otras palabras como si el gravímetro estuviera flotando sobre la estación y debido a que en el mar el elipsoide es

prácticamente igual al geoide, la gravedad observada es aproximadamente igual a la anomalía de aire libre.

$$A_{AL} = g_{obs} - g_t + C_{AL}$$

### Anomalía de Bouguer

La anomalía de Bouguer refleja masas con densidades arriba o por debajo de la densidad de referencia que en este caso sería la densidad promedio de la corteza la cual es apropiada para el estudio de los fenómenos a profundidad de la corteza

Y generalmente después de todas las correcciones anteriores solo provocan cambios mínimos en la fórmula de la gravedad teórica es por eso la anomalía de Bouguer la cual se calcula:

$$A_B = g_0 - \gamma + C_{AL} - C_b$$

Que sería la anomalía de Bouguer simple y si a esta se le suma la corrección por terreno tendremos la anomalía de Bouguer completa, que refleja el cambio que sufre la atracción gravitacional por la presencia de valles o colinas.

$$A_{Bc} = A_B + C_T$$

Dónde:

$$g_o = \text{gravedad observada}$$

$$\gamma = \text{gravedad teorica}$$

## Métodos aplicables para la interpretación

### Espectro de potencia

Esta técnica nos muestra el comportamiento de la potencia de la señal con respecto a la frecuencia espacial o número de onda, lo que pretende es poder calcular una profundidad aproximada de la señal.

Este se calcula con el cuadrado del módulo de la transformada de Fourier de la anomalía de la gravedad, mostrando solo mínimos detalles del comportamiento de la señal.

### Continuaciones arriba y abajo

Este filtro permite separar la señal de interés como por ejemplo separar la componentes regionales de las residuales, este filtro se basa en permitir el paso de frecuencias o mejor dicho usando un filtro pasa bajas, pasa altas o pasa bandas a el resultado del espectro de potencia dependiendo de lo que nos interese o si la superficie esta por debajo de la observación o por encima de la superficie de observación.

### Primera derivada o derivada horizontal

Esta técnica nos revela las discontinuidades geológicas a profundidades someras, este se hace máximo en zonas de gran pendiente y mínimo en zonas planas, así como en los cambios de densidad abruptos, de igual manera nos marca los contactos entre diferentes cuerpos geológicos pero a muy poca profundidad.

## Segunda derivada o derivada vertical

Esta derivada nos muestra los cambios de pendiente a mayor profundidad lo que hace que se destaquen hasta los pequeños cambios en pendiente lo que nos hace separar los cuerpos que por estar cerca se muestran como una sola anomalía pero de igual manera nos da algunos inconvenientes tales como: no ser capaces de deducir la forma de la anomalía, y las anula las anomalías de las masas a profundidades mayores

### **III.2 SÍSMICA**

La búsqueda de hidrocarburos (petróleo y gas) en el subsuelo es un proceso muy complejo, para el que deben usarse herramientas de diferentes especialidades, como las físicas y las informáticas. Una de dichas herramientas es aquella denominada “sísmica”.

La sísmica es una herramienta de exploración de hidrocarburos que permite conocer de modo aproximado la conformación del subsuelo, la composición de las capas de roca, la forma en que están ubicadas, su profundidad y sus dimensiones. Se trata de estudios que se ejecutan sobre un espacio físico específico y simulan la estructura del subsuelo, dando pie a la conformación de mapas que muestran dichas estructuras. Con los resultados de la sísmica en mano, los geólogos pueden identificar si existen reservorios donde se encuentren contenidos hidrocarburos.

#### *El proceso de la sísmica*

La sísmica consiste, en términos sencillos, en la emisión de ondas que atraviesan las diferentes capas del subsuelo las cuales rebotan hacia la superficie cada vez que haya un cambio importante en el tipo de roca, como se puede observar figura 9.

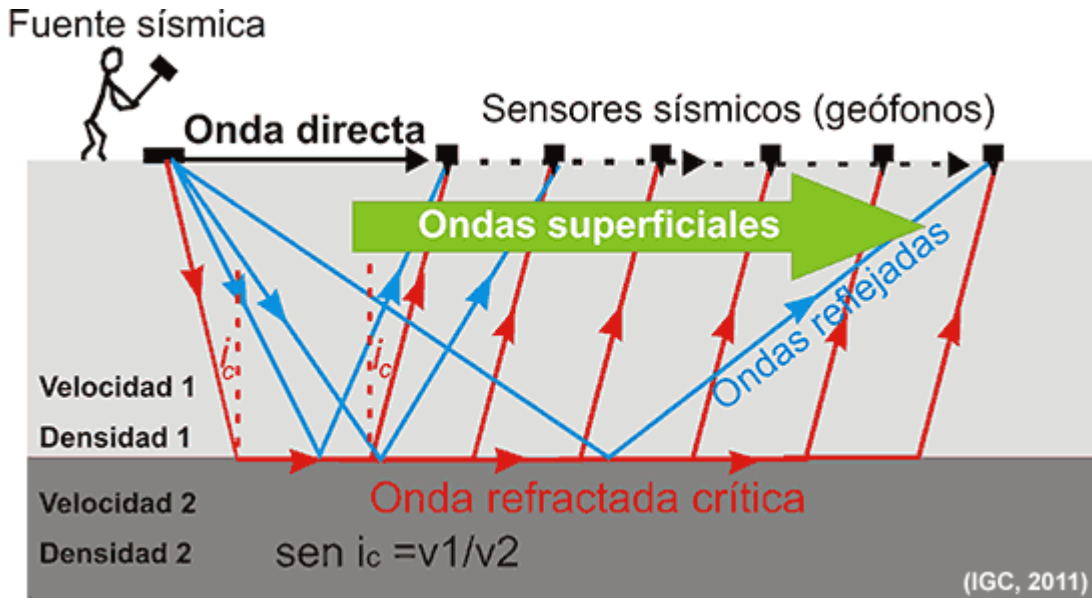


Figura 9. Esquema de adquisición de datos sísmicos y de los principales tipos de ondas según sus características de propagación Tomada ([http://www.igc.cat/web/es/geofisica\\_tec\\_sismicaactiva.html](http://www.igc.cat/web/es/geofisica_tec_sismicaactiva.html) (11:08))

Antes de iniciar el proceso de sismica propiamente dicho es necesario definir aquellas zonas que se va a explorar. Una vez determinada el área se procede a instalar los equipos necesarios para el proceso, lo cual dependerá si la sismica se hace en la tierra o en el mar. Así, por ejemplo, si la sismica se hiciera en el suelo se hace uso de explosivos enterrados o de camiones vibradores mientras que en el mar se usan cañones de aire.

Para poder recibir la información se instalan aparatos de alta sensibilidad llamados hidro/geófonos que transmitirán la información recogida a un receptor.

#### **IV. Gravimetría Chicxulub.**

##### **Gravimetría**

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.

En la 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 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).



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” (anillo de picos).

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.

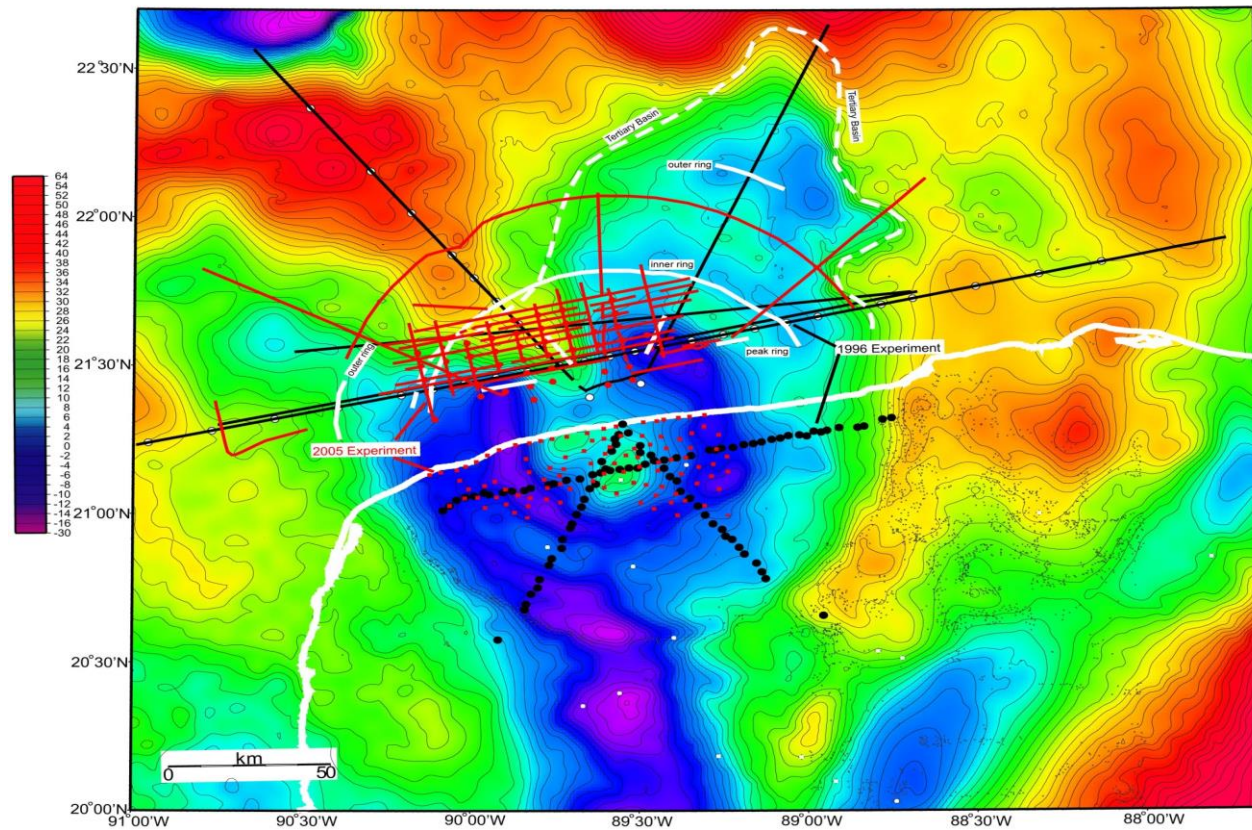


Figura 10. Líneas sísmicas tomadas a través del cráter de Chicxulub, tomada de: chicxulub: drilling the K/T impact crater

Mapa de anomalía de Bouguer en la zona del cráter Chicxulub. Las mediciones usadas para la construcción del mapa de anomalías están tomadas de los estudios de exploración de Petróleos Mexicanos, integradas por observaciones recientes de los proyectos Chicxulub y observaciones marinas.

Para el desarrollo de esta tesis se necesitó tener la base de datos en formato digital en una malla equi-espaciada, para manejar la información más fácil y adecuadamente. Para lo cual se hizo la re interpolación de la anomalía de Bouguer antes presentada tras realizar un muestreo de datos cualitativamente. Realizando una malla de 24x33 a través de toda la anomalía, y posteriormente para darle mejor resolución a la anomalía se hicieron muestreos en la zona de interés que son los contornos principales.

Para la re interpolación de la anomalía se usó el método de kriging en una malla de 1000x1000 dándonos como resultado la siguiente anomalía:

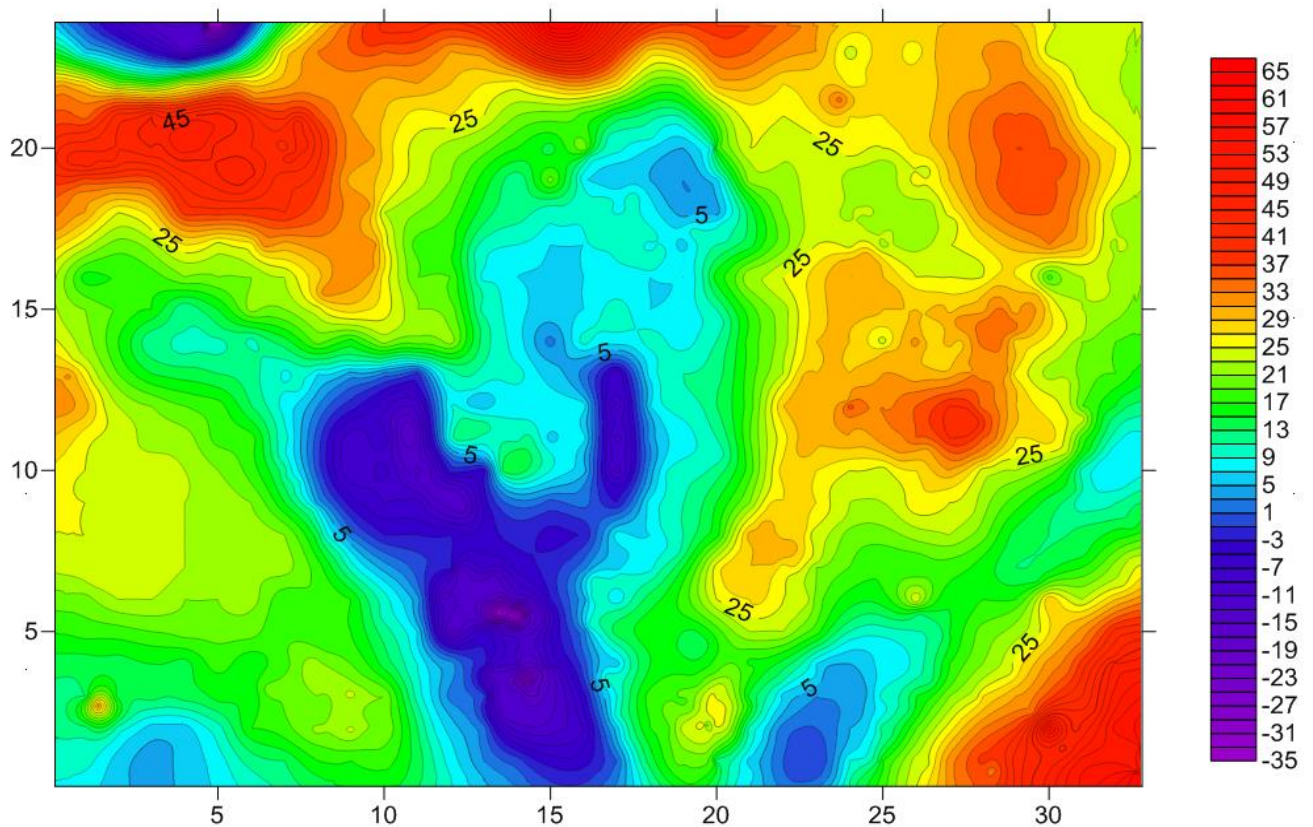


Figura 11. Anomalía reinterpolada 1000x1000

De igual manera se extrajo la topografía de una base de datos del INEGI en cada punto del muestreo y se hizo la interpolación en toda la zona

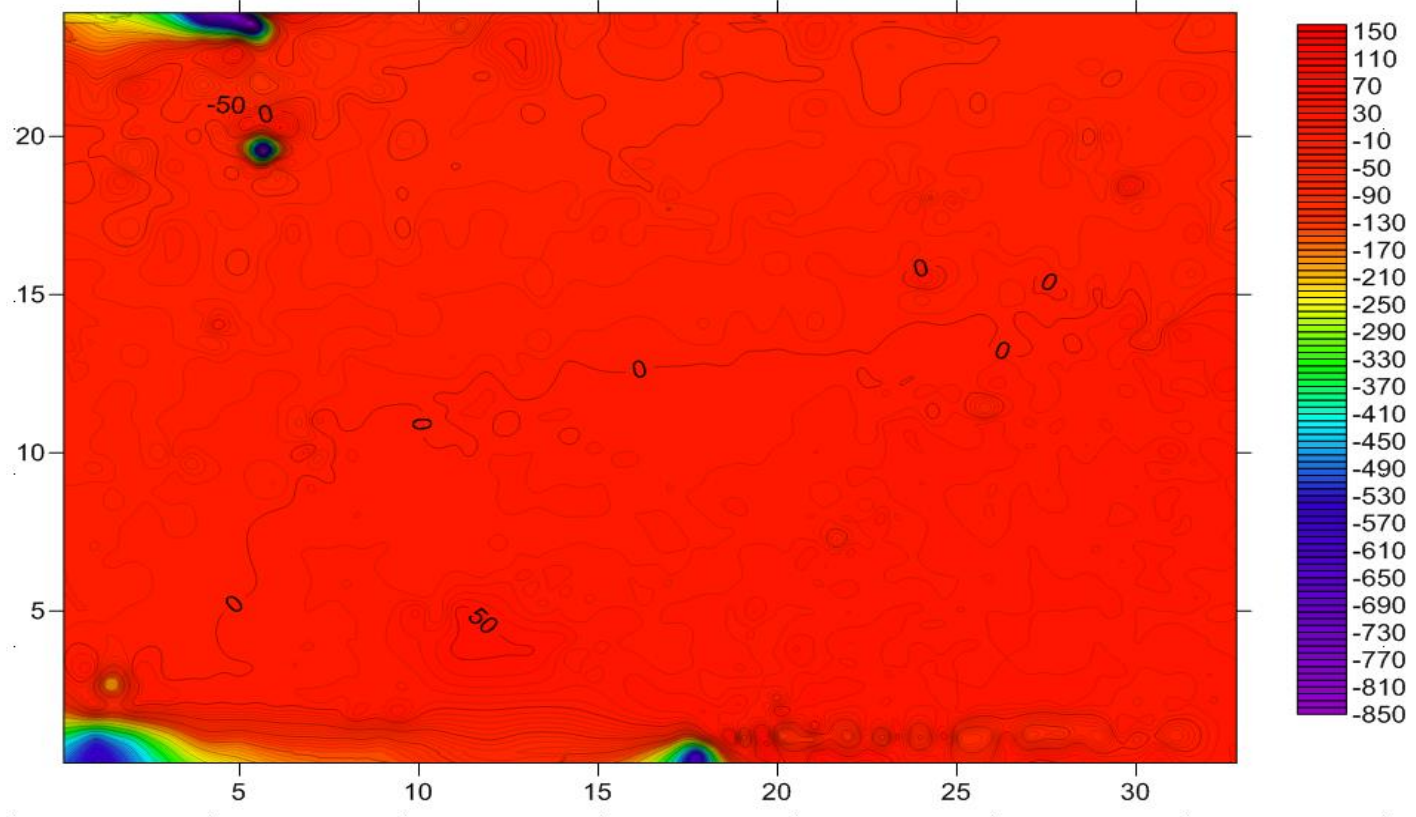


Figura 11. Interpolación de la topografía sobre el cráter del chicxulub



## **V. Sísmica Chicxulub**

### **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.

## **CAMPAÑA DE 1996**

En 1996, se realizó un experimento sísmico marino, con adquisición de datos en varios perfiles. La adquisición estuvo a cargo de la compañía Geco-Sigma, que adquirió cuatro líneas sísmicas marinas con una longitud aproximada de 160km.

- A0 y A1, se unen para formar un solo perfil, que pasa a 26 km al norte del centro del cráter y corre de SW a NE. Su localización exacta en latitud y longitud es, para la línea A0 21°15' N, 100° W y finaliza a los 21°30'N, 89°35'W donde comienza la línea A1, que finaliza a los 21°55'N, 87°35'W.
- La línea B está ubicada a una distancia radial de 29 a 160 km con respecto del centro del cráter y va en dirección SE-NW desde los 21°25'N, 89°40'W hasta los 22°35'N, 90°40'W.
- La línea C está ubicada a una distancia radial de 29 a 160 km con respecto al mismo punto y toma dirección SW-NE desde los 21°30'N, 89°30'W, hasta los 22°40'N, 88°55'W.

