



Universidad Nacional Autónoma de México
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE REGISTROS GEOFÍSICOS Y PROPIEDADES
PETROFÍSICAS DEL POZO CHICXULUB-03A**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA
JOSÉ ALFREDO TORRES ACOSTA

TUTOR: **DR. JAIME H. URRUTIA FUCUGAUCHI**
(Instituto de Geofísica)

COMITÉ EXAMINADOR:
DR. JUAN ARAUJO-MENIETA (Instituto de Geología)
DR. OSCAR CAMPOS-ENRÍQUEZ (Instituto de Geofísica)
DR. CARLOS ORTÍZ-ALEMÁN (Instituto Mexicano del Petróleo)
DR. GUILLERMO PÉREZ-CRUZ (Instituto de Geofísica)



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres Ana María y José Alfredo:

Por su apoyo, trabajo y esfuerzo incondicionales que me han respaldado y motivado a fijarme metas, luchar por mis sueños y a no rendirme nunca. Este trabajo está dedicado a ustedes...

A todas las estupendas y maravillosas personas que tuve el privilegio de conocer en esta etapa de mi existencia. A mis amigos de gimnasia, Tona, Armando, Dante, Iván, Edgar, Marquito, Richie, Emma, Víctor y Andrés: gracias por ayudarme y acompañarme a vivir uno de mis más grandes sueños...

Agradezco a:

Mi amada Universidad,
que me ha forjado y hecho de mí
un mejor ser humano, útil para mi familia y mi país.

Mi querido Instituto de Geofísica,
el cual amplió las perspectivas técnicas, científicas y
humanísticas que me proporcionó la Facultad de Ingeniería.

Conacyt, por otorgarme el recurso
indispensable para adquirir un nuevo grado
de estudios que me permitirá participar en el
desarrollo y progreso científico de mi nación.

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi,
por su tutoría, atención, tiempo y
las enseñanzas invaluable otorgadas
durante mis estudios de posgrado;
es un orgullo haber estado bajo su tutela.

Mi comité evaluador:
Dr. Oscar Campos, Dr. Juan Araujo,
Dr. Guillermo Pérez, Dr. Carlos Ortiz,
por el interés, conocimientos y tiempo
invertidos en la mejora de este trabajo.

Mis profesores del posgrado:
Dr. Gustavo Tolsón, Dra. Elisa Fitz,
Dr. Tomás Acoltzi, Dra. Claudia Arango,
Dr. Ambrosio Aquino, Dr. Alfredo Jalife:
en sus aulas me educaron y transformaron
mi vida, fue un honor haber sido su alumno.

Araceli Chamán, Erika Ulloa y Gloria Alba:
por su profesionalismo y amabilidad,
fueron mis guías en el camino del posgrado.

Silvia Páez, Marcela de la Peña y Mario Zamora:
por darme la oportunidad de ejercer una profesión
fundamental para concluir mis estudios de maestría.

Contenido

	Pág.
Resumen	vi
Abstract	vii
INTRODUCCIÓN	8
I. Objetivos	10
CAPÍTULO I.	
ÁREA DE ESTUDIO	11
1.1 Geología Regional: Plataforma Carbonatada de Yucatán	12
1.1.1 Tectónica y geología	13
1.2 Cráter Chicxulub	16
1.2.1 Hipótesis del impacto y formación del cráter	18
1.2.2 Características estructurales	23
1.2.3 Estudios previos sobre el cráter	25
CAPÍTULO II.	
PERFORACIÓN DE POZOS Y TOMA DE REGISTROS GEOFÍSICOS	27
2.1 Propiedades petrofísicas	31
2.2 Registros geofísicos de pozo	33
2.3 Expedición 364 IODP: Programa de Perforación Marina	36
2.3.1 Pozo Chicxulub-03A	37
CAPÍTULO III.	
ANÁLISIS DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS	39
3.1 Registros geofísicos del pozo Chicxulub-03A	40
3.2 Metodología de análisis	41
3.3 Descripción cualitativa	48
CAPÍTULO IV.	
CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA	57
4.1 Interpretación petrofísica del análisis estadístico	57
4.2 Integración de los datos del pozo	73
4.3 Modelo petrofísico	80
CONCLUSIONES	84