El objetivo del experimento sísmico marino fue la visualización de la geometría del cráter, a partir de imágenes 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 entre ellos 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 Volumen	<b>150 liters</b>	9162 in <sup>3</sup>	<b>Receiver groups</b>	240 Configured	<b>162x12.5 m and 78x50 m</b>
Source pressure	<b>13.8 MPa</b>	2000 psi	<b>Streamer depth</b>		<b>10 +/- 1.5 m</b>
Source array	<b>36 air guns</b>	75 m wide by 18.5 m	<b>Near offset</b>		<b>152</b>
Source power	<b>171 bar m</b>	In 3-125 Hz band With	<b>Sample rate</b>		<b>2 ms</b>
Source depth		6 +/- m	<b>Record length</b>		<b>18 s</b>
Source interval		50 m	<b>Filters</b>	Low cut High cut	<b>3 Hz 18 db/octave 128 Hz 72 db/octave</b>
Navigation		Multifix DGPS			

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

## **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.

- 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  $21^{\circ}35'N$ ,  $89^{\circ}15'W$  y finalizando a  $22^{\circ}10'N$ ,  $88^{\circ}35'W$ .
- R3 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  $21^{\circ}50'N$ ,  $90^{\circ}45'W$ .

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 conformado 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	<b>6947 in3</b>		<b>Receiver type</b>	Hydrophone Streamer
Source pressure	<b>138 bars</b>		<b>Source type</b>	AirGun: Bolt 1500
Source number	<b>20</b>		<b>Number of channels recorded</b>	480
Source Depth	<b>6 +/- m</b>		<b>Sample Interval</b>	2 000microseconds
Channels length	<b>12.5m</b>		<b>Record length</b>	14 s
rocessing system	<b>Paradigm Geophysical Focus 5</b>		<b>Acquisition system name</b>	Syntrak
Shot control	<b>50m</b>	Distance		

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

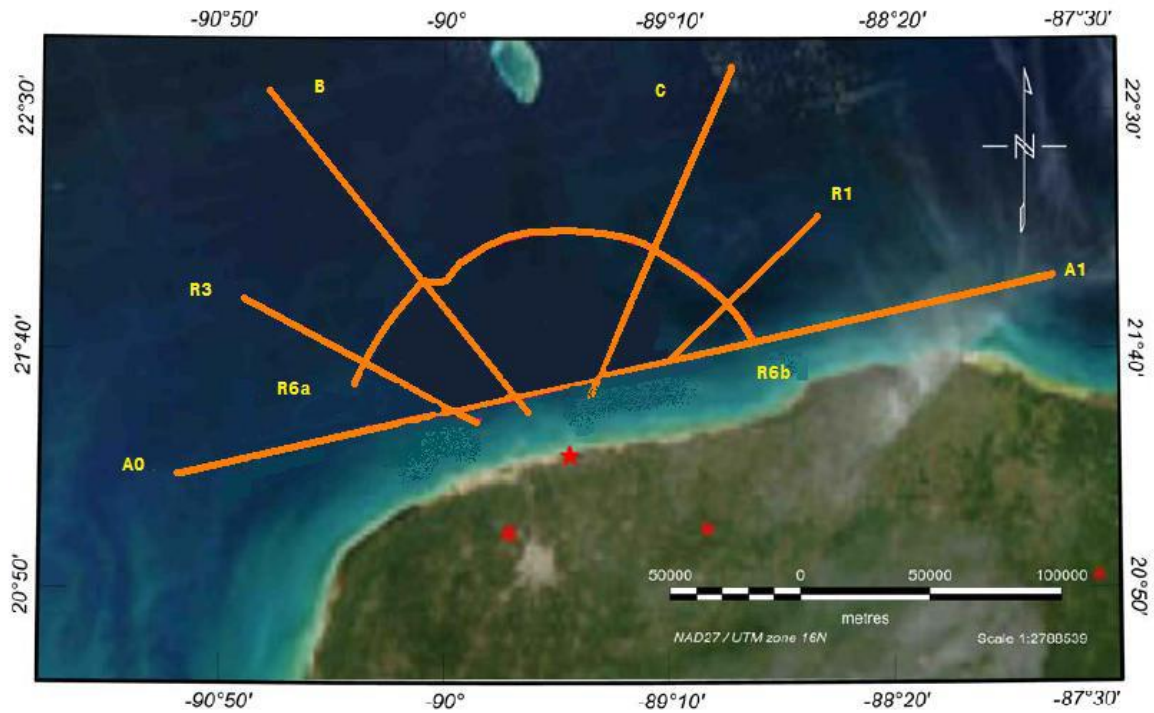


Figura 12. Ubicación de los perfiles sísmicos de reflexión. Las líneas A0, A1, B y C, corresponden a la campaña de 1996, mientras que las líneas R1, R3, R6a y R6b corresponden a la expedición del 2005. La estrella roja indica el centro del cráter. Imagen modificada de Keren Mendoza Cervantes, Mapeo de la estructura central del cráter de impacto Chicxulub, 2006.

## Chicxulub - Seismic Lines

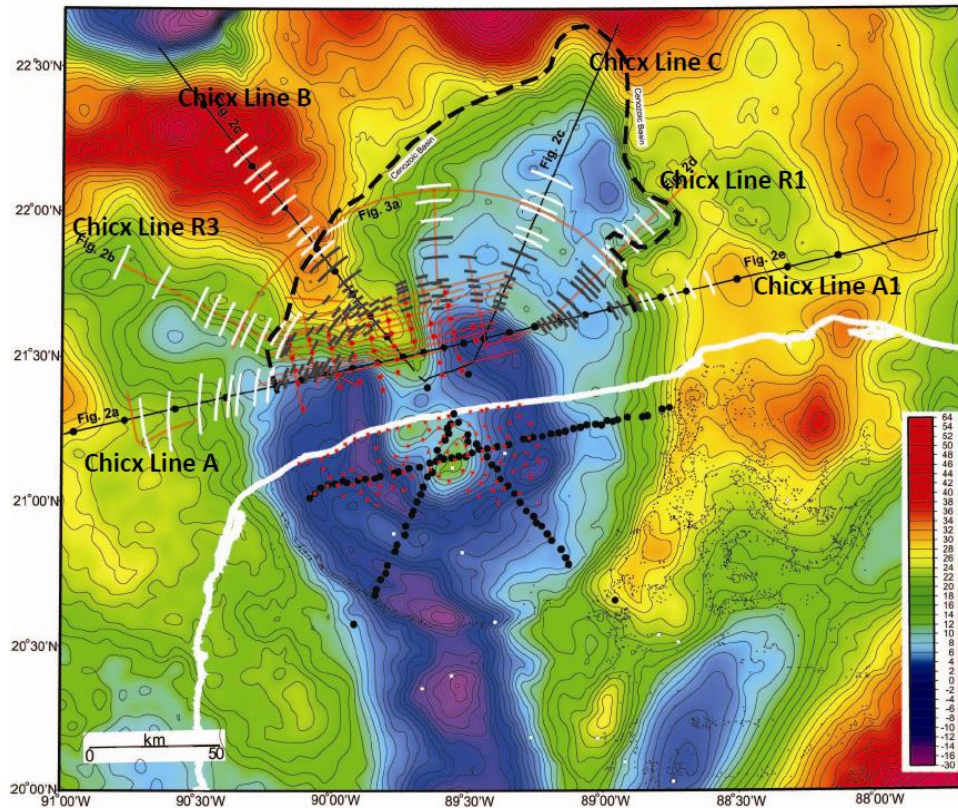


Figura 13. Ubicación de las líneas sísmicas A, B, C, R1, R3 en un mapa de anomalías de Bouguer. Imagen tomada de Chicxulub: drilling the K/T impact crater

## 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 procesamiento 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 procesamiento 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, en 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 procesamiento 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 procesamiento 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 posible 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.

### **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	<b>Sum adjacent 4 traces</b>
Sum adjacent	<b>4 traces</b>
Resample	<b>From 2ms to 8 ms</b>
Geometric divergence correction	<b>17(tv<sup>2</sup>)+1 dB/s</b>
FK filter	<b>+/- 1400 m/s, 50% taper. Removable agc</b>
Receiver array simulation	<b>1:3:1 mix ratio</b>
Source array simulation	<b>1:3:1 mix ratio</b>
Deconvolution (lag, operator, length, window applied)	<b>48 ms, 464 ms, 0.5-4.5 s; 72 ms, 640 ms, 4-9 s; 96 ms, 720 ms, 8-18 s;</b>
NMO correction	<b>Velocities supplied by Birps (11/04/97)</b>
Trace muting	<b>Top mute supplied by Birps</b>

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

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

### **Campaña de 2005**

Para el procesado de los datos, se empleó el programa FOCUS desarrollado por la compañía 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  $\alpha$  es una constante definida por el usuario.

Se utilizó un filtro F-K y una deconvolución, para separar 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.

## ***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.

### **INTERPRETACIÓN EMPLEANDO PETREL**

La plataforma de software Petrel ofrece una amplia gama de flujos de trabajo de geofísica para resolver los más complejos desafíos-desde la exploración regional a escala de desarrollo de yacimientos estructurales y estratigráficos. Dentro de un único entorno de colaboración multiusuario, los geocientíficos pueden realizar en 3D de gran alcance, 2D clásico, y antes del apilamiento sísmico interpretación-, así como la geofísica avanzada, 4D flujos de trabajo de interpretación sísmica y cuantitativa.

En este caso se usaron los siguientes criterios “filtros de interpretación”:

- *Coseno de la fase instantánea* o también llamado amplitud normalizada; tiene los mismos usos que fase instantánea con una ventaja adicional: Es continuamente lisa. Al proporcionar la discontinuidad + / -180 grados que se produce con la fase instantánea, el coseno de la fase instantánea puede procesarse adicionalmente (por ejemplo, se filtró y se apila) usando las herramientas de procesamiento sísmico convencionales. Picos de amplitud y valles conservan su posición, pero con eventos fuertes y débiles ahora que exhiben la misma fuerza. esto significa que actúa como ganancia probable.

- *Atenuación* de las ondas sísmicas mediante el modelo sismológico de dispersión simple y se modela estadísticamente los valores encontrados de Q con respecto a la variación espacial con el fin de identificar áreas de interés geofísico.
- *Programa SeiSee* muestra los datos sísmicos en SEG-Y, CWP / SU, formato CGG CST en la pantalla de su ordenador personal, muestra sísmica en diversos modos (meneo, área variable, de densidad variable, color)

## **VI. INTEGRACION**

Después de realizar los procesos correspondientes en la información sísmica y gravimétrica se procedió a hacer la integración de toda esta información para obtener modelos que se asemejen a la realidad y de igual forma utilizando criterios de modelado gravimétrico como lo son la primera y la segunda derivada tanto horizontales como verticales que cualitativamente muestran el efecto de las estructuras dominantes en el cráter y concuerdan con la interpretación sísmica , cabe remarcar que el hecho de hacer una re interpolación puede considerarse una especie de filtrado de información ya que esta da lugar a tener mejor resolución en la zona de interés.

## Perfil A

El perfil A pasa a 26 km del centro del cráter, tiene una longitud de 350 km aproximadamente con dirección SW-NE.

## Modelo simple

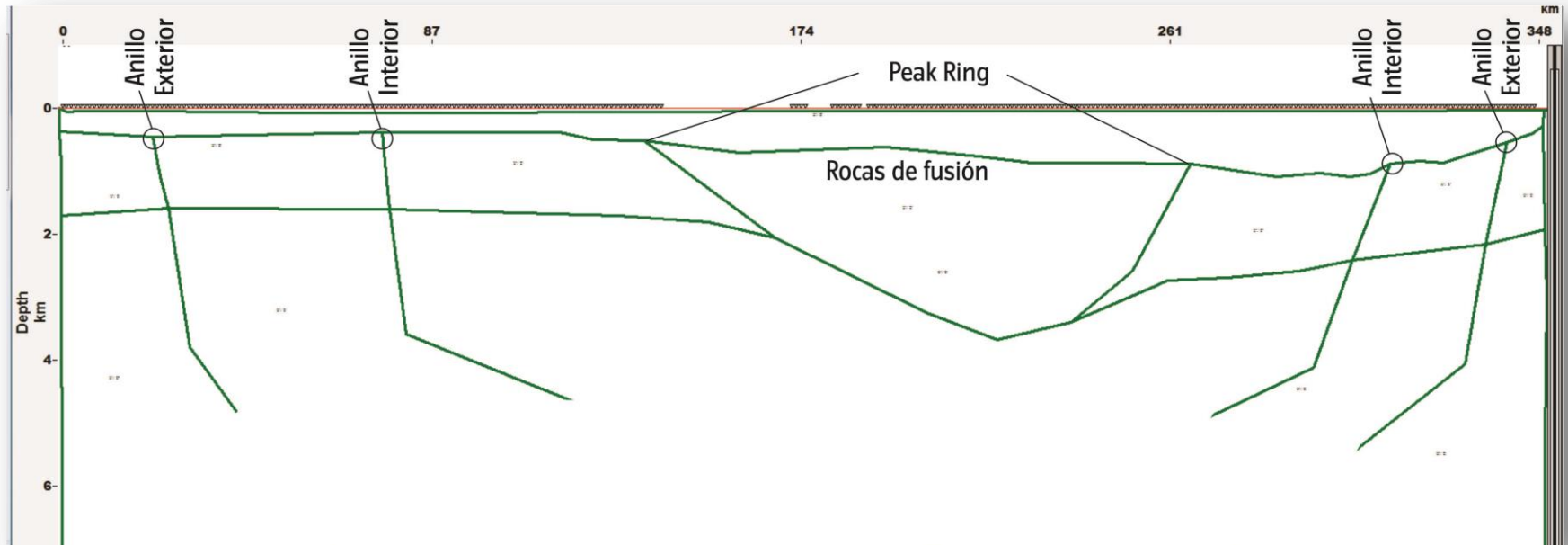


Figura 14. Interpretación estructural de la línea A

En el modelo simple se pueden observar todas las fallas normales hacia el centro del cráter así mismo los elementos principales estructurales de un cráter complejo, lo cual nos permite observar cómo se vieron afectados los estratos debido a procesos estructurales.

### Sísmica

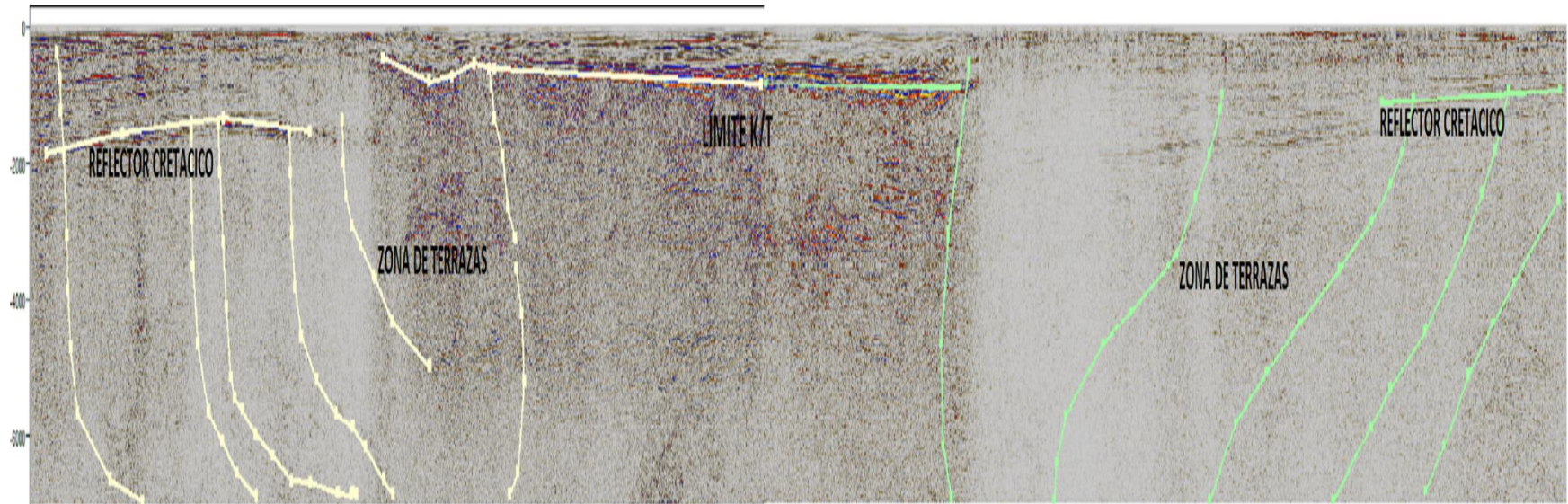


Figura 15. Sección A interpretada por medio de diagramas de líneas.

El perfil A se tomó sobre las líneas sísmicas  $A_0$  y  $A_1$  las cuales fueron empatadas e interpretadas en software especializados en el cual se observa la estructura del cráter, así como los reflectores del cretácico, K/T y zonas de terrazas.

## Modelo integrado

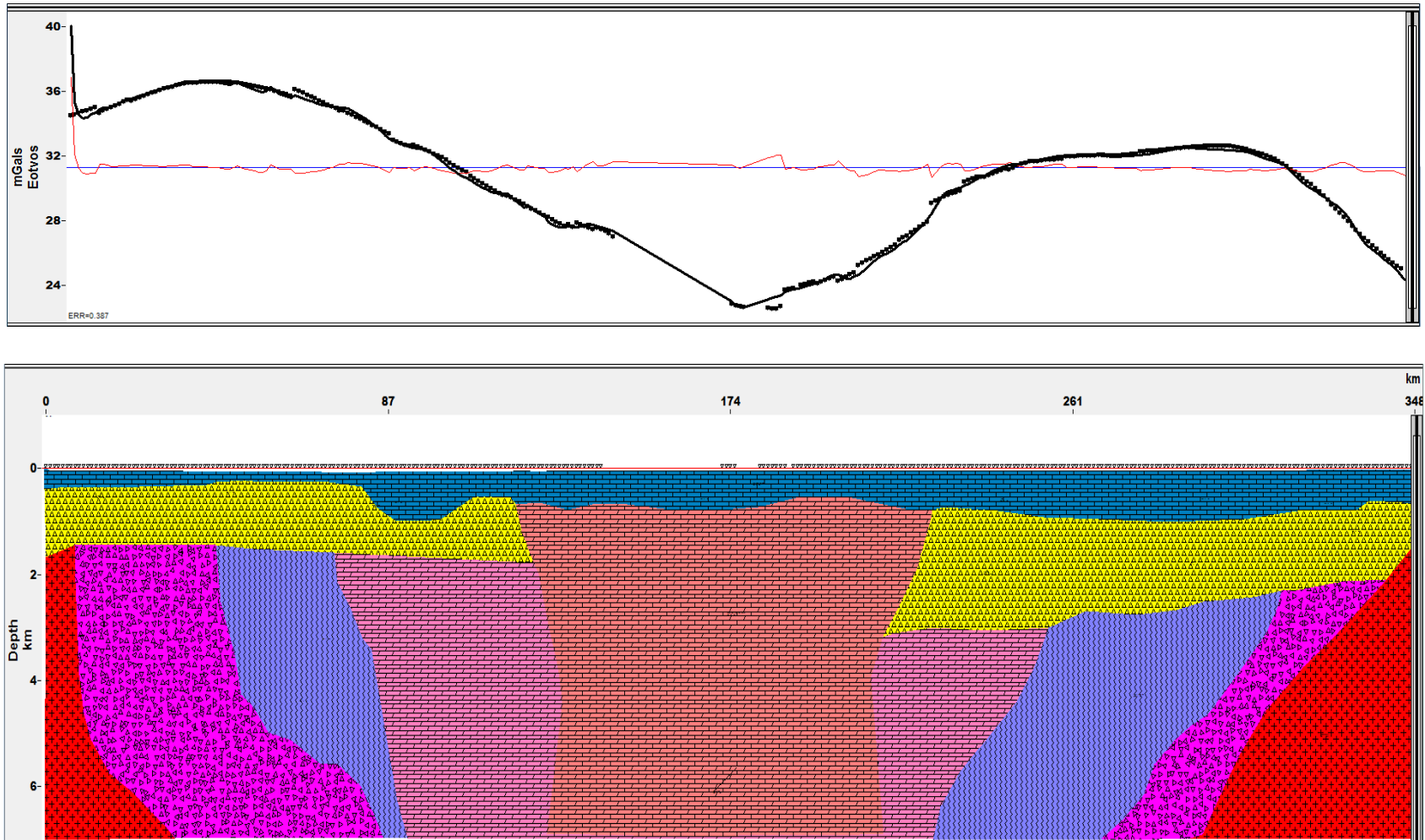


Figura 16. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea A

Posteriormente se hizo la integración de datos gravimétricos y sísmicos en la cual podemos observar cómo se acopla la interpretación sísmica con el contraste de densidades entre las rocas existentes en la zona para con la gravimetría dándonos una idea general la estructura del cráter con respecto a la profundidad/densidad.

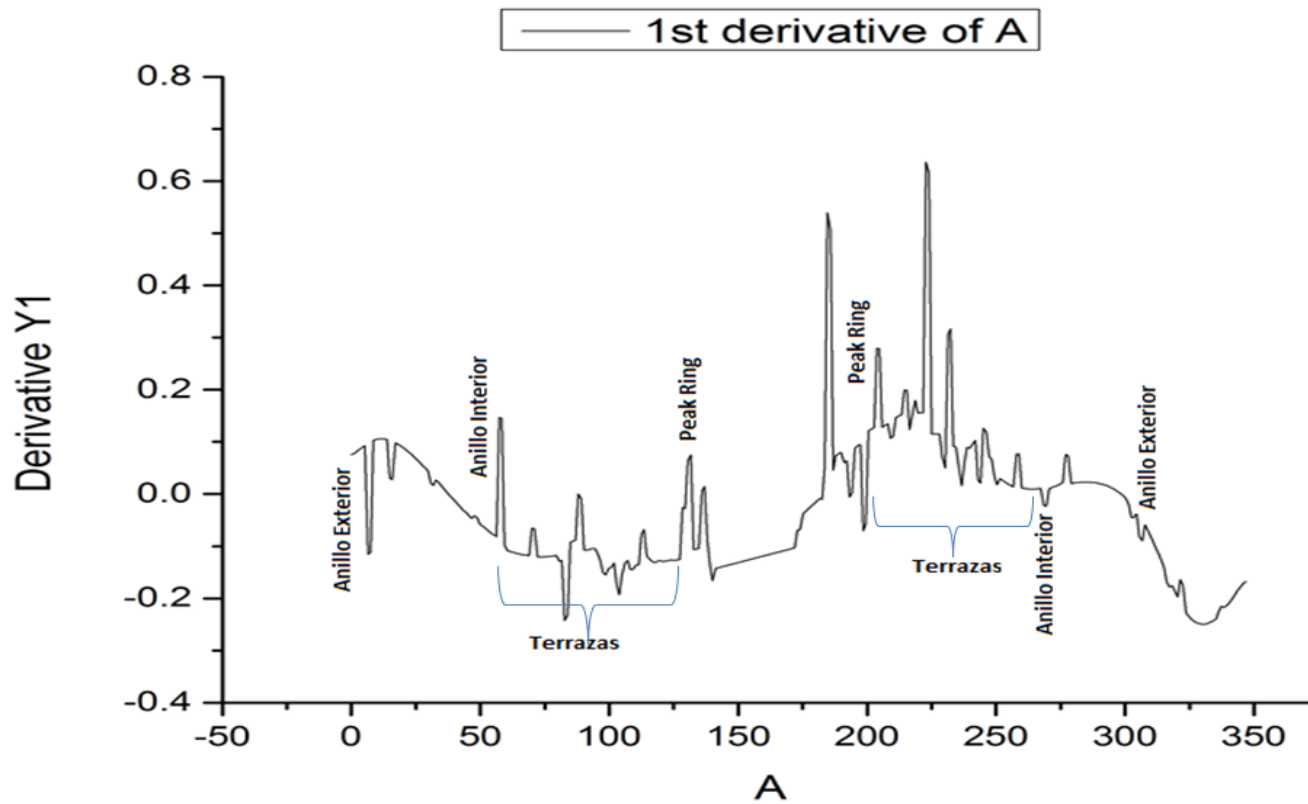


Figura 17. Primera derivada de la línea A

Usando esta técnica, Se delimitaron zonas de terrazas, fallas y la dirección de las mismas.



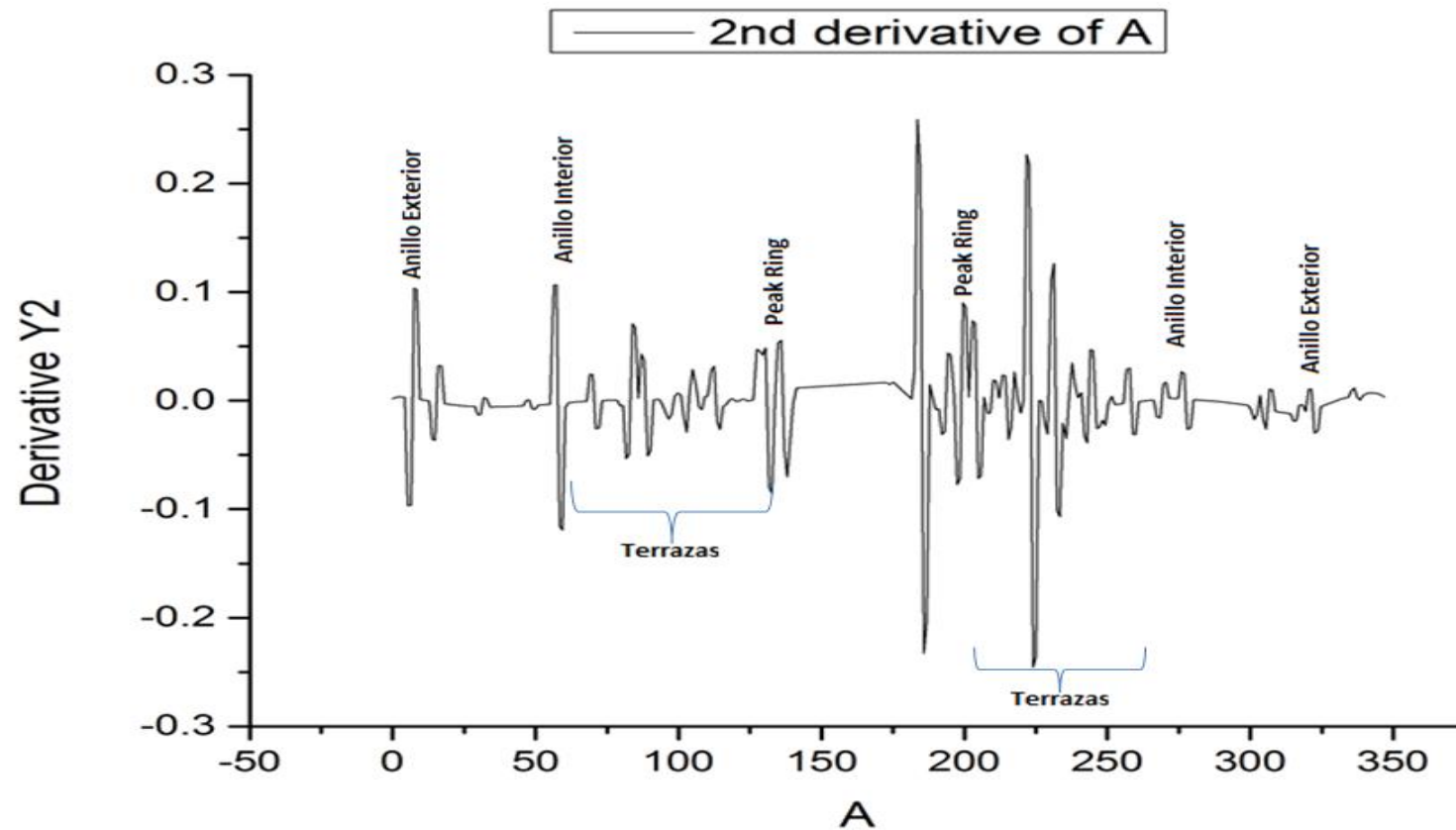


Figura 18. Segunda derivada de la línea A

Esta técnica se utilizó Para ubicar los fallamientos a mayor profundidad y delimitar las zonas, en comparación con la 1ra derivada encontramos que eran casi idénticos lo cual nos muestra que la estructura del cráter desplazo los bloques completamente y a la zona de terrazas es muy compleja así como existen micro fallas a través de todo el cráter.

## Perfil B

El perfil gravimétrico B tomando sobre la línea sísmica B que tiene una longitud aproximada de 167 km, y pasa a 26 km del centro del cráter y tiene una dirección SE-NW.

## Modelo simple

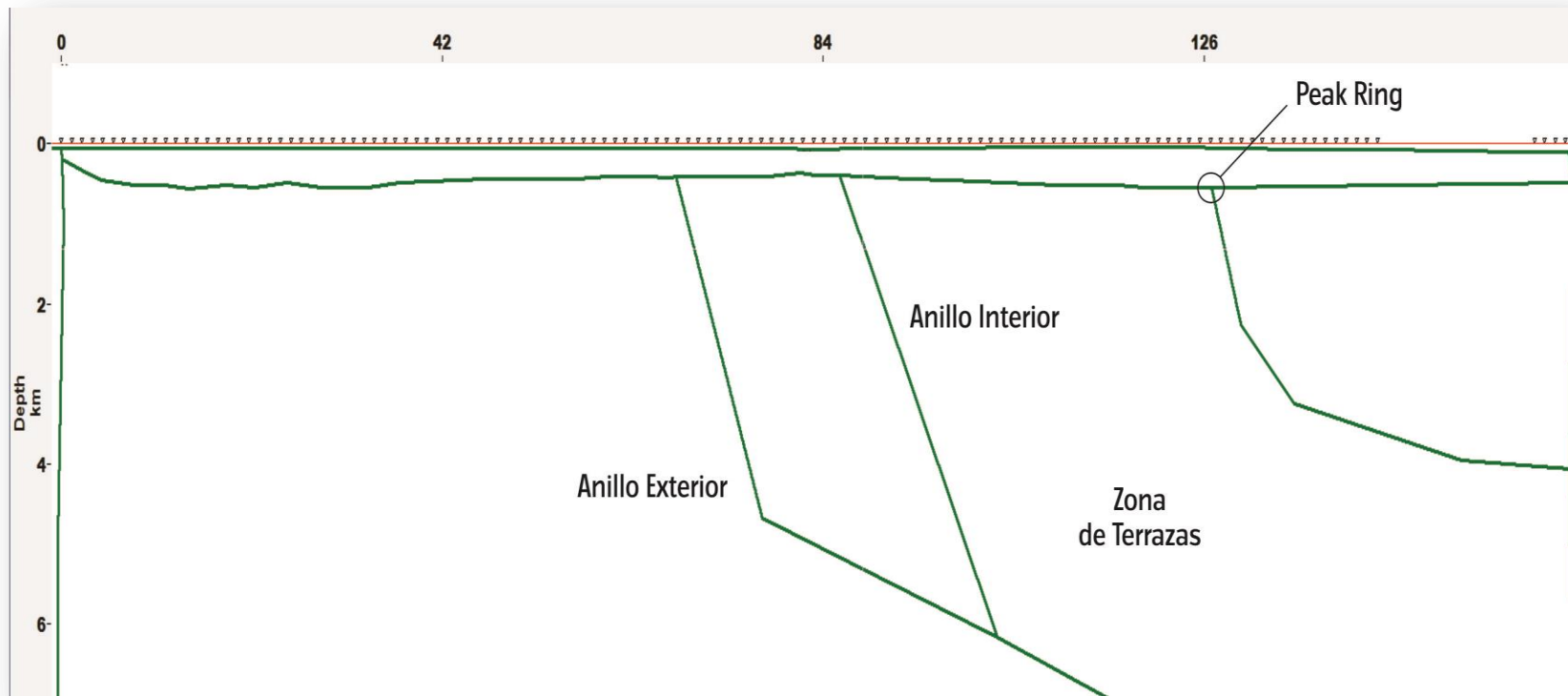


Figura 19. Interpretación estructural de la línea B

## Sísmica

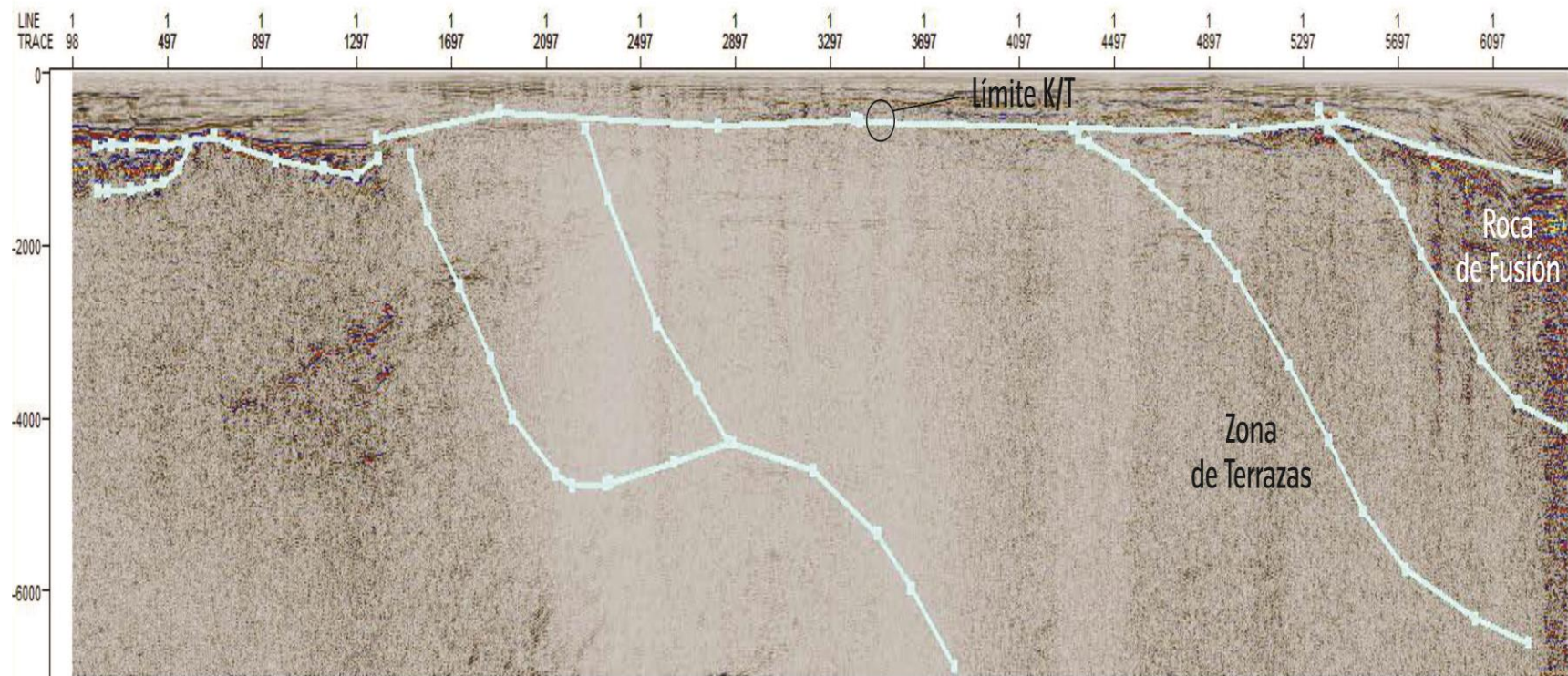


Figura 20. Sección B interpretada por medio de diagramas de líneas.

Se observa la tendencia de fallamiento hacia el centro del cráter así mismo un paquete de rocas de fusión pertenecientes a la parte del oeste del cráter y sigue siendo complicado definir hasta este punto las zonas de falla miento y terrazas.

## Modelo integrado

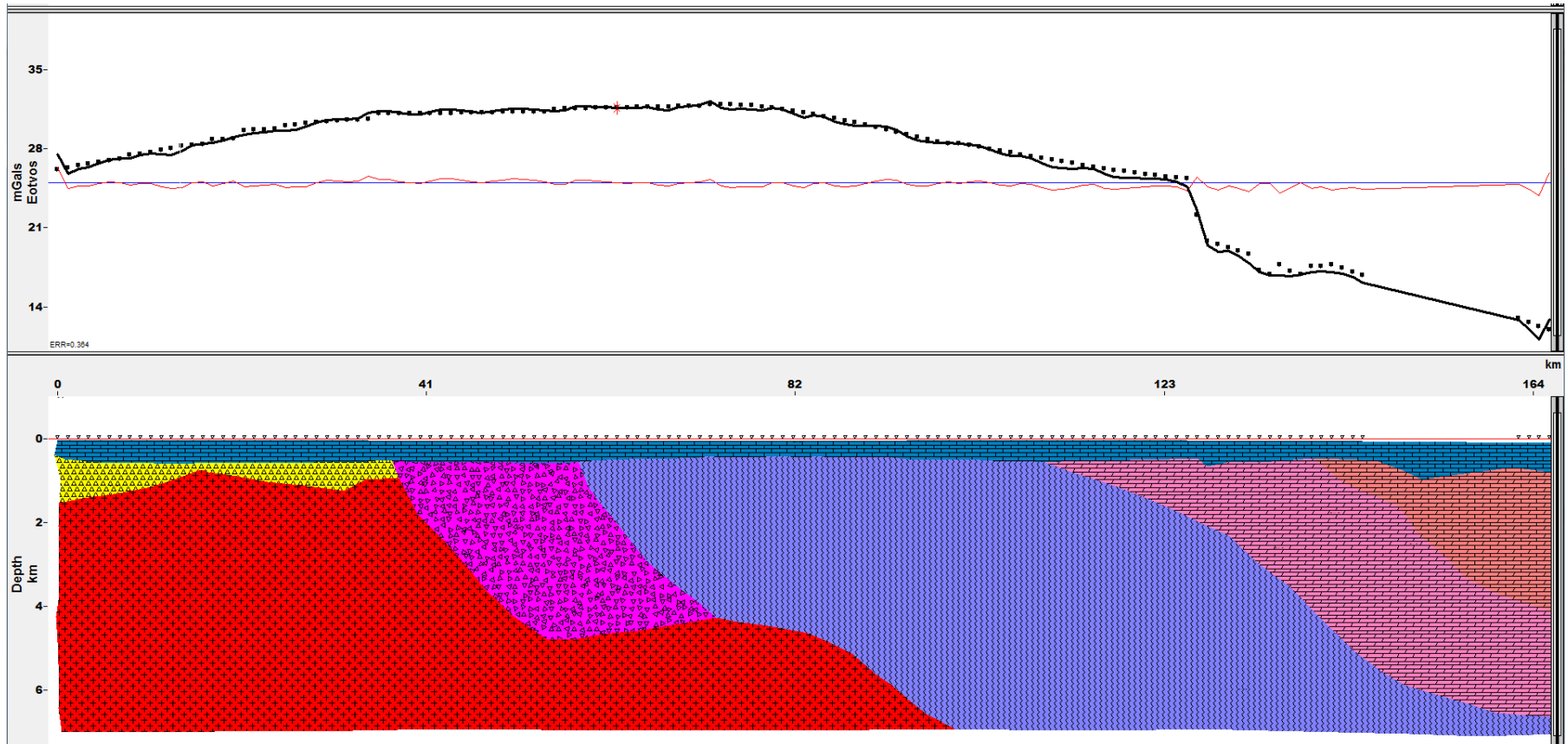


Figura 21. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea B

La interpretación sísmica se acopla a la gravimetría estructuralmente y los contrastes de densidades nos muestra que efectivamente existen zonas de fallamiento complejas las cuales se delimitaran con los siguientes criterios.