APÉNDICES **86**

Lista de figuras y tablas 87

I. Columna estratigráfica de la Península de Yucatán 90

II. Estadísticas, histogramas y gráficas de dispersión 91

BIBLIOGRAFÍA **105**

RESUMEN

Se propone un modelo petrofísico del pozo Chicxulub-03A (Chicx-03A) con base en el estudio de registros geofísicos de pozo y propiedades petrofísicas. Los registros analizados son: resistividad y conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad, radiactividad natural y factores mecánicos del pozo. El pozo Chicx-03A fue perforado en la Expedición 364 dentro del proyecto de perforación marina del cráter Chicxulub llevado a cabo conjuntamente por el Programa Internacional de Descubrimiento de los Océanos (IODP) y el Programa Internacional Continental de Perforación Científica (ICDP), con el propósito de investigar el anillo de picos del cráter. La información obtenida de los registros geofísicos del pozo revela propiedades físicas de las rocas que conforman dicha estructura, tales como alta porosidad, bajas densidades y velocidades sísmicas. Estas características se asocian a microfracturamiento y alteración considerables en dichas rocas, lo cual indica que sufrieron deformación debido al impacto y proceso de formación del cráter. Estos resultados son consistentes con las predicciones numéricas del modelo para la formación del anillo de picos, el cual establece que las litologías que lo constituyen representan las rocas impactadas y deformadas, integradas principalmente por litologías de impacto y granitoides del basamento altamente fracturados. La interpretación de los resultados define tres unidades litoestratigráficas en el pozo Chicx-03A. La caracterización petrofísica aquí propuesta se elaboró a partir del análisis de los registros geofísicos del pozo, la cual podrá ser mejorada con el estudio de los núcleos.

ABSTRACT

A petrophysical model of the Chicxulub–03A (Chicx–03A) well is proposed based on the study of geophysical well logs and petrophysical properties. The loggings analyzed are: electrical resistivity and conductivity, magnetic susceptibility, density, natural radioactivity and mechanical factors of the well. The Chicx-03A well was drilled in Expedition 364 within the Chicxulub crater offshore drilling project carried out jointly by the International Ocean Discovery Program (IODP) and the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP), with the purpose of investigating the ring of crater peaks. The information obtained from the geophysical logs reveals physical properties of the rocks that make up said structure, such as high porosity, low densities and seismic velocities. These characteristics are associated with considerable microfracturing and alteration in these rocks, which indicates that they suffered deformation due to the impact and the formation process of the crater. These results are consistent with the numerical predictions of the model for the formation of the peak ring, which establishes that the lithologies that constitute it represent impacted and deformed rocks, mainly composed of impact lithologies and highly fractured granitoids of the basement. The interpretation of the results defines three lithostratigraphic units in the Chicx-03A well. The petrophysical characterization proposed here was prepared from the analysis of the geophysical loggings, which could be improved with the study of the cores.

INTRODUCCIÓN

La estructura de impacto Chicxulub en Yucatán, México, se formó cuando un meteorito de grandes dimensiones colisionó la Tierra hace 66 millones de años aproximadamente. El impacto de este bólido está ligado a la extinción masiva de finales del Cretácico y es reconocida debido a su asociación con la desaparición de los dinosaurios (Álvarez et al., 1980)¹. El cráter fue descubierto a finales de la década de 1970 por Petróleos Mexicanos (PEMEX) que realizaba actividades exploratorias (Penfield y Camargo, 1981). A partir de la década de 1990 se han realizado estudios geofísicos y programas de perforación para investigar la estructura, los depósitos de eyecta² y los efectos geológico–ambientales en la zona de impacto (Hildebrand et al., 1991, 1998; Sharpton et al., 1992, 1993; Morgan et al., 2005, 2007; Urrutia Fucugauchi et al., 1996, 2004, 2008, 2011). El Chicxulub es uno de los cráteres de impacto de mayor tamaño y mejor preservado que se hayan descubierto a la fecha. Debido a que la estructura del cráter se encuentra sepultada bajo depósitos sedimentarios con espesores que oscilan de 600 a 1500 metros, teniendo como promedio un kilómetro de profundidad (Urrutia Fucugauchi et al., 1996), las investigaciones sobre el Chicxulub han requerido del uso de diferentes métodos geofísicos, perforación de pozos y campañas de adquisición sísmica que permitan recopilar información para estudiar el cráter.

Las exploraciones recientes en el cráter Chicxulub incluyen el programa de perforación marina en el sector central de la estructura, y han estado orientadas principalmente al estudio de: (1) la naturaleza y formación del anillo de picos³; (2), las características morfológicas y estructurales del cráter; y (3) los efectos ambientales,

¹ Álvarez, L. W., et al., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction, *Science* 208, p. 1095–1108.

² La eyecta (del inglés *ejecta*) es el término utilizado para nombrar un grupo especial de sedimentos producidos y arrojados por la colisión de cuerpos impactantes que intervienen en la formación de un cráter (Melosh, 1989).

³ Llamado comúnmente *peak ring* por su acepción en inglés. Este término se utilizó por primera vez para describir las discontinuidades en forma de anillo montañoso que se elevan sobre el piso de los grandes cráteres lunares (Melosh, 1989). Es decir, el anillo de picos es una característica topográfica distintiva de los cráteres de impacto.

de la biota y paleoclimáticos. Para este trabajo, se utilizó la información recabada por una de las campañas de exploración: la Expedición 364 IODP–ICDP⁴ llevada a cabo en 2016. Durante ésta expedición se perforó el pozo Chicxulub–03A⁵ (Chicx–03A). Durante la perforación de éste se tomaron registros geofísicos de pozo, con los cuales, se propone realizar una caracterización petrofísica de la secuencia del Chicx–03A.

Este trabajo se divide en cuatro capítulos. En el primero se establece el marco geológico local y regional de la zona de estudio, y se hace una breve revisión de la hipótesis del impacto y de la formación del cráter Chicxulub. En el segundo se realiza una descripción de los registros geofísicos de pozo, las propiedades petrofísicas y su empleo en la caracterización de formaciones⁶; también se detalla la Expedición 364 IODP – ICDP. En el tercer capítulo se describen los métodos de caracterización petrofísica que se empleará en esta tesis. En el cuarto capítulo se integran los datos del pozo para construir un modelo petrofísico y realizar su interpretación. Finalmente, se establecen las conclusiones. Se discuten las aportaciones de la caracterización petrofísica del pozo Chicx–03A y del método analítico. Asimismo, se proponen sugerencias como referentes para futuras investigaciones.

⁴ IODP son las siglas en inglés para el *International Ocean Discovery Program*, ICDP lo son para el *International Continental Scientific Drilling Program*.

⁵ La Expedición 364 IODP–ICDP también nombró a este pozo como *sitio de perforación* M0077A.

⁶ En petrofísica, el término *formación* hace referencia a una unidad litoestratigráfica que tiene las mismas características en su respuesta. Se nombran con base en sus propiedades litológicas principales y del nombre de la zona o localidad donde fueron descritas inicialmente. Este término suele abreviarse como Fm.

I. Objetivos.

El propósito central de este trabajo es realizar una caracterización petrofísica del pozo Chicxulub–03A para determinar las secuencias y litologías en la zona del cráter donde se perforó este pozo. Esto mediante el análisis y la correlación de los registros geofísicos que se tomaron durante la perforación del mismo. Se integrará la información obtenida con los registros y se realizará una interpretación en términos de las variaciones petrofísicas del pozo Chicx–03A.

CAPÍTULO I

ÁREA DE ESTUDIO

El cráter Chicxulub se ha convertido en un importante objeto de estudio en el área de los impactos planetarios y sus consecuencias, debido a que posee un excelente estado de conservación. El hecho de que se encuentre en una zona tectónica de baja actividad ha evitado su deformación y erosión. Por lo cual resulta indispensable revisar la historia tectónica y las características geológicas del lugar donde se localiza.

El cráter Chicxulub se ubica en la provincia geológica de la Plataforma de Yucatán. Esta provincia incluye casi toda la península que lleva el mismo nombre, además de áreas adyacentes sumergidas en el sur del Golfo de México. Los estudios geológicos de la Plataforma de Yucatán son escasos en su conjunto, pues se enfocan principalmente en el análisis del cráter. Algunas de las primeras investigaciones⁷ sobre la plataforma fueron realizadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX), que llevó a cabo actividades exploratorias con el fin de encontrar hidrocarburos a inicios de la década de 1950, mismas que, más tarde, serían las que descubrirían la estructura del Chicxulub. López Ramos (1973, 1975 y 1983) realizaría algunos de los estudios representativos; Penfield y Camargo (1981) y Aguayo–Camargo (1987) también colaborarían con trabajos sobresalientes⁸.

⁷ El alemán Karl Sapper fue uno de los primeros en realizar estudios geológicos formales de la plataforma de Yucatán, publicó en 1896 su obra: *"Sobre la geografía física y la geología de la Península de Yucatán"*, editada en el Boletín no. 3 del Instituto de Geología, UNAM.

⁸ Otros trabajos importantes que se han llevado a cabo para conocer la geología de la península de Yucatán son de Pope et al., (1991 y 1996); Vera–Sharpton (1993, 2000) y Vázquez (2000) han realizado investigaciones petrográficas de las brechas de impacto y el basamento del bloque de Yucatán, aunque estos estudios son escasos debido a la baja actividad tectónica y a que actualmente son poco conocidos los principales procesos bajo los cuales se formó la plataforma de Yucatán y que también se desconoce el momento en el que emergió y basculó la plataforma hasta su posición actual; Escobar (2002) estudió las variaciones litológicas en la columna de las brechas.

1.1 Geología Regional: Plataforma Carbonatada de Yucatán⁹.

La plataforma carbonatada de Yucatán se encuentra en el sector sur del Golfo de México, la zona emergida constituye la Península de Yucatán y parte de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco y Quintana Roo en México, así como porciones terrestres del noroeste de Belice y el norte de Guatemala (López Ramos, 1973). Tiene una extensión aproximada de 300,000 km² y se sitúa geográficamente en las latitudes 16°—24°N y longitudes 86°—92.5°W del meridiano de Greenwich (Fig. 1.1).