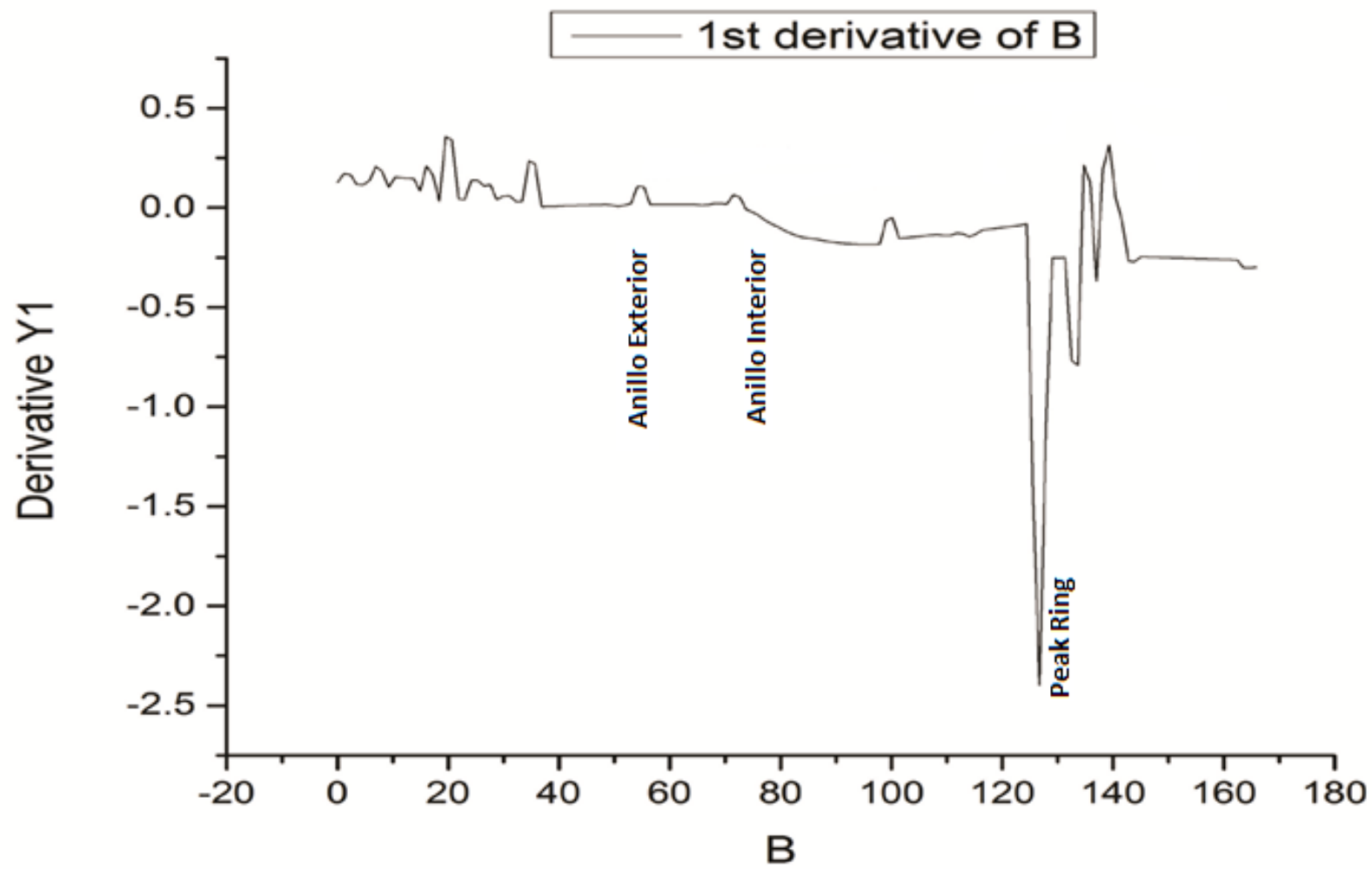


Figura 22. Primera derivada de la línea B

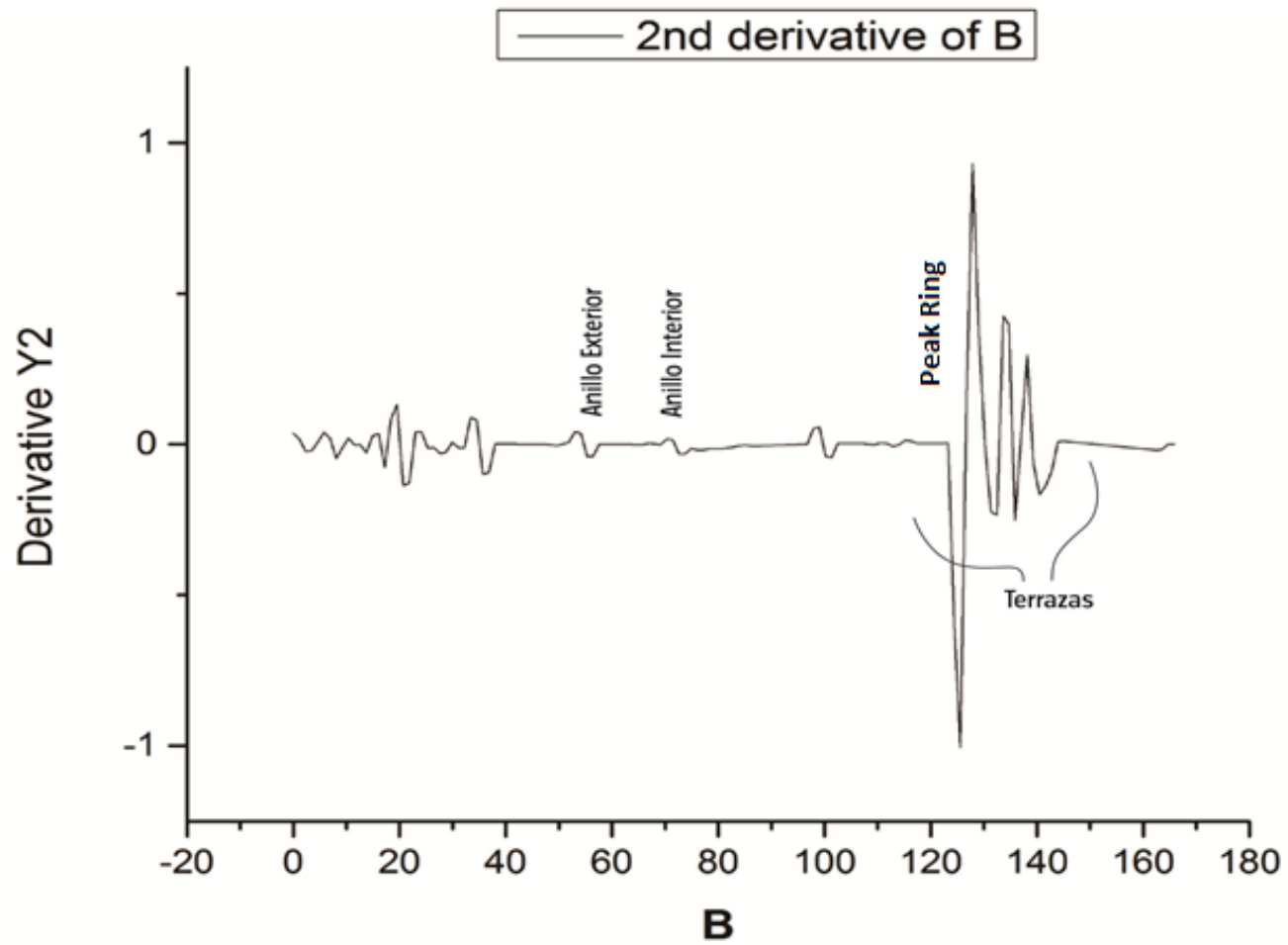


Figura 23. Segunda derivada de la línea B

## Perfil C

El perfil se tomó sobre la línea sísmica C así que esta posee una longitud aproximada de 110 km y pasa a 29 km del cráter y toma una dirección SW-NE.

## Modelo simple

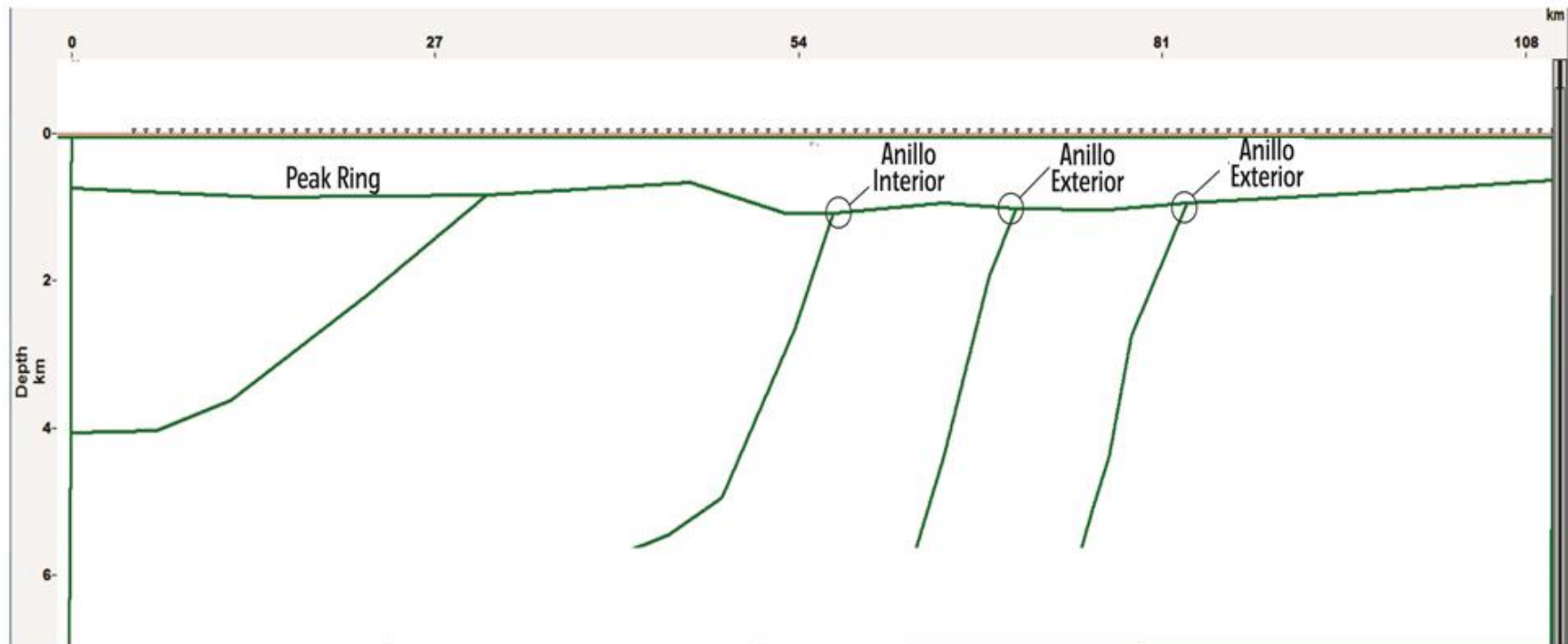




Figura 24. Interpretación estructural de la línea C

### Sísmica

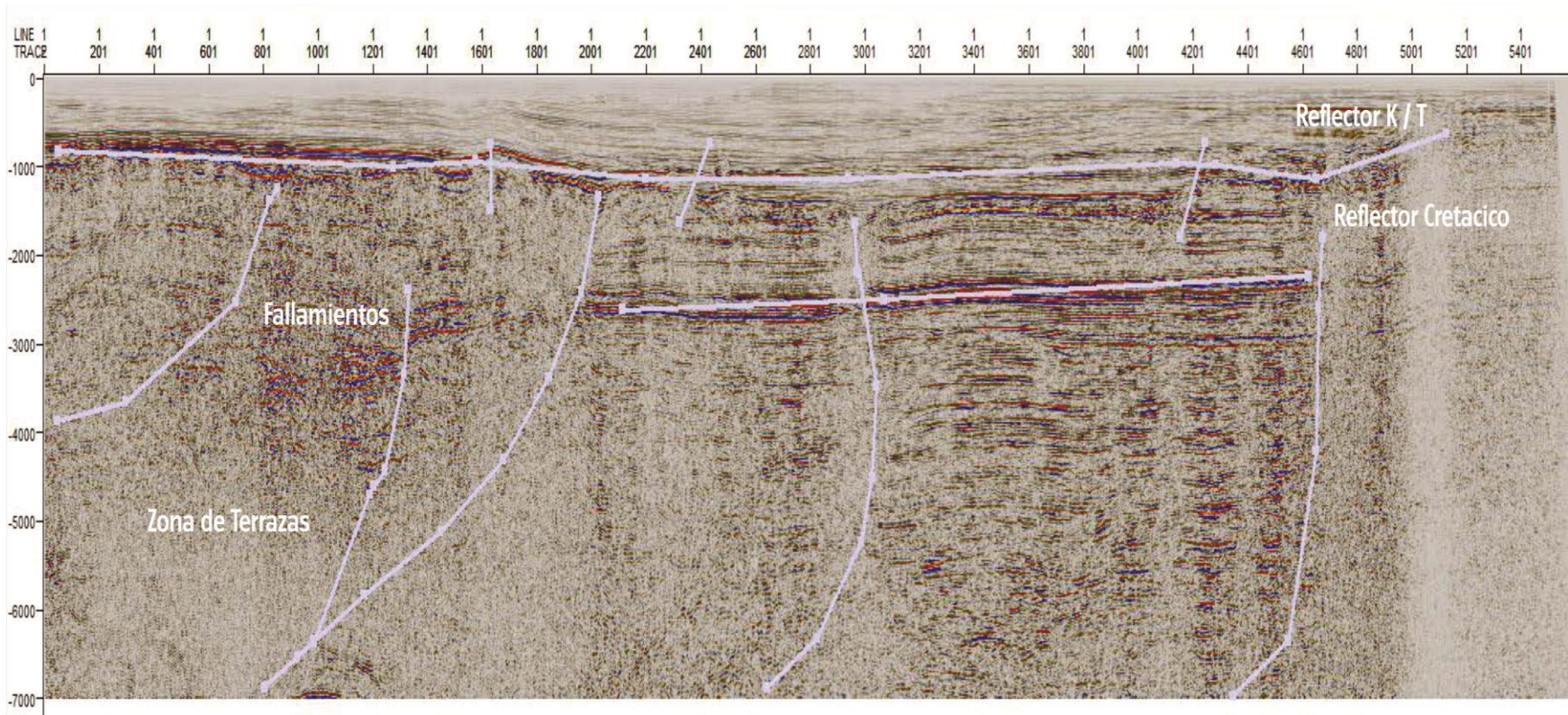


Figura 25. Sección C interpretada por medio de diagramas de líneas.



La línea sísmica C aquí podemos observar donde se localizan los reflectores K/T y secuencias carbonatadas del Cretácico, así como las zonas de terrazas.

### Modelo integrado

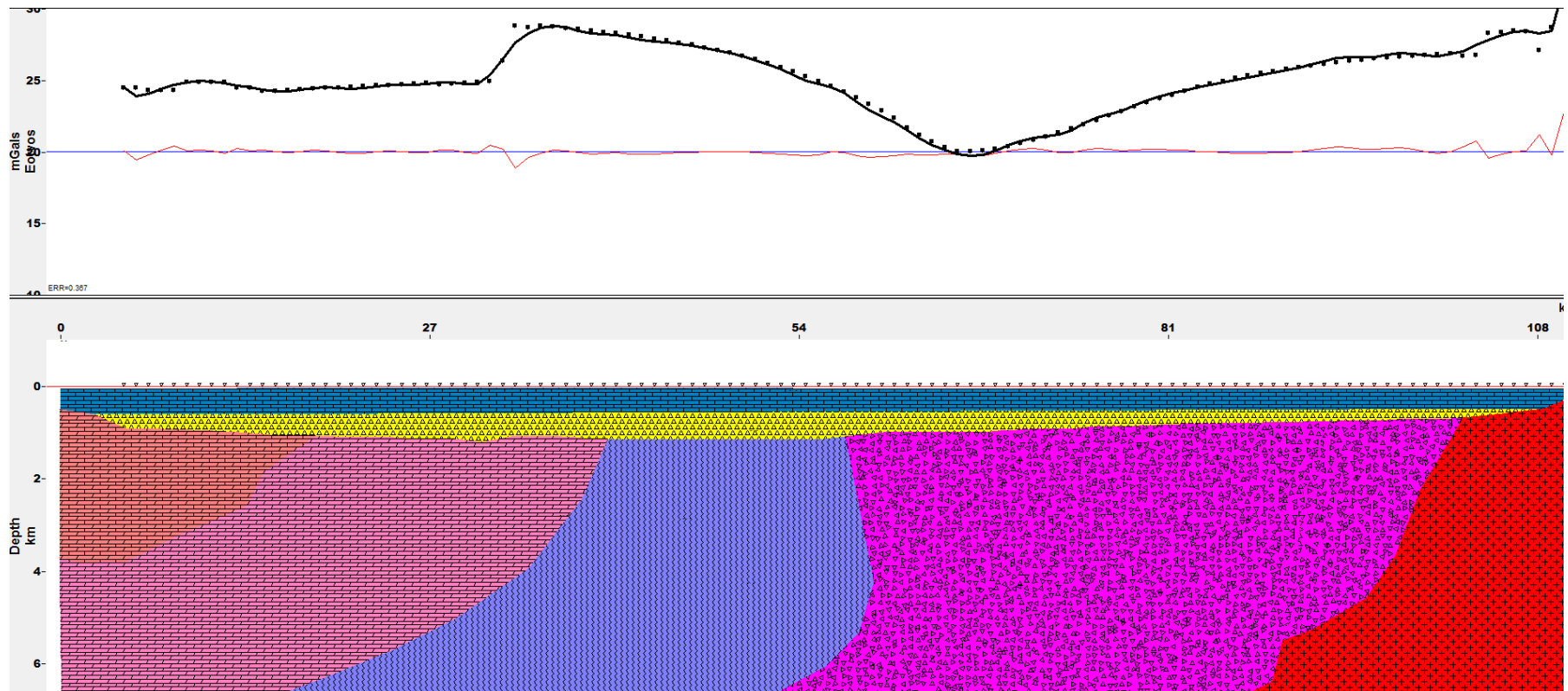


Figura 26. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea C

La estructura interpretada de la sísmica concuerda con la gravimetría y a grandes rasgos y observando cómo se generan los fallamiento normales hacia el centro del cráter lo cual nos deja hacer un juego con el contraste de densidades permitiéndonos acoplar estructuralmente con la gravimetría.