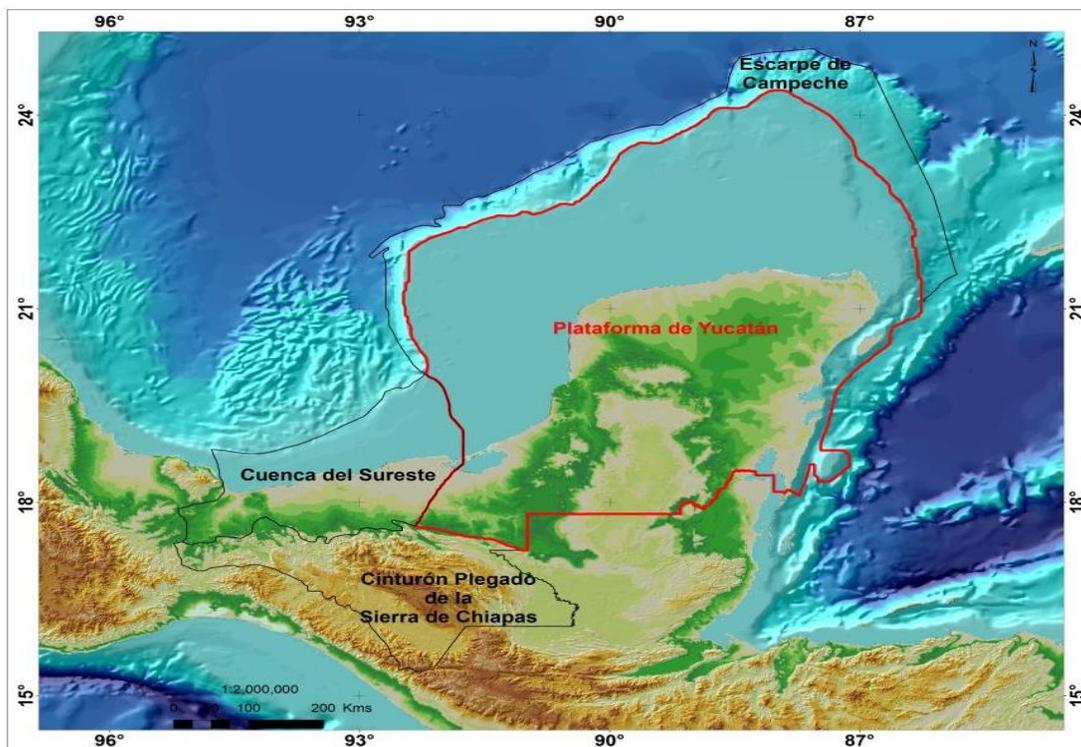


Fig. 1.1 Localización geográfica de la Plataforma de Yucatán (PEMEX, 2013).

Topográficamente la plataforma se puede dividir en tres regiones: *Planicie Norte*, *Planicie Sur* y la *Sierra de Ticul*. La plataforma está limitada geomorfológicamente por diferentes unidades fisiográficas¹⁰: al norte y parte del noreste, en la porción

⁹ La Plataforma de Yucatán es conocida comúnmente como *Plataforma Carbonatada de Yucatán* debido a que su formación está compuesta principalmente por depósitos marinos ricos en material calcáreo como calizas y otros tipos de carbonatos (Morgan y Warner, 1997; Vermeesch y Morgan, 2008).

¹⁰ Las unidades o provincias fisiográficas son regiones que comparten el mismo origen geológico y en las cuales su relieve es resultado de la acción de un idéntico conjunto de agentes modeladores.

sumergida, por el Talud Continental del Banco de Campeche¹¹, al oriente está limitada por el Talud Continental del Mar Caribe y al oeste por la Planicie Costera del Golfo de México; al sur, en la zona emergida, por el relieve del Arco de la Libertad que incluye parte de Guatemala (Departamento de Petén) y las Montañas Mayas de Belice (Fig. 1.2).

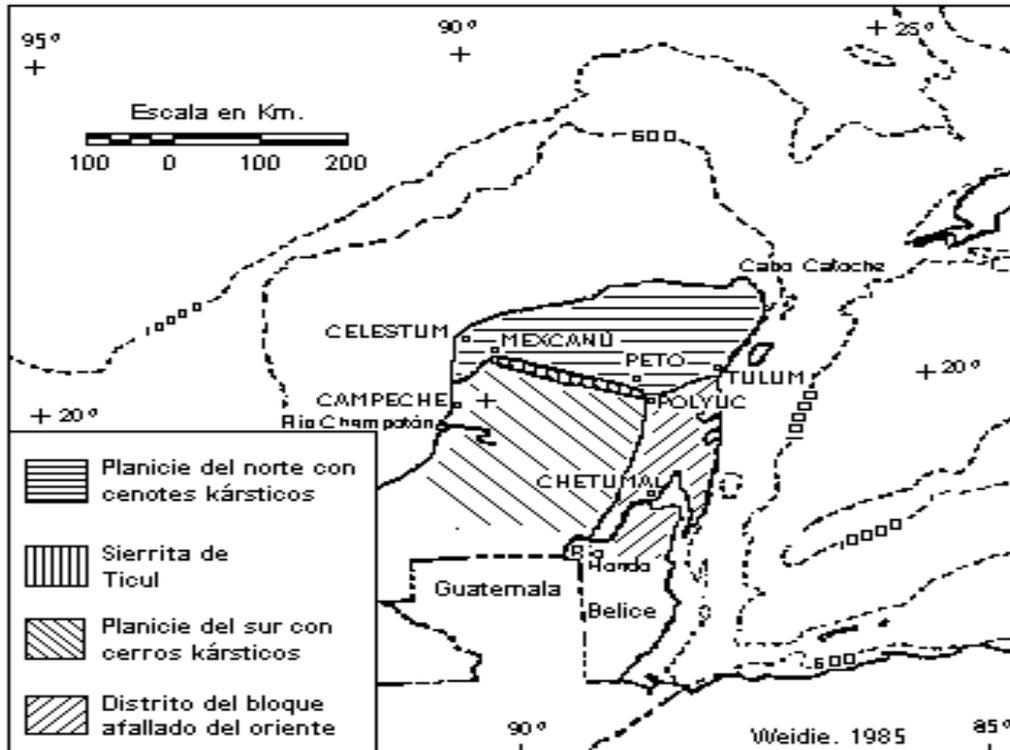


Fig. 1.2 Mapa geomorfológico de la Plataforma de Yucatán (Weidie, 1985).

1.1.1 Tectónica y geología.

Las reconstrucciones de la tectónica de placas, así como los registros geológicos y paleomagnéticos, indican que el desarrollo de la Península de Yucatán estuvo asociado a la formación del Caribe y del Golfo de México, pues éstos fueron el resultado de la separación de Norte y Sudamérica durante el Jurásico, debido a un movimiento de divergencia de estas placas tectónicas hacia el oeste de África al momento en que se disgregó Pangea (Pindell y Kennan, 2001). Sin embargo, algunos

¹¹ El Banco de Campeche está delimitado en la parte norte por un abrupto cambio en la pendiente y en la profundidad, a dicho rasgo geológico se le denomina *Escarpe de Campeche* (Weidie, 1985).

modelos sugieren que el movimiento del Bloque de Yucatán fue mayormente independiente de la dinámica de movimiento de las placas continentales de la zona (Pindell et al., 2001). La península de Yucatán alcanzó su posición actual durante el Cretácico Temprano, pues al desprenderse de Norteamérica comenzó a migrar en dirección sur a lo largo del flanco este del Arco de Tamaulipas, produciendo la zona arqueada de cizalla a lo largo de la parte este de México (Pindell y Kennan, 2001). Esto significa que, para el momento del impacto del meteorito que formó el cráter Chicxulub, la Plataforma de Yucatán se ubicaba en sus coordenadas actuales, pero sumergida bajo aguas someras, las cuales proporcionaron condiciones ideales para el depósito de rocas sedimentarias, como consta en el registro geológico (Fig. 1.3).