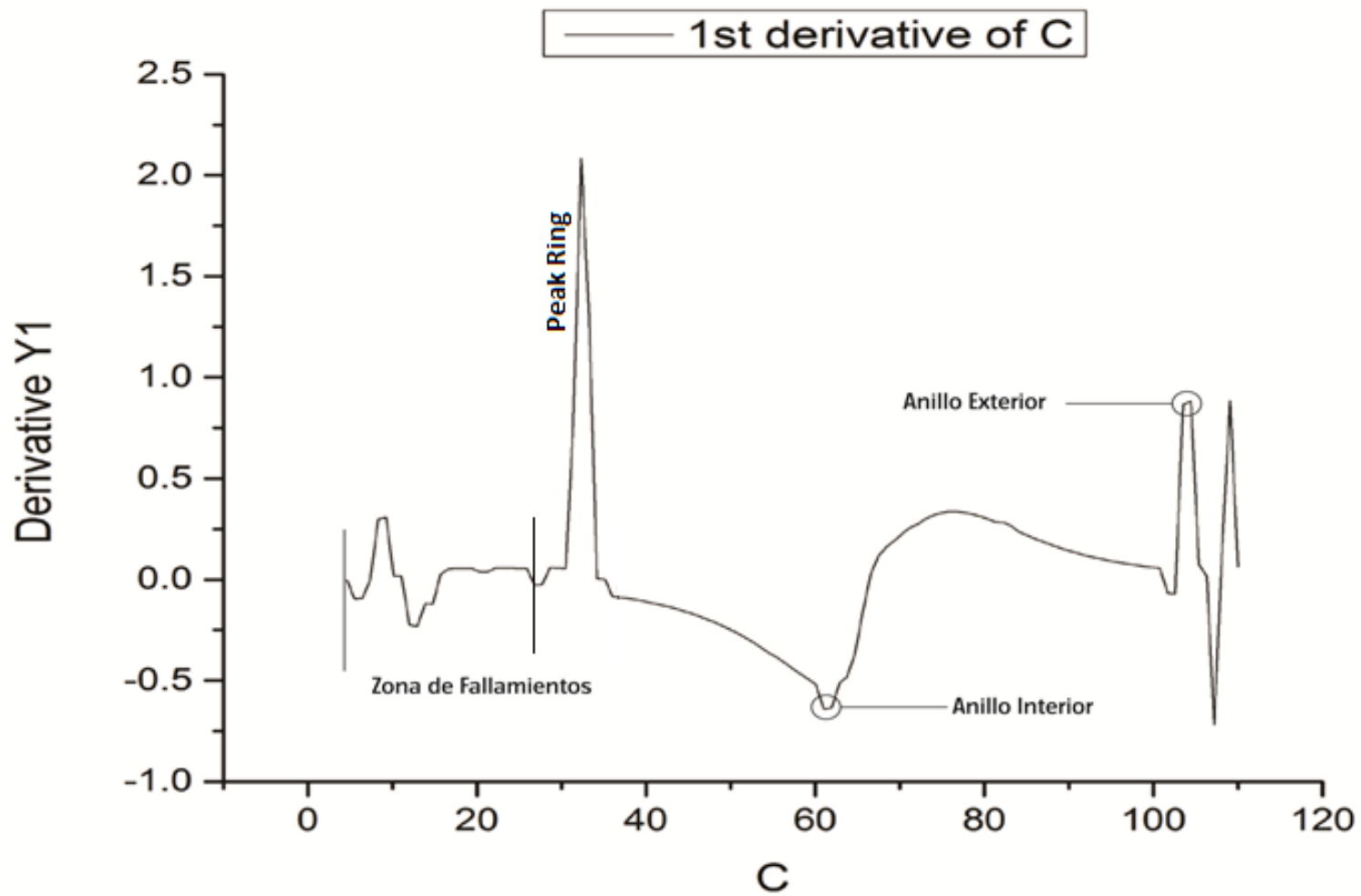


Figura 27. Primera derivada de la línea C

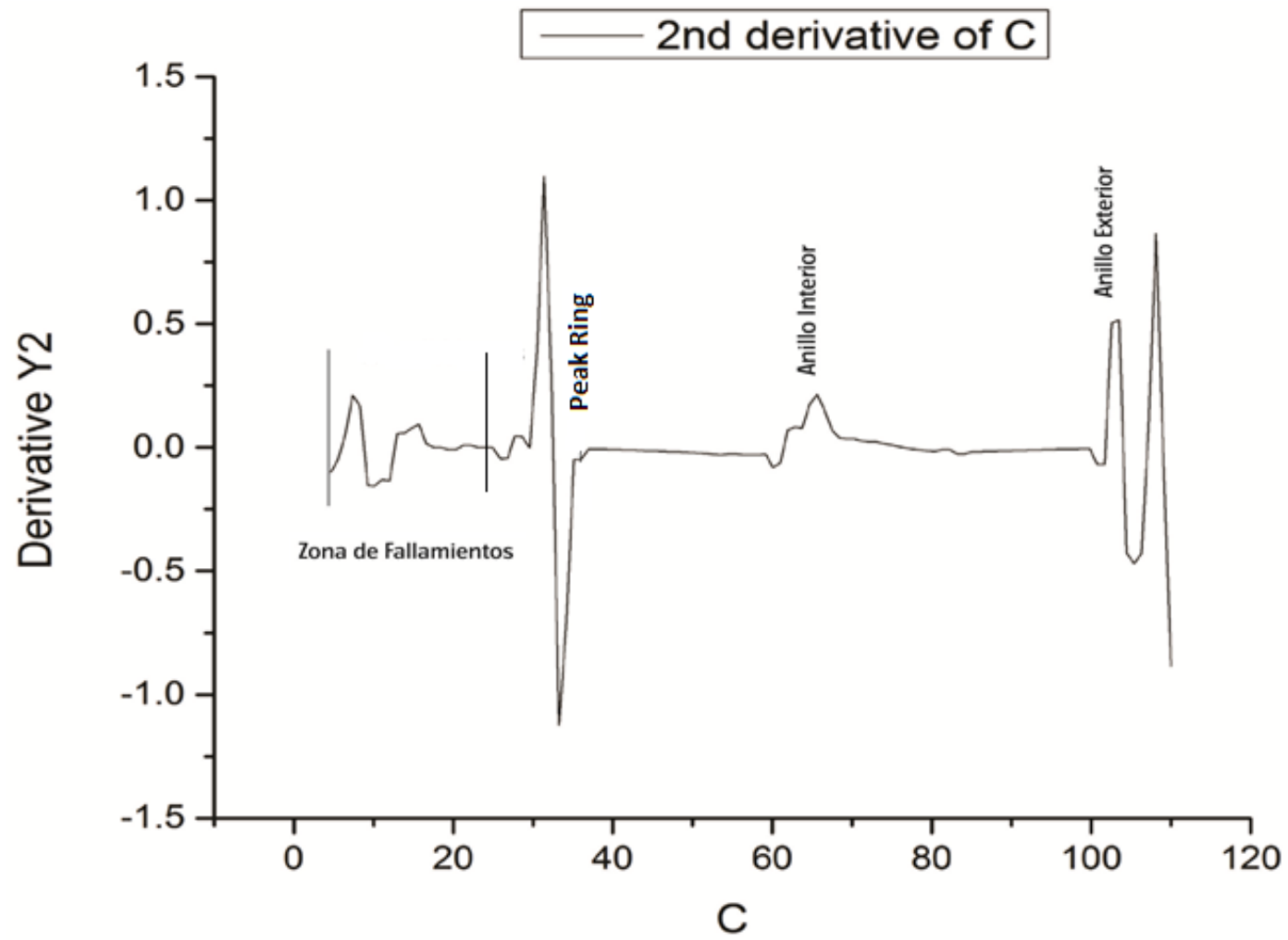


Figura 28. Segunda derivada de la línea C

## Perfil R1

El perfil R1 tiene una longitud aproximada de 75 km y su dirección va de SW-NE

### Modelo simple

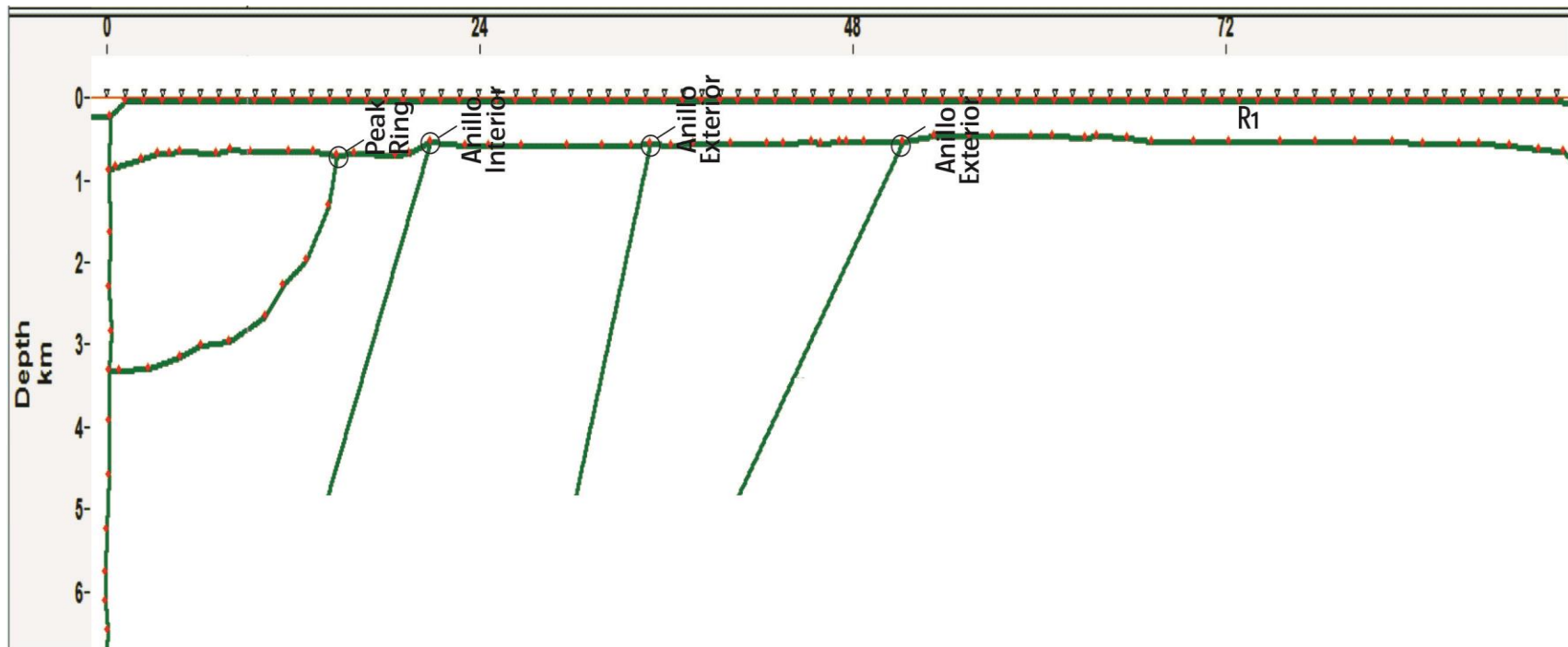


Figura 29. Interpretación estructural de la línea R1



## Sísmica

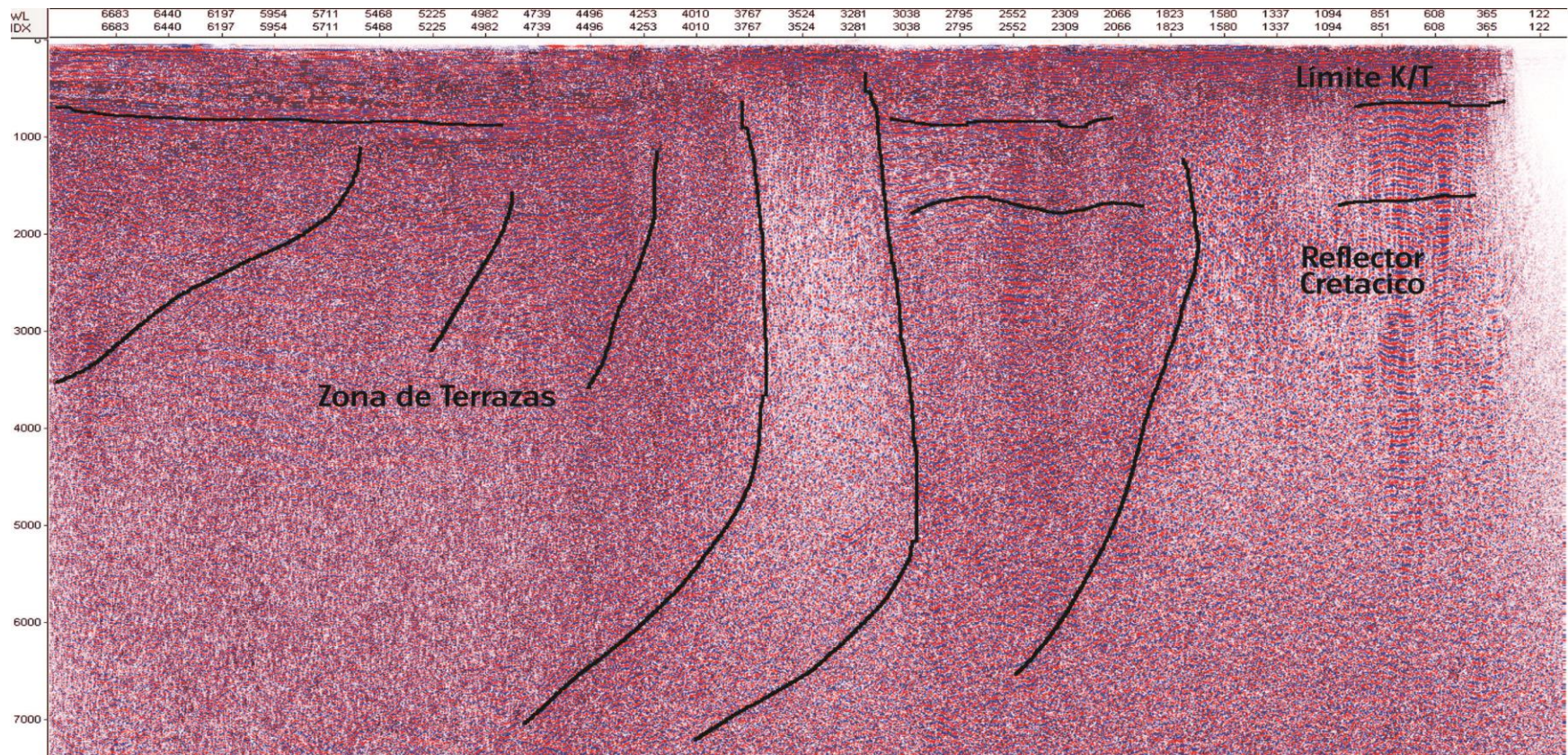


Figura 30. Sección R1 interpretada por medio de diagramas de líneas.

La línea R1 se pueden observar fácilmente el anillo exterior y el interior fácilmente, al igual que el límite de K/T, en la parte superior izquierda se puede observar el peak ring seguido de la zonas de terrazas.

## Modelo integrado

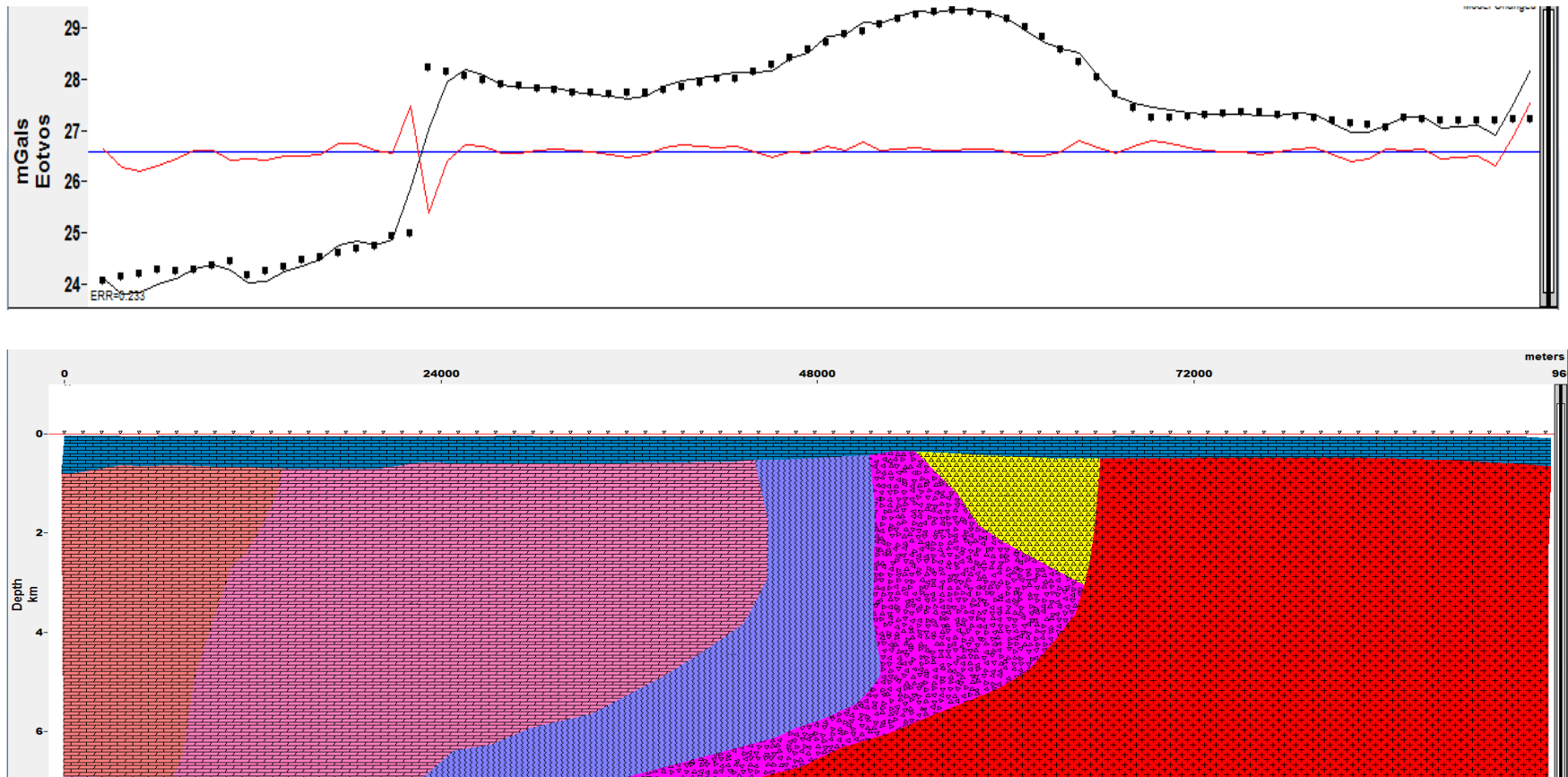


Figura 31. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea R1

La interpretación sísmica se acopla a la gravimetría estructural y a los contrastes de densidades, se puede observar las fallas las cuales nos dan resultado a los anillos con los siguientes criterios.