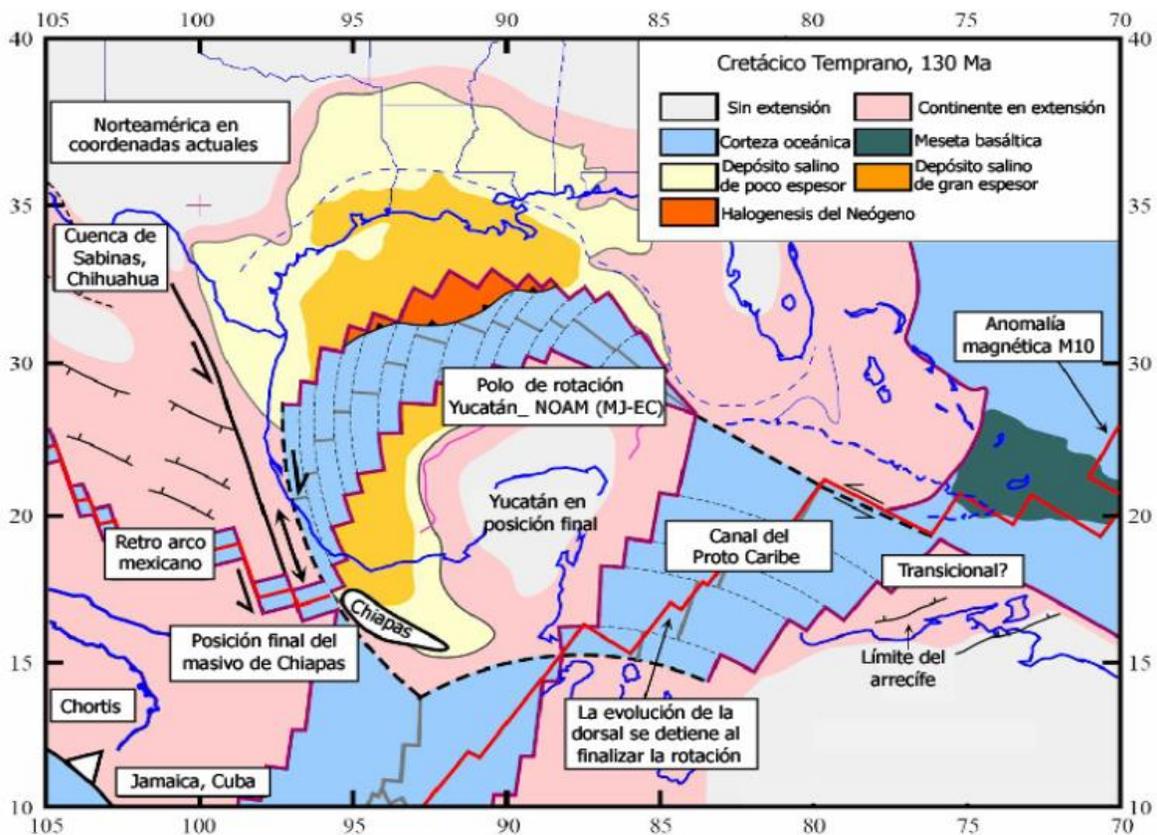


Fig. 1.3 Reconstrucción de la dinámica de la formación de la zona del Caribe, el Golfo de México y el movimiento del Bloque de Yucatán (Pindell y Kennan, 2001)¹².

¹² En 2009, Pindell y Kennan publicaron: "Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and the northern South America in the mantle reference frame: An update", donde presentan una serie de mapas actualizados y muy detallados de ésta evolución tectónica.

Desde el Jurásico Tardío al Cretácico Tardío, la sedimentación en la plataforma de Yucatán estuvo dominada por secuencias carbonatadas con un cambio a depósitos de sedimentos clásticos a principios del Paleógeno, provocado por los esfuerzos de la Orogenia Laramíde, evento que formó la Sierra Madre Oriental. Durante el 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, en el Bloque de Yucatán continuaba el depósito de carbonatos de plataforma somera (Padilla y Sánchez, 2007). En el Mioceno, durante el Serravaliano, la compresión derivada del movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica, formó los pliegues y fallas de la cadena de Chiapas–Reforma–Aká sobre el nivel de sal del Calloviano. Posteriormente dichas estructuras sufrieron un basculamiento hacia el noroeste, propiciando el movimiento de la sal hacia el norte. Durante el Plioceno hubo un levantamiento isostático que provocó la emersión de la plataforma de Yucatán y la Sierra Chiapaneca. El bloque de Yucatán es tectónicamente pasivo, sin plegamientos ni actividad volcánica.

En cuanto a su geología, la Plataforma de Yucatán tiene como basamento un complejo cristalino–volcánico del Neoproterozoico hasta el Paleozoico tardío, oculto bajo la cobertura sedimentaria del Mesozoico (Jurásico–Cretácico) y del Cenozoico (Sharpton V., et al., 1993). Sobre el basamento reposa una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas del Cretácico, interrumpida abruptamente por los depósitos del límite Cretácico–Terciario ¹³ asociados con el impacto de Chicxulub. Los carbonatos por lo general están fuertemente dolomitizados. El Cuaternario igualmente está representado por carbonatos, aunque carece de evaporitas. Las formaciones representativas de las secuencias que están expuestas en la superficie son las siguientes: *Icaiché (Eoceno medio temprano y Paleoceno)*, *Piste y Chichen Itzá (Eoceno medio y tardío)*, *Bacalar (Mioceno)* y *Carrillo Puerto (Mioceno–Plioceno)*¹⁴.

¹³ El límite Cretácico–Terciario mejor conocido como límite K/T (K por *Kreide* y T por *Tertiär*, palabras en alemán para Cretácico y Terciario respectivamente), es la denominación de un cronohorizonte geológico (actualmente en desuso) para referir el final de la era Mesozoica y el inicio de la Cenozoica.

¹⁴ En el apéndice II se presenta la columna estratigráfica generalizada de la Península de Yucatán.

Las formaciones del Oligoceno (calizas, lutitas y margas), así como las del Cuaternario no han sido nombradas formalmente. Por información de pozos y afloramientos, los espesores medidos para estos grupos de estratos es variable entre 1,000 y 3,000 metros. Hacia el sur existen grandes estructuras de compresión miocénica como el Arco de la Libertad, que forma el límite norte del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas. Las únicas fallas visibles en la superficie de esta provincia son la Falla de Ticul en la región central de la plataforma y el sistema de fallas de Río Hondo–Catoche.