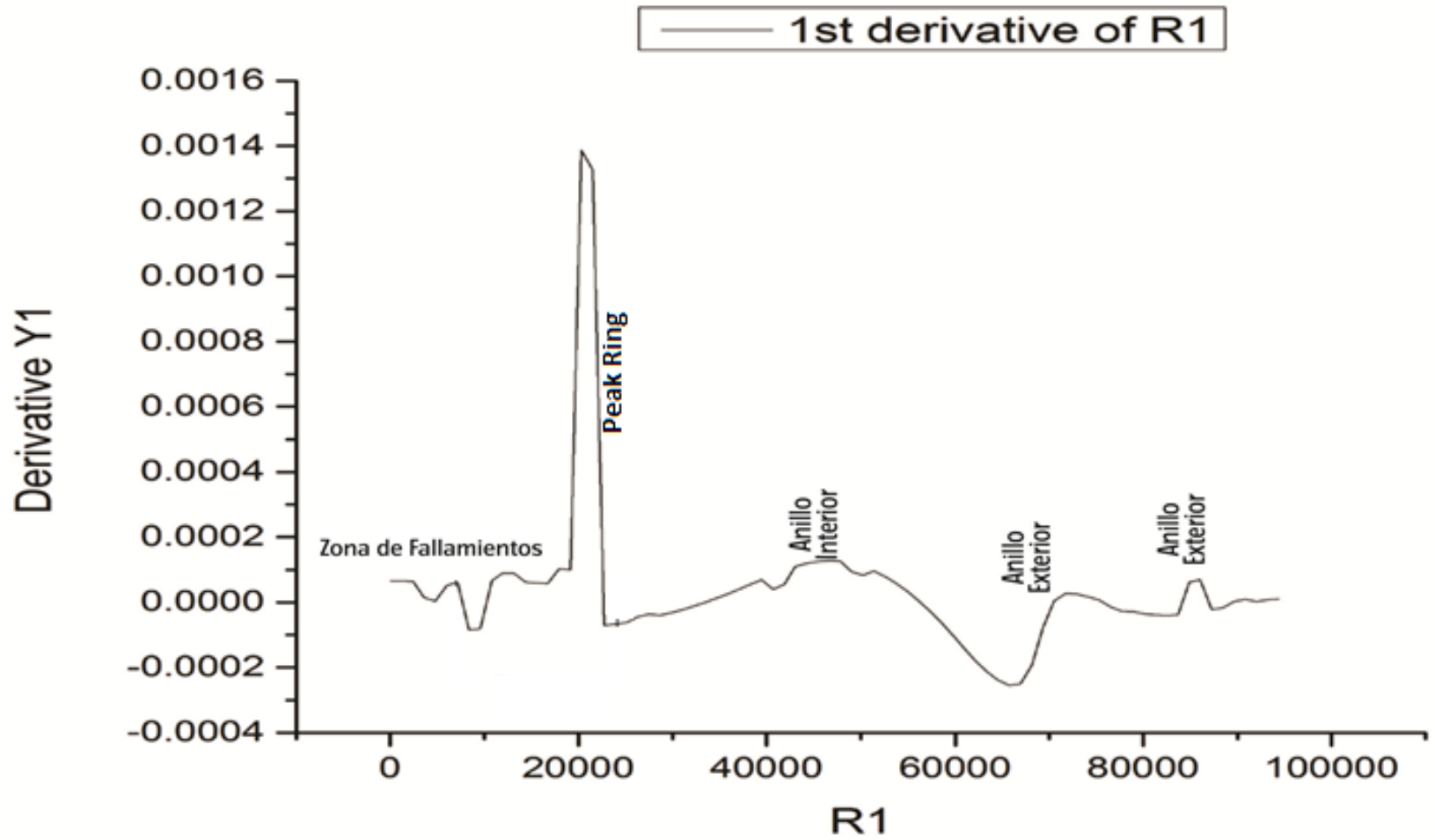


Figura 32. Primera derivada de la línea R1

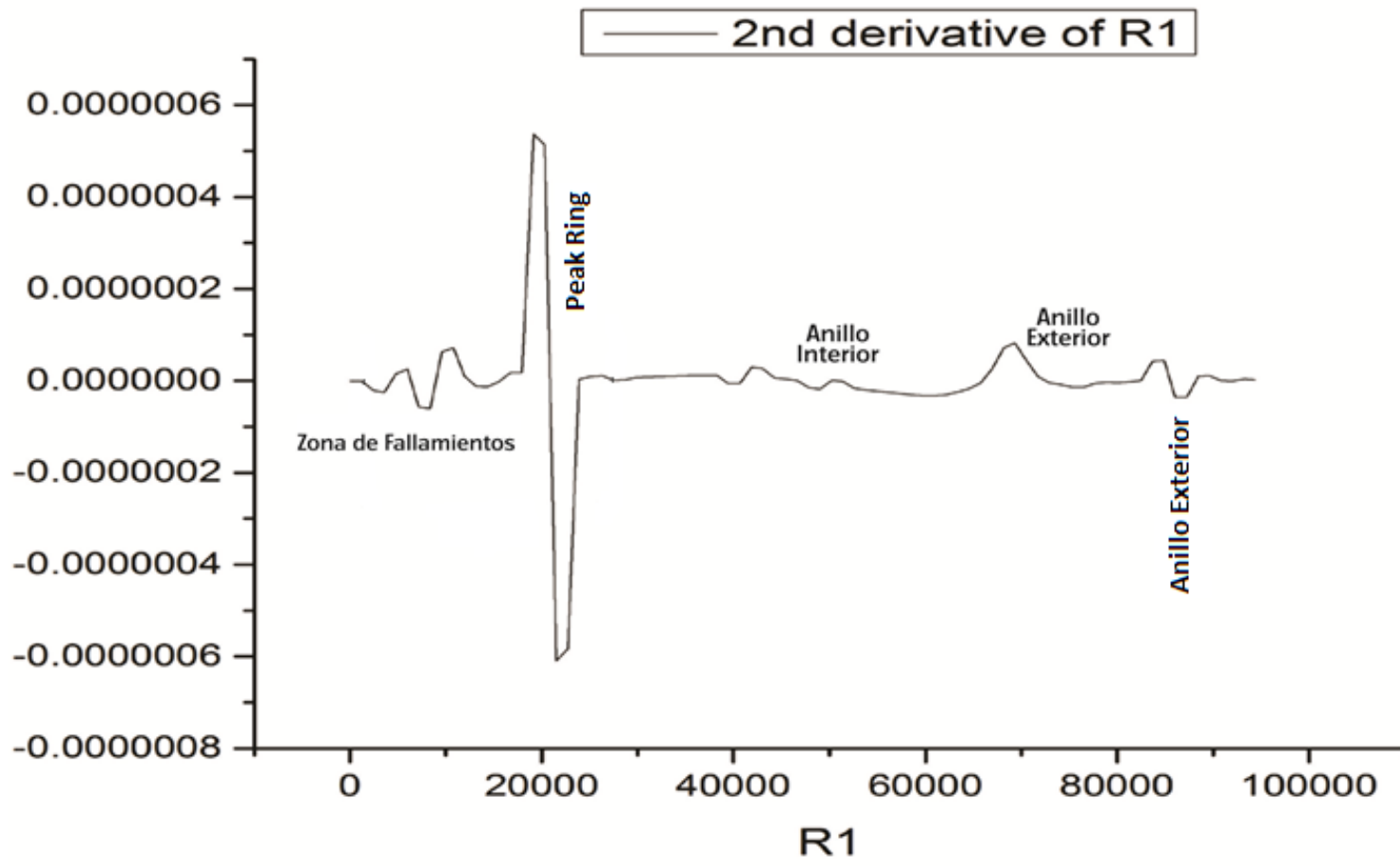


Figura 33. Segunda derivada de la línea R1



## Perfil R3

El perfil R3 tiene una longitud aproximada de 130 km y su dirección va de SE-NW.

## Modelo simple

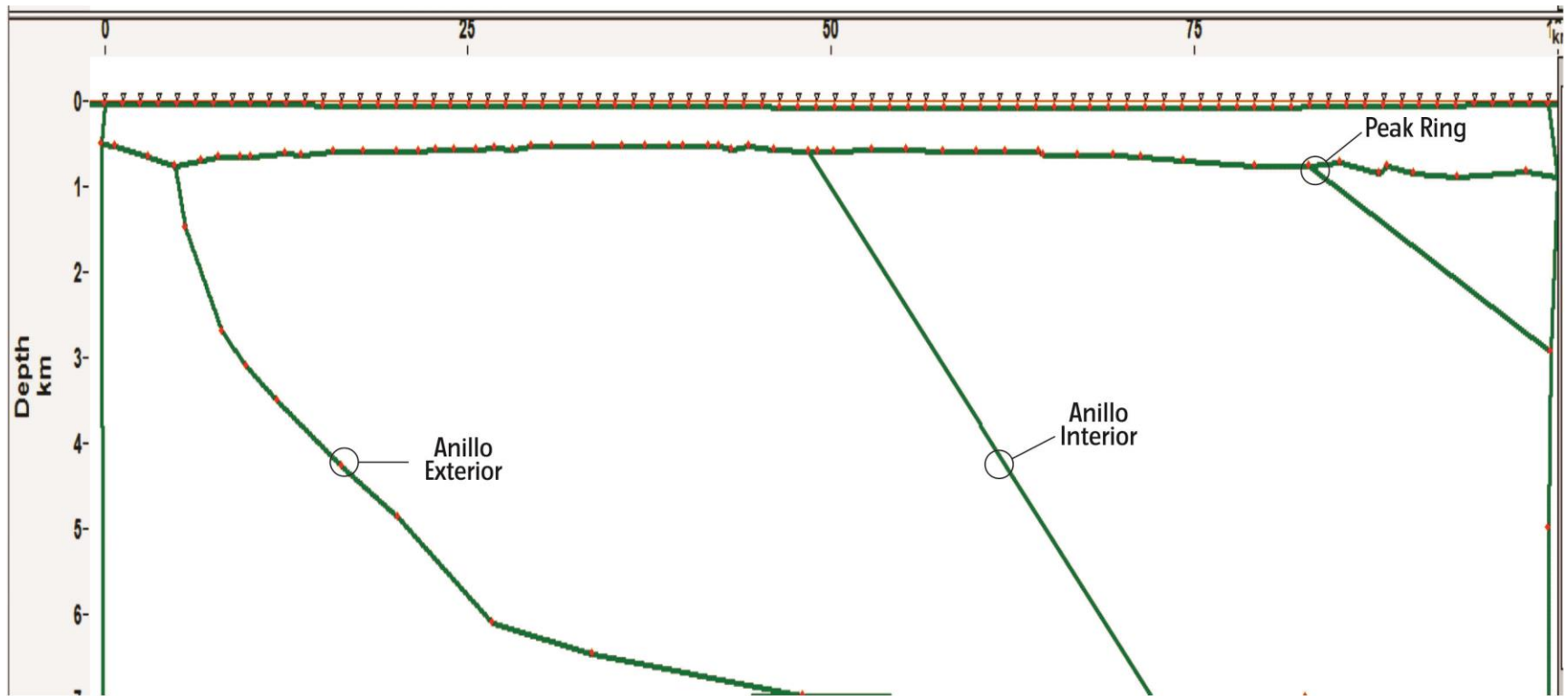


Figura 34. Interpretación estructural de la línea R3

## Sísmica

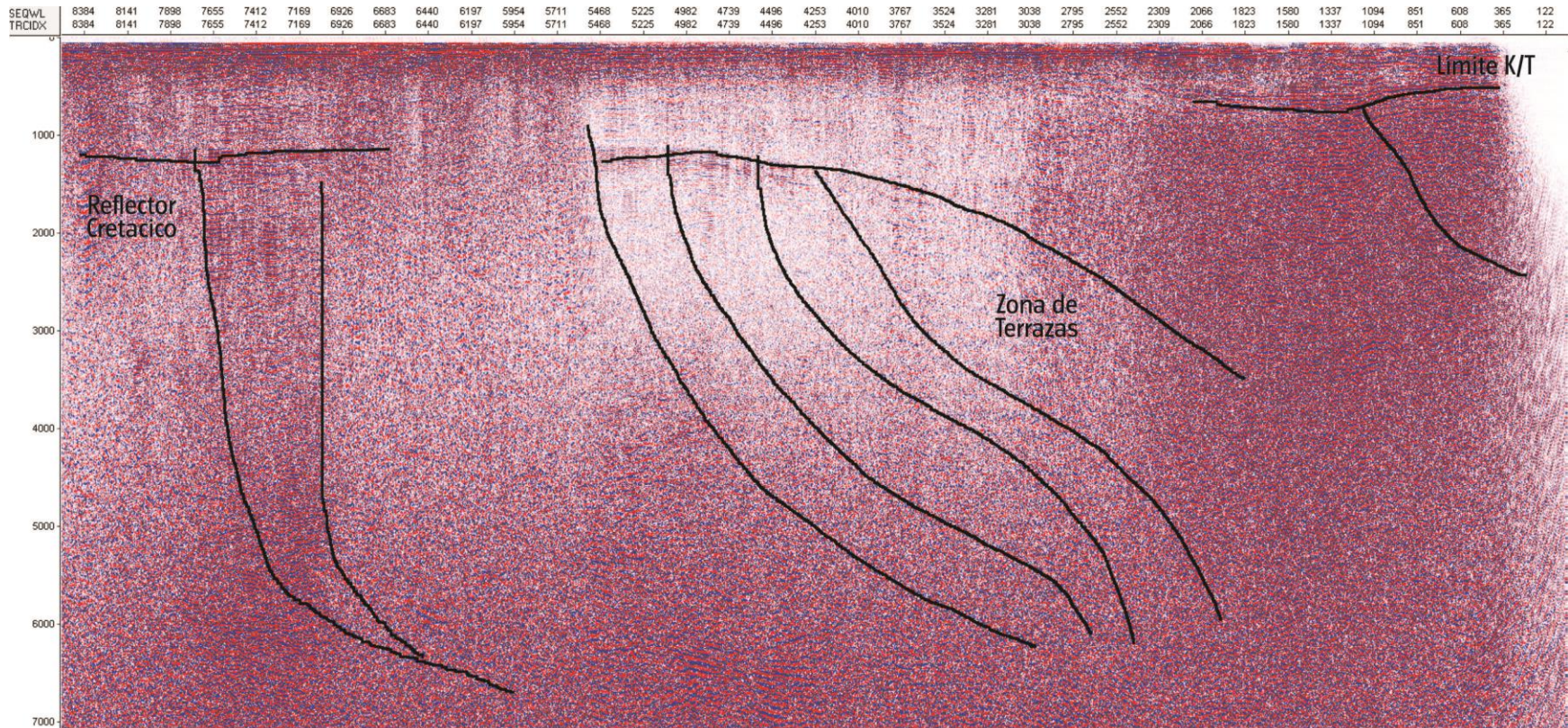


Figura 35. Sección R3 interpretada por medio de diagramas de líneas.

Línea R3 tras realizar los filtros necesarios se obtuvo esta imagen en la cual se pueden observar, los anillos exterior e interior respectivamente, también se localizan los límites del reflector del cretácico, zonas de terrazas lo cual se argumenta con los siguientes datos.



## Modelo integrado

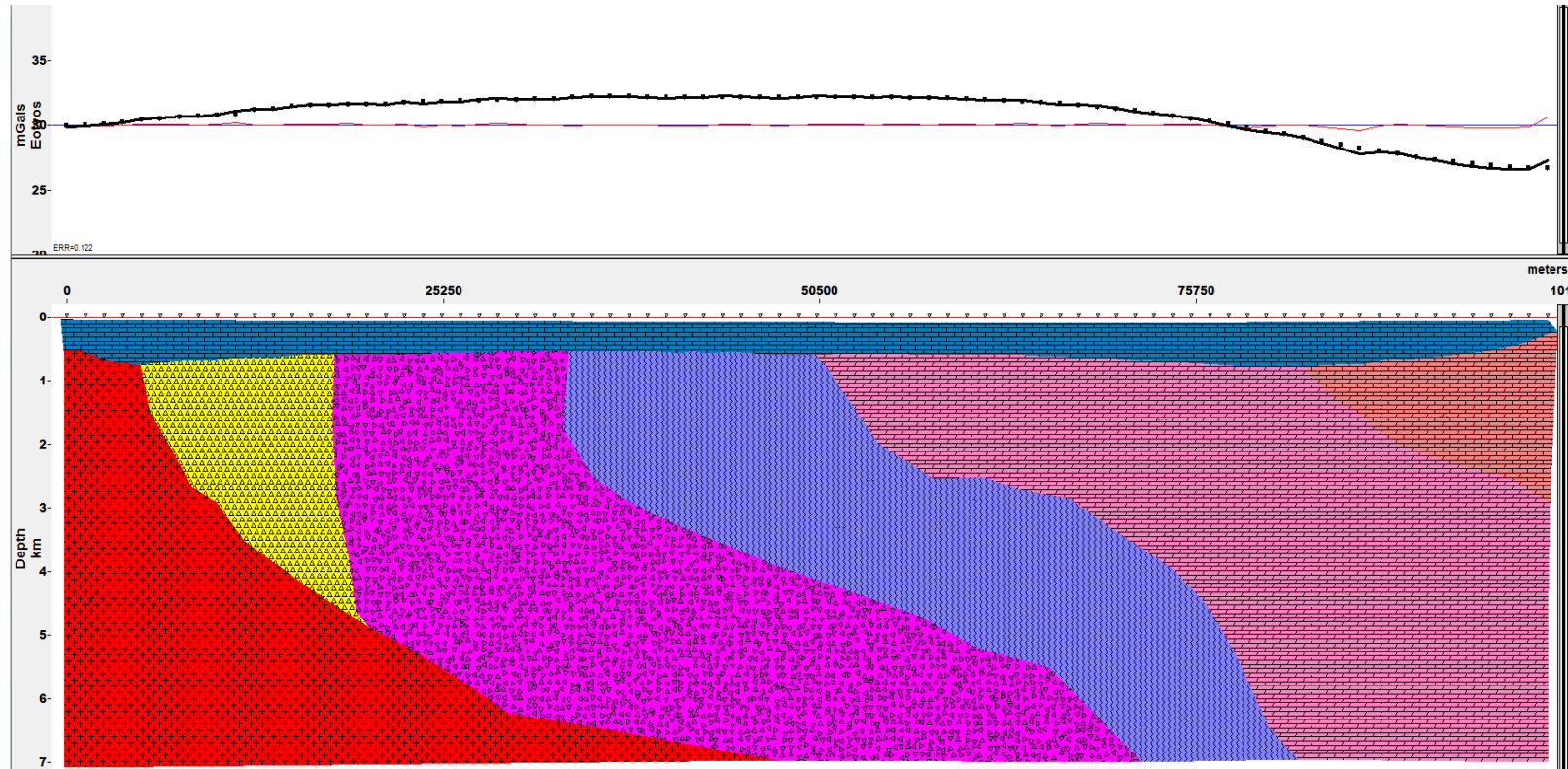


Figura 36. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea R3

La interpretación sísmica se acopla a la gravimetría estructural, ya que conforme a los contrastes realizados en las densidades se tiene un mejor modelo y se pueden observar las características principales de un cráter complejo con los siguientes argumentos.

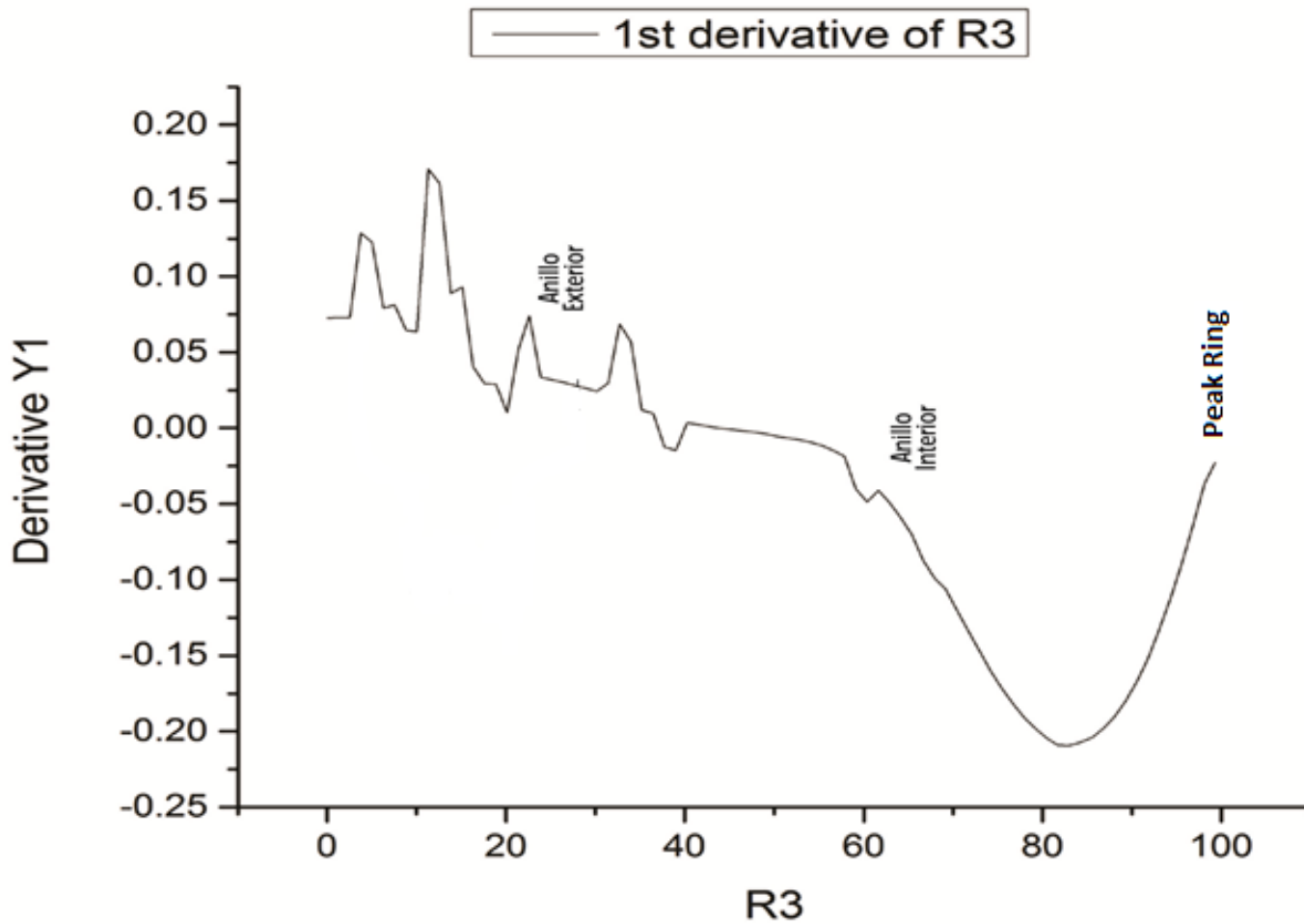


Figura 37. Primera derivada de la línea R3

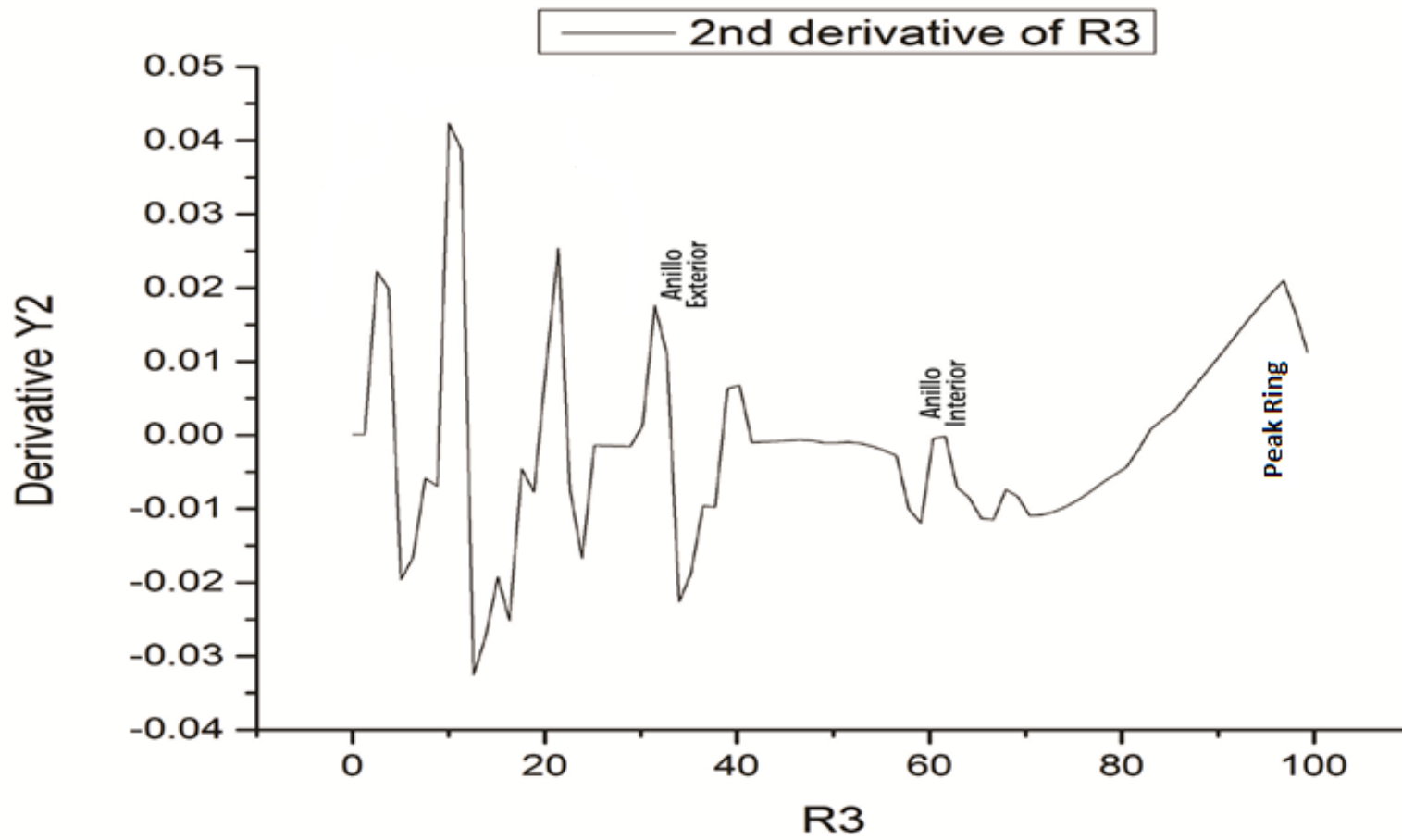


Figura 38. Segunda derivada de la línea R3

## Perfil Pozos

Para este modelo se realizó la interpretación de un perfil gravimétrico a través de los pozos Y1, T1, Y6 y tiene una longitud aproximada de 143 km y se utilizó la litología de dichos pozos para poder realizar el modelado.

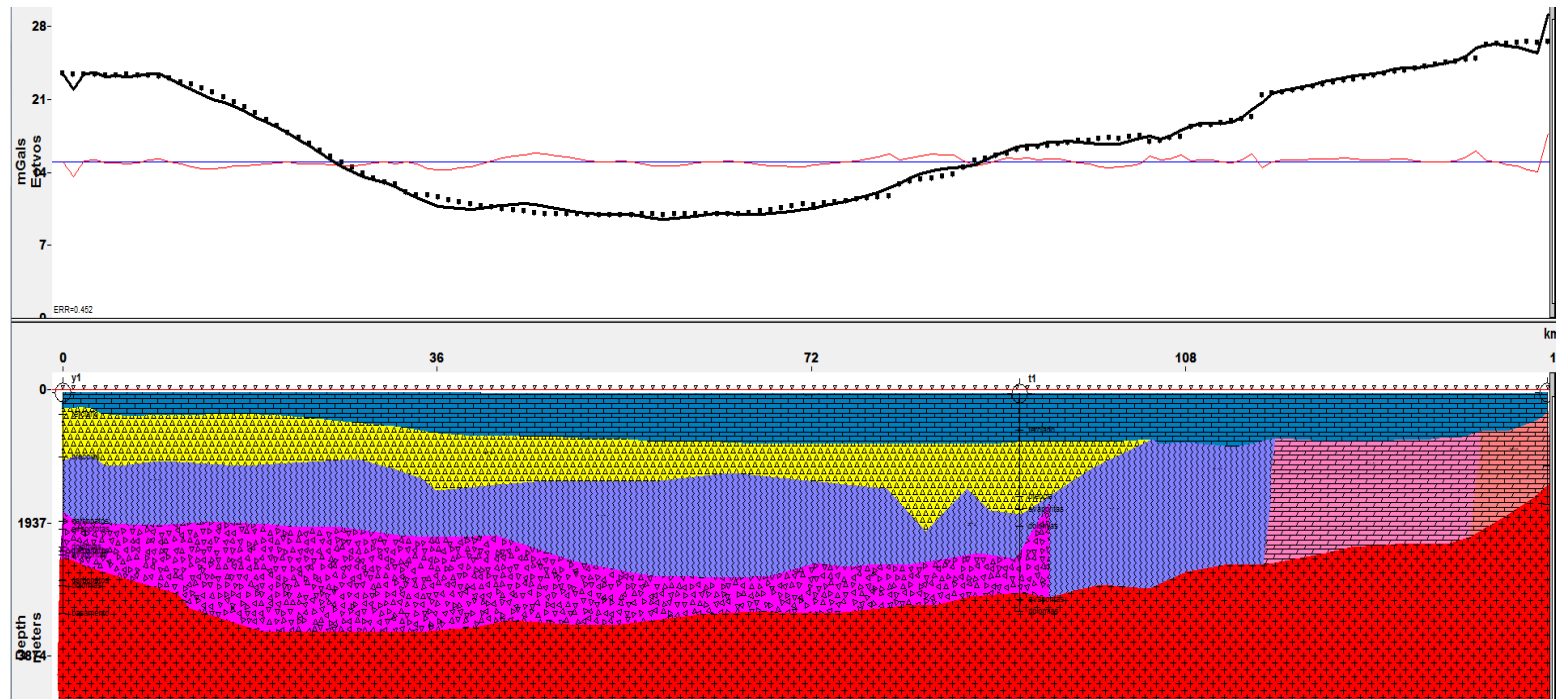


Figura 37. Modelo interpretado en el programa GM-SYS de la línea pozos.

El modelo presenta una estructura muy compleja, en base a los criterios de la primera y segunda derivada, la cual nos dice que existe una zona de micro fallamientos a profundidades muy someras.

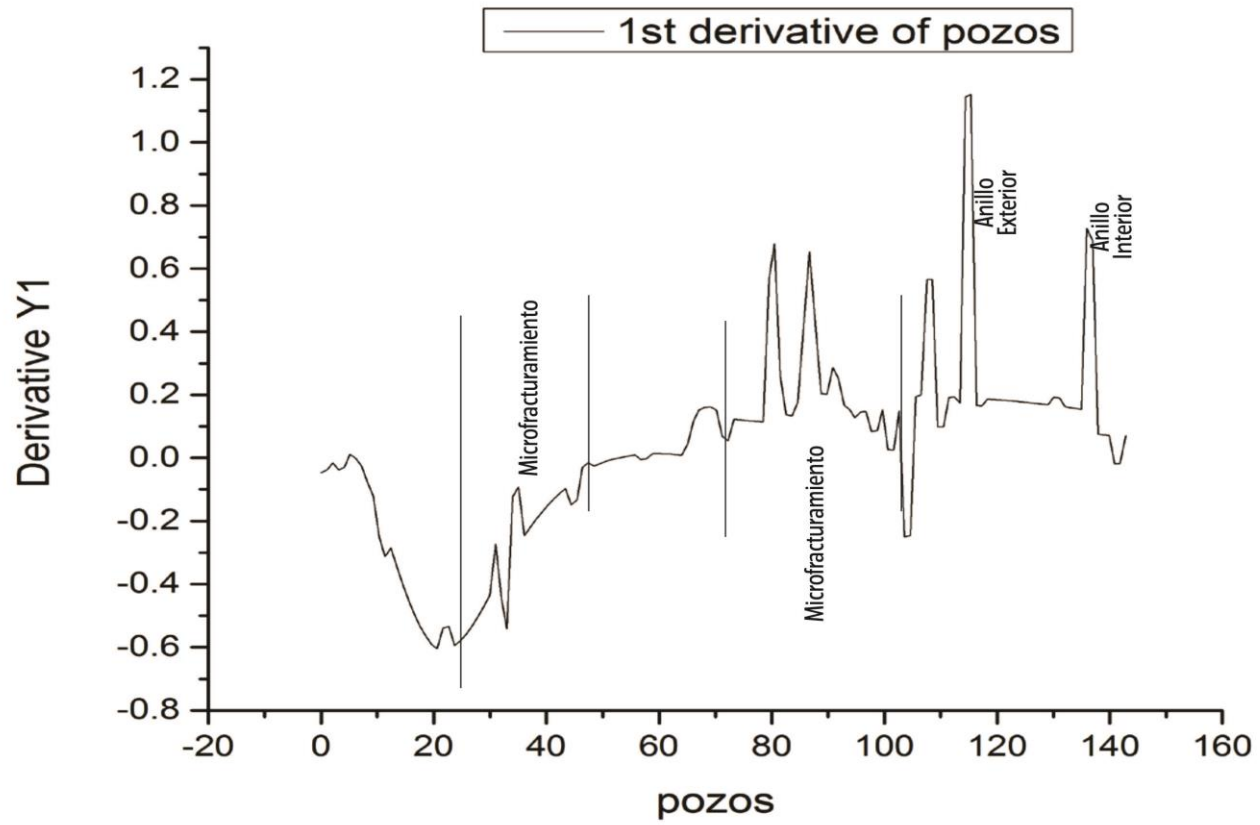


Figura 38. Primera derivada de la línea pozos.

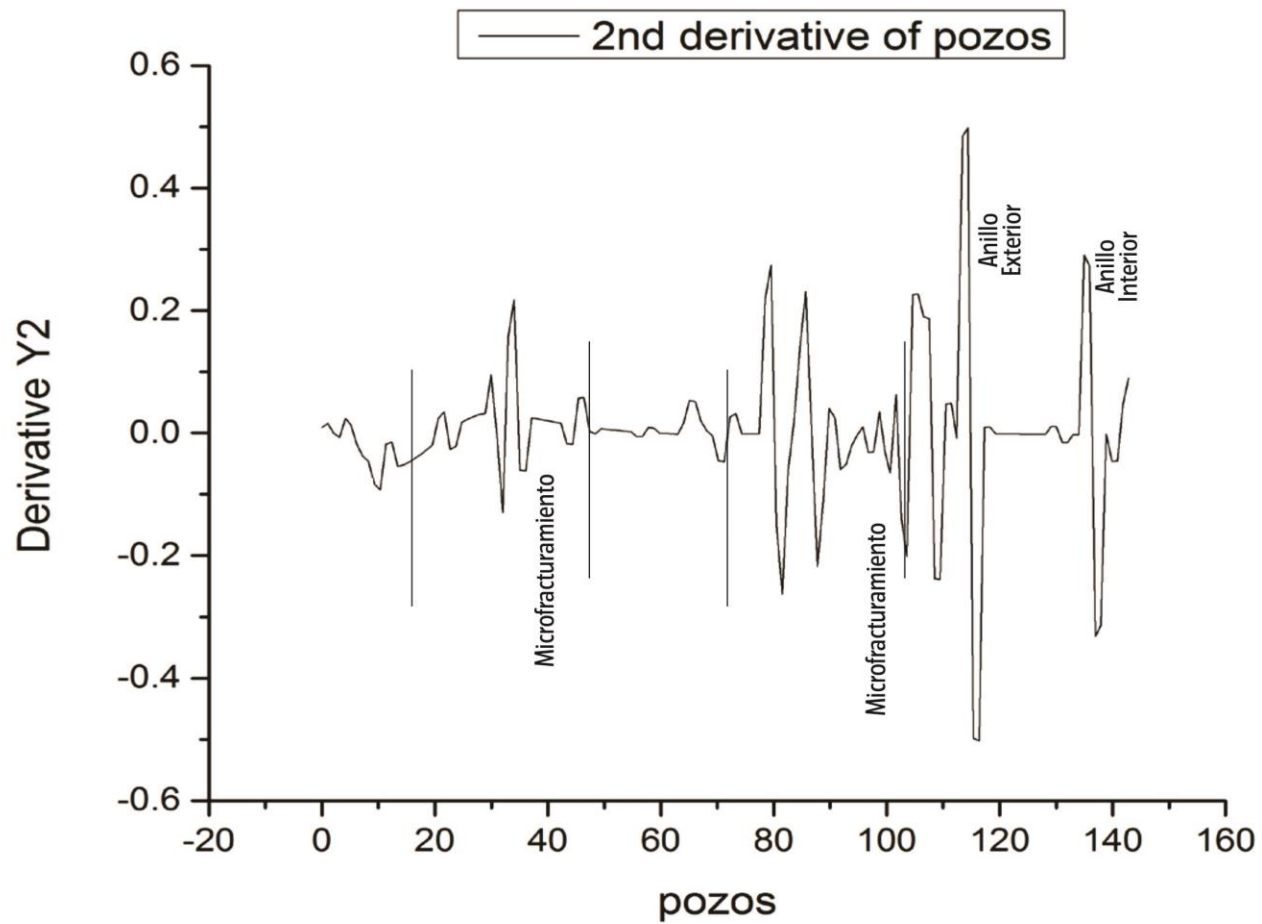
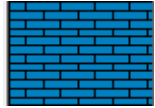


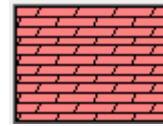
Figura 39. Segunda derivada de la línea pozos.



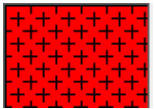
## Litología



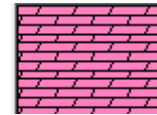
Carbonatos Paleógeno (1.8-2 gr/cc)



Suevitas (2-2.8 gr/cc)



Carbonatos del cretácico (2.4-2.7 gr/cc)



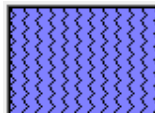
Dolomías (2.4-2.67 gr/cc)



Brechas (1.6-2.6 gr/cc)



Zona de terrazas-unidad de baja velocidad (2.3-2.66 gr/cc)



Melt (2.3-2.65 gr/cc)

## VII. MODELO FINAL

Usando el software especializado VOXLER y tras hacer un muestro por capa en todos los perfiles integrados de gravimetría y sísmica de reflexión, nos permitió generar este modelo en 4 dimensiones que fueron (X, Y, Z,  $\rho$ ) donde  $\rho$  es densidad y Z profundidad.

Este modo nos permite observar la distribución litológica en densidad en función de la profundidad y así mismo analizar las estructuras y el comportamiento del cráter complejo de impacto de Chicxulub.

Al realizar la interpolación de estos datos se usó una malla de 50x50x50 con el método de distancia inversa y se le aplicó un filtro de promedio esférico, el cual nos ayudó a visualizar de manera más eficaz el modelo.

A continuación se mostraran unas imágenes de estructuras litológicas más importantes del cráter de Chicxulub.