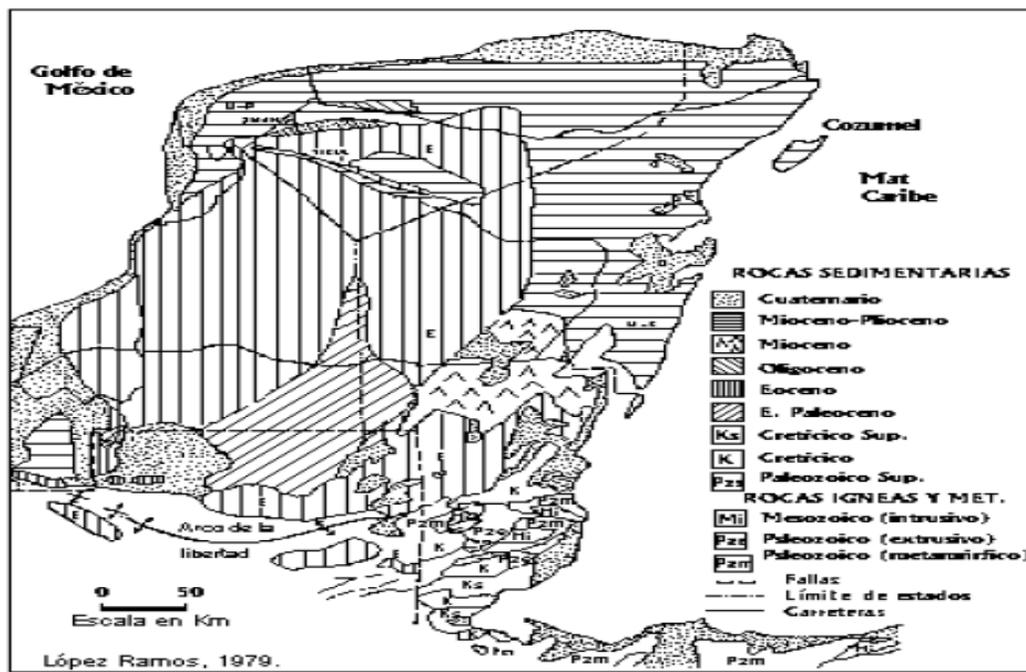


Fig. 1.4 Mapa geológico de la Península de Yucatán (López Ramos, 1979).

1.2 Cráter Chicxulub.

El cráter Chicxulub se localiza al sur del Golfo de México y en el borde septentrional de la Península de Yucatán (N21°20', W89°30'). La porción sur del cráter, casi exactamente la mitad, se localiza en tierra, mientras que la porción norte se encuentra sumergida en el Golfo de México (Fig. 1.5). El centro geométrico del cráter se encuentra cercano al Puerto de Chicxulub (Fig. 1.6), motivo por el cual se le nombró así a ésta estructura de impacto (Urrutia et al., 2011).



Fig. 1.5 Localización del cráter Chicxulub en la plataforma carbonatada de Yucatán (Urrutia Fucugauchi et al., 2011).

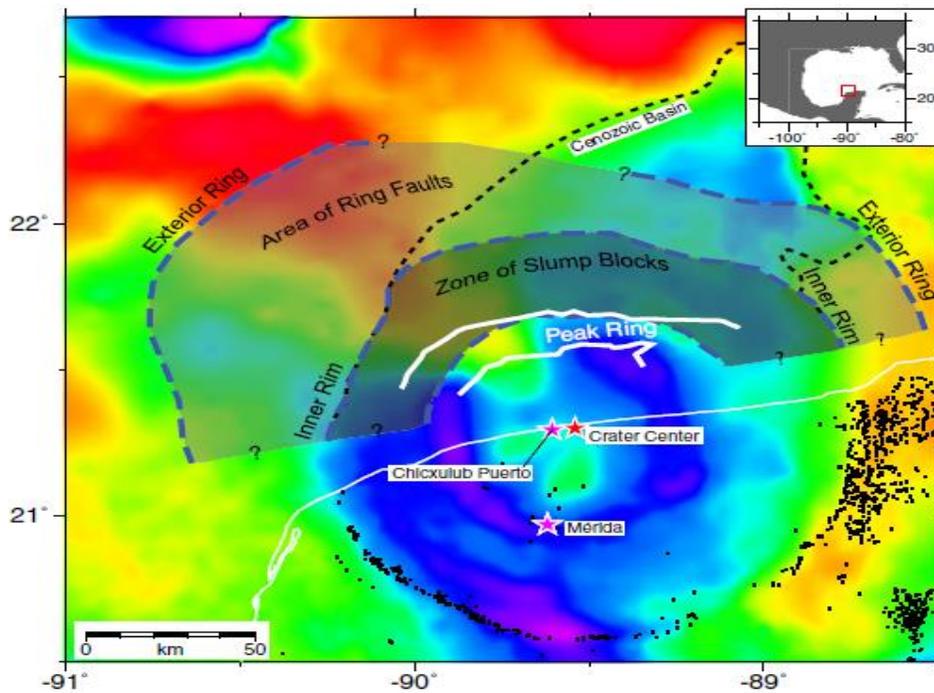


Fig. 1.6 Localización del centro del cráter con respecto al Puerto Chicxulub (Gulick et al., 2013)¹⁵.

¹⁵ Mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer del cráter Chicxulub. La línea costera se muestra con una línea blanca, cenotes y sumideros con puntos negros (Connors et al., 1996), y la ciudad de Mérida y el Puerto de Chicxulub con estrellas de color granate. La estrella roja marca la posición nominal del centro del cráter (Morgan et al., 1997).

1.2.1 Hipótesis del impacto y formación del cráter.

El límite entre los períodos Cretácico y Paleógeno¹⁶ de la historia geológica de la Tierra, hace 66 millones de años aproximadamente, está marcado por la extinción masiva de la mayoría de las especies existentes en aquella época, incluida la más dominante: *los dinosaurios*. Este acontecimiento provocó un cambio radical en la evolución biológica posterior sobre el planeta.