Vista en cubo sólido donde se pueden observar una capa superior con una densidad aproximada de entre 1.8-2 (g/cm<sup>3</sup>) que es todo el K-T

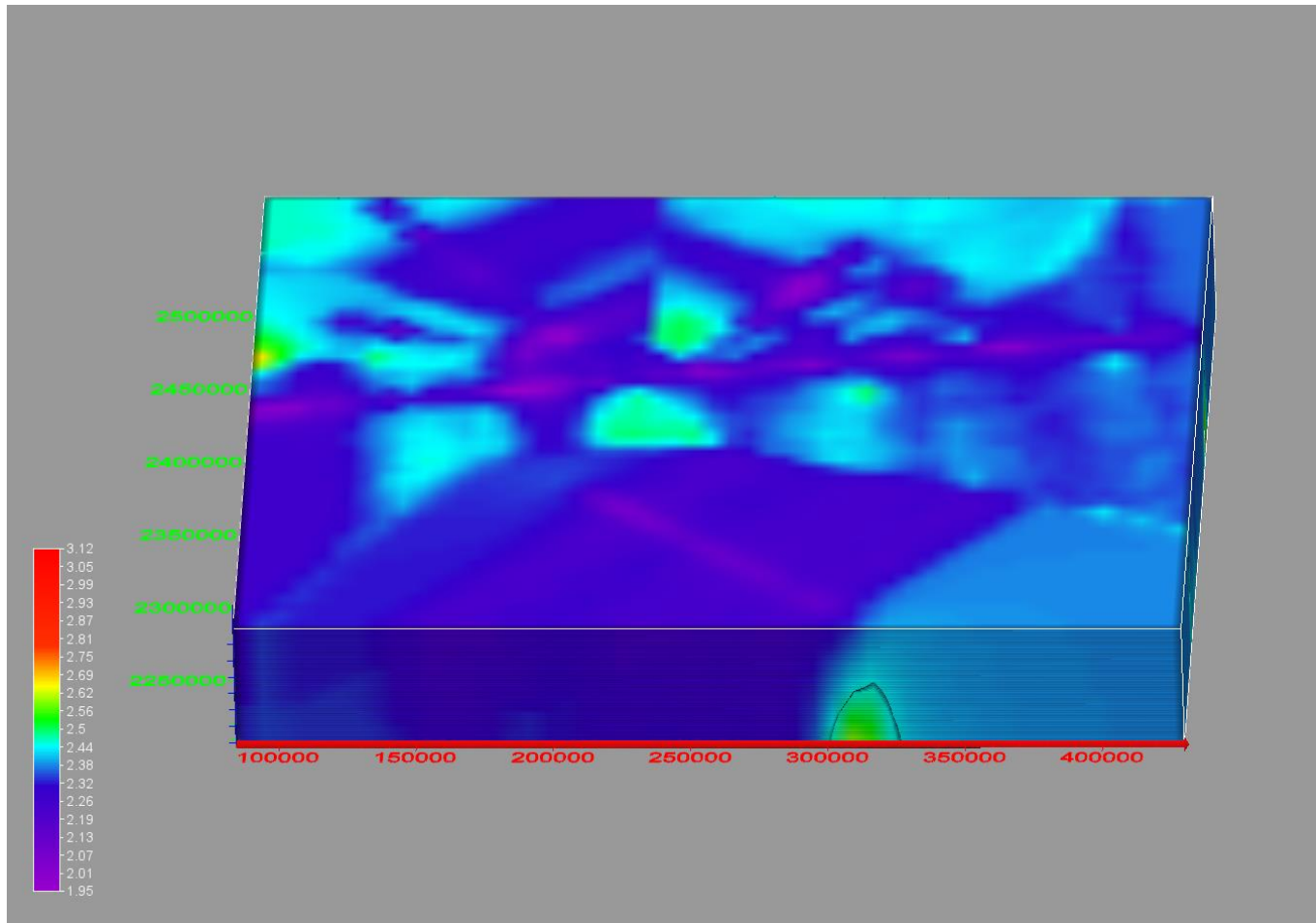


Figura 40. Vista en cubo sólido

## Brechas

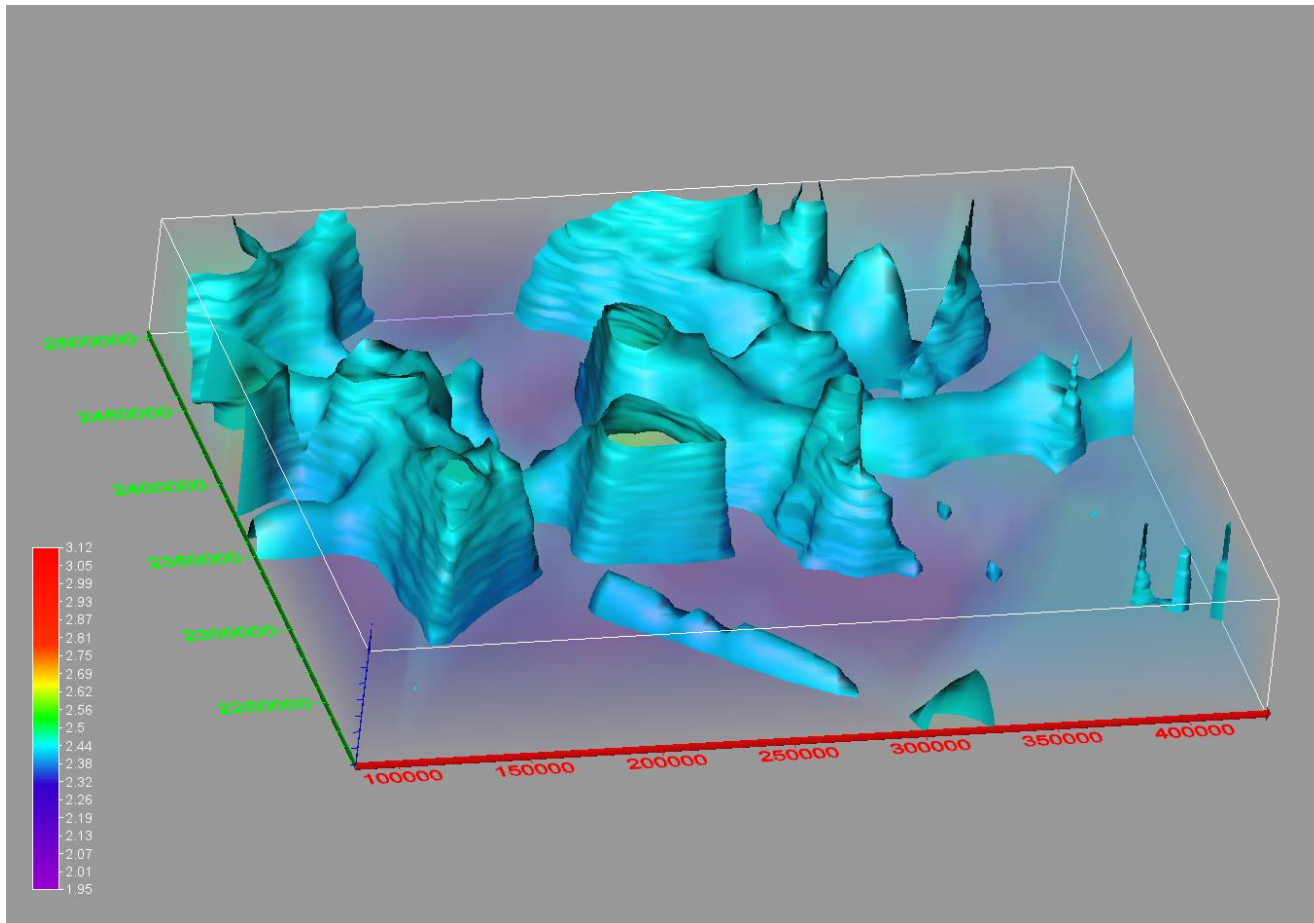


Figura 41. Distribución de brechas a través del cráter

Se observa la gran distribución de brechas a través de todo el cráter, tiene una densidad de entre 2.5-2.38 (g/cm<sup>3</sup>)

## Rocas metamorfoseadas

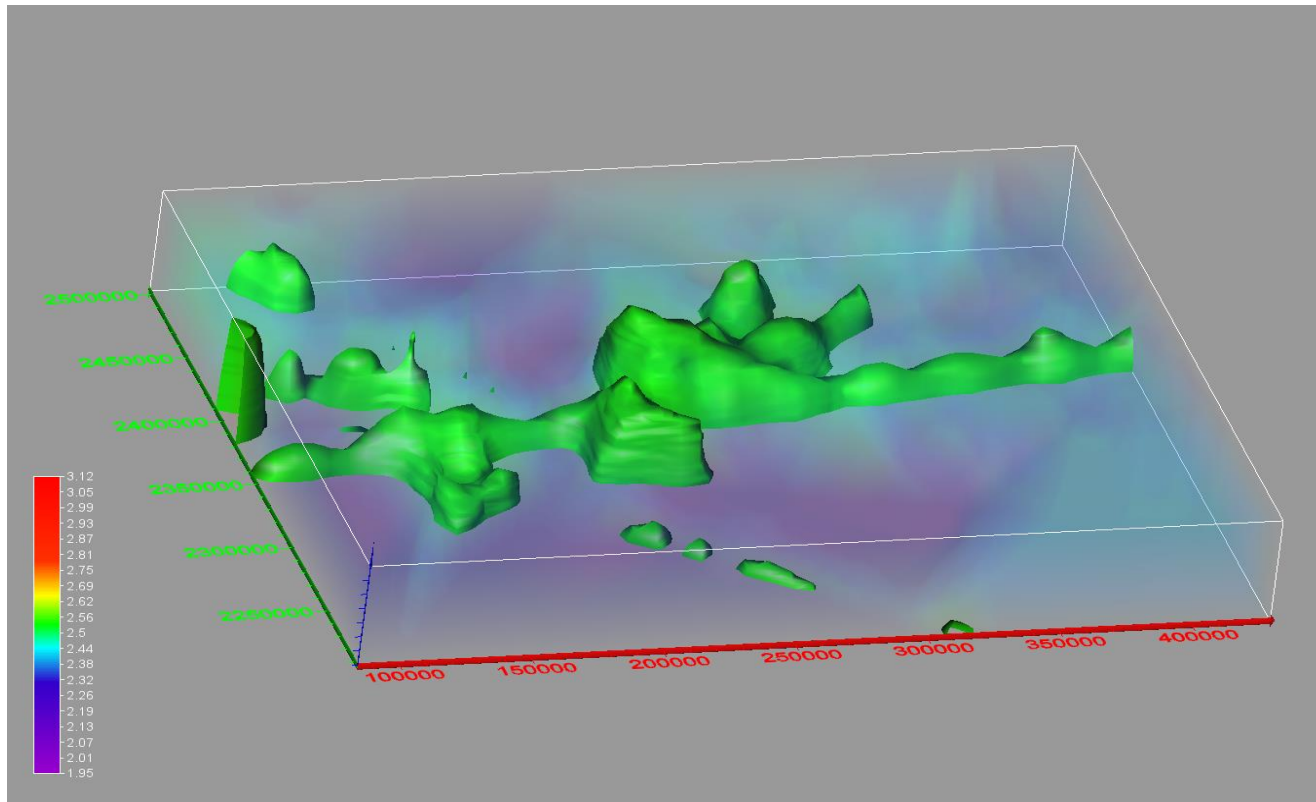


Figura 42. distribución de rocas metamorfoseadas a través del cráter.

Debido a las condiciones generadas por el impacto las rocas sufrieron un proceso de metamorfización. Tienen un espesor aproximado de 4km empiezan a los 2.5 km de profundidad y tiene una densidad aproximada entre 2.5-2.62 (g/cm<sup>3</sup>)

## Rocas de fusión

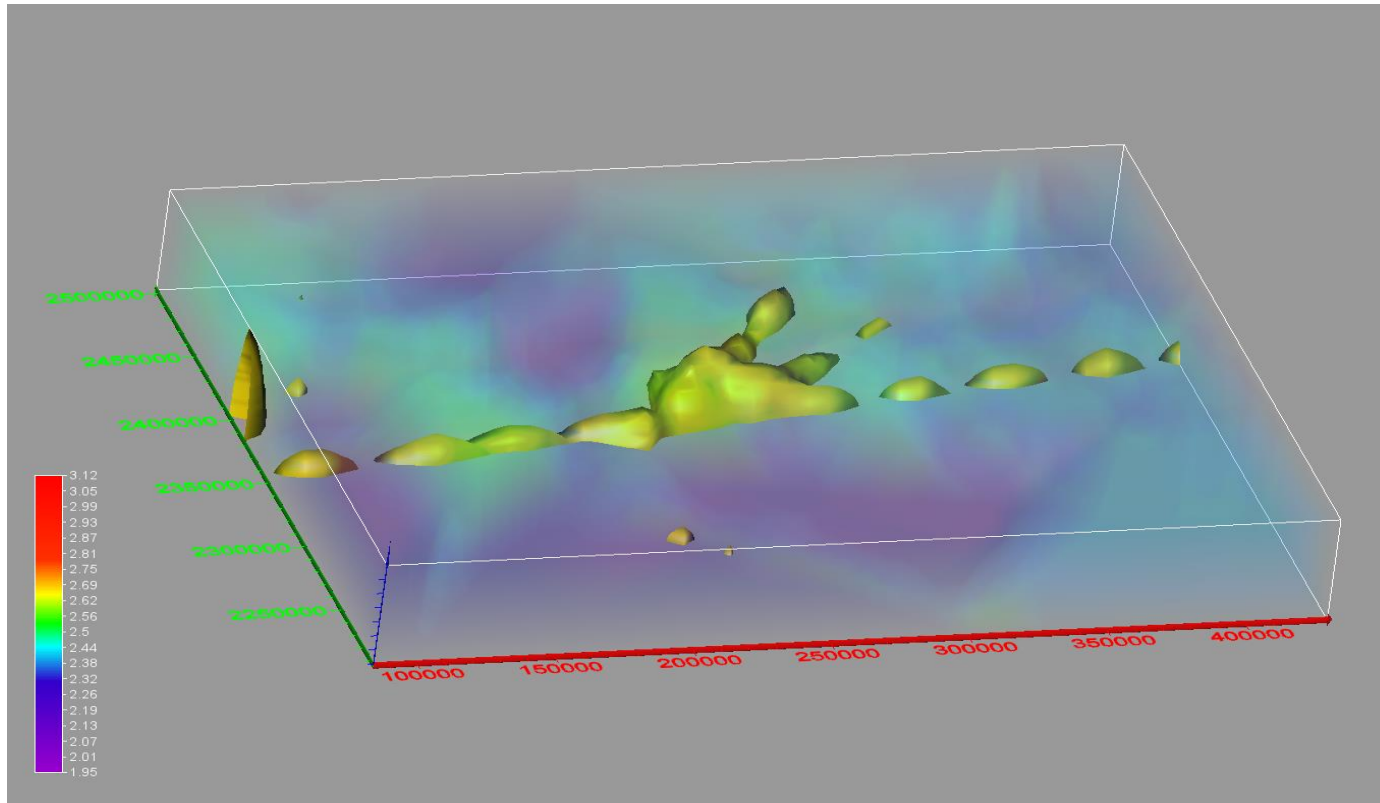


Figura 43. Distribucion de rocas de fusión a través del cráter.

Zona central del cráter, aquí se muestra la forma estructural de peak ring así como los anillos exteriores e interiores. Tiene un espesor aproximado de 3 km, comienza a los 4 km de profundidad y tiene una densidad aproximada de entre 2.65 y 2.75 (g/cm<sup>3</sup>)

## **Discusión**

El modelo final nos da una visión más clara de la geometría del cráter y el cómo se depositaron las rocas tras el impacto dejándonos una distribución litológica muy peculiar la cual a su vez se puede observar en densidad el cómo varia esta con la profundidad y con la misma geometría del cráter ya que este al generar fallas normales hacia el centro crea barreras litológicas y un contraste de densidades muy característico.

## Conclusiones

Al realizar la integración sísmico-gravimétrica nos dimos cuenta de que las interpretaciones por separado de ambos datos concordaban tanto estructural como litológicamente lo cual da la pauta para pensar que se podrían generar un mayor número de interpretaciones por separado con una incertidumbre baja y matizar el modelo.

La gravimetría original sufrió un proceso de filtración al ser re interpolada, lo cual ayudó mucho a enfocarse más en la litología y morfología del cráter.

Es necesario llevar un control con los filtros sísmicos ya que al ser una estructura muy complicada es necesario tener experiencia en interpretación y realizar los filtros en secuencia para mejorar los resultados.

Gracias al desarrollo de una gama de programas de cómputo (software) especializados en la rama de geofísica, se pueden hacer modelados e interpretaciones con mayor precisión lo cual nos permite tener una amplia percepción de la estructuras caprichosas que se generan en el subsuelo; cabe remarcar que la resolución de este modelo o cualquier otro estriba en la densidad de datos que se adquieran, y en este modelo al tener una densidad de datos reducida la resolución de modelo no es tan amplia ya que solo se hicieron interpretaciones sobre las líneas sísmico-gravimétricas, sería interesante realizar una serie de líneas a través de todo el cráter para obtener una mejor resolución, así mismo la necesidad de equipo de cómputo más avanzado para el procesado de toda esta información.

El resultado final fue satisfactorio, ya que logramos realizar y definir un modelo de la estructura del cráter de Chicxulub y analizar los controles estructurales para el depósito de carbonatos del terciario.

Hasta ahora no se había podido obtener modelos de la estructura del cráter con resolución adecuada en profundidad y densidad. El análisis del modelo nos permitió definir las estructuras más importantes del cráter, que son: anillo exterior,



anillo interior peak ring limite K/t y el reflector del cretácico. Igualmente los contrastes de densidades, espesores y profundidad a la que se encuentran las rocas de mayor importancia para el cráter.

## BIBLIOGRAFIA

David A. Chapin The theory of the Bouguer gravity anomaly; a tutorial The Leading Edge, May 1996

<http://www.ign.es/ign/layoutIn/faqgrav.do>

[http://www.iniaexploration.com/uploads/HP\\_Gravity\\_Surveys.pdf](http://www.iniaexploration.com/uploads/HP_Gravity_Surveys.pdf) (19/02/2014-13:37pm)

Depth estimation From The Scaling Power Spectrum Of Potential Fields, Stefan Maus And Vijay Dimiri, National Geophysical Research Institute Hyderabad, India

Prospección Gravimétrica Para Alumnos De Geología De La Facultad De Ciencias Naturales De La Universidad Nacional De Tucuman, Prof. Ing. Luis A. Estrada Año 2012

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/107/A4%20Cap%C3%ADtulo%20II.pdf?sequence=4>

Figura 1.

<http://laprimera plana.com.mx/2013/09/03/premiaran-a-investigador-mexicano-por-sus-trabajos-sobre-el-crater-de-chicxulub/>

[http://psi.edu/explorecraters\\_spn/background\\_spn.htm](http://psi.edu/explorecraters_spn/background_spn.htm)

Canales Garcia, Iza, Interpretación estructural y estratigráfica en perfiles sísmicos de reflexión del cráter Chicxulub / 2013

Gulick, S., Barton, P., Christeson, G., Morgan, J., MacDonald, M., Mendoza, K., Urrutia Fucugauchi, J., Vermeesch, P., Warner, M., 2008. Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater. Nature Geoscience, v. 1, p. 131-135

Martínez Hernández, Melisa, Interpretación de perfiles sísmicos mediante atributos sísmicos en la zona del cráter Chicxulub /2013

Mendoza Torres, Francisco, Análisis y modelado geofísico de la estructura del cráter Chicxulub /2011

Impacts in Precambrian Shields, Jüri Plado, Lauri J. Pesonen

Estudio geológico de la península de Yucatán, E. López Ramos

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, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L., 2011. Discovery and focused study of the Chicxulub impact crater, EOS (Trans. Am. Geophys. Union), v. 92, p. 209–216.

Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L., Pérez Cruz, G., 2011. The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. Geofísica Internacional, v. 50, p. 99-127

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.

# Anexos---DERIVADAS VERTICALES