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 todos los ecosistemas del planeta por más de 250 millones de años? En un inicio se habían postulado dos teorías principales que intentaban explicar las causas de dicha extinción. La primera se basaba en una supuesta gran actividad volcánica alrededor de todo el mundo; y la otra se basaba en el posible impacto de un gran meteorito contra la Tierra. Ésta segunda teoría, la del impacto meteorítico, fue propuesta por Luis Walter Álvarez y sus colaboradores en 1980, se fundamentaba principalmente en dos grandes evidencias: (1) la presencia de iridio en una capa estratigráfica alrededor de todo el planeta fechada ~65 millones de años¹⁷; (2) la existencia de un cráter que posteriormente sería descubierto en la porción septentrional de Yucatán, México, denominado cráter Chicxulub.

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 a nivel mundial (Fig. 1.7), el cuerpo del que provenían debió ser de grandes dimensiones, del orden de 10 kilómetros de diámetro aproximadamente¹⁸.

¹⁶ El límite Cretácico–Paleógeno mejor conocido como límite K/Pg, es un cronohorizonte geológico (anteriormente conocido como límite K/T) para referir el final de la era Mesozoica y el inicio de la Cenozoica.

¹⁷ Posteriormente se le conocería a esta capa como *la anomalía de iridio*.

¹⁸ En un principio (Álvarez et al., 1980) suponían que la fuente principal del iridio era la entrada de polvo cósmico al planeta Tierra y que dicho polvo se acumulaba paulatinamente en los sedimentos de los fondos marinos. Pero al analizar la capa de arcilla, encontraron que el contenido de iridio era muchas veces mayor al que se esperaba. En Italia los niveles de iridio eran 30 veces más elevados de lo esperado y en Dinamarca el contenido de iridio era hasta 160 veces más grande, por mencionar algunos ejemplos. Por lo que propusieron un nuevo modelo en el cual la fuente de iridio habría sido el impacto de un bólido de gran tamaño con nuestro planeta.

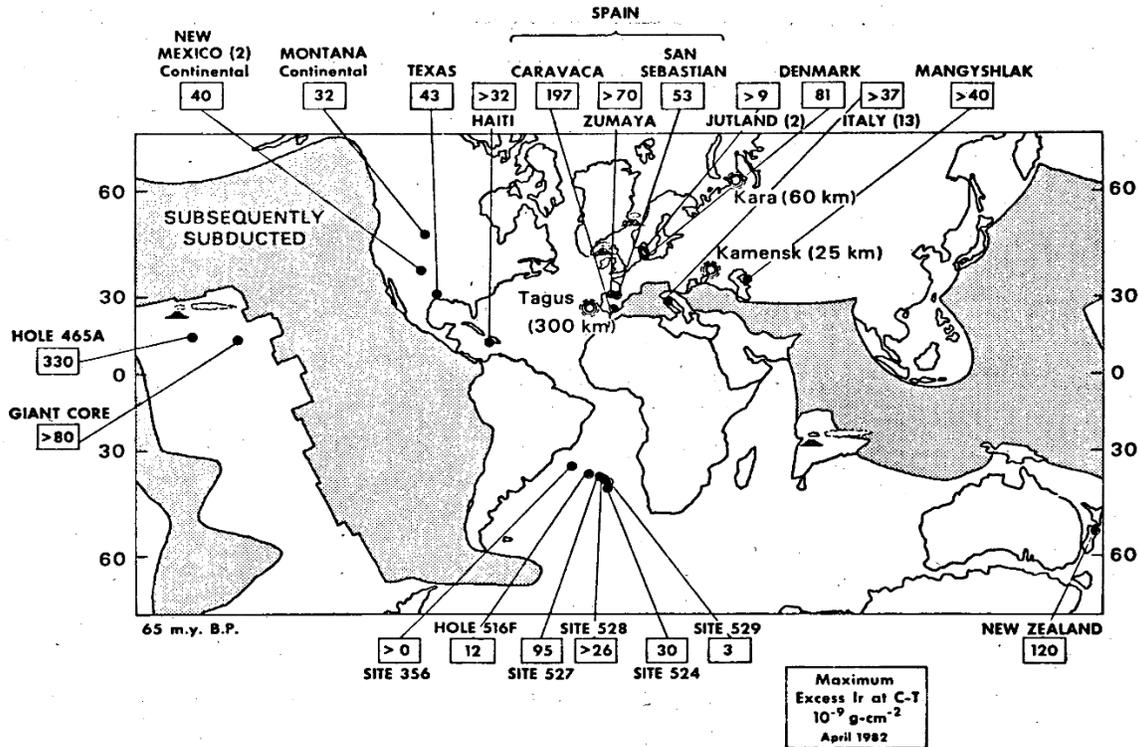


Fig. 1.7 Localización de las secciones del Cretácico–Terciario donde se ha documentado la *anomalía de iridio*. Los valores anómalos no presentan un patrón concordante con una posible localización para el sitio de impacto. El mapa base corresponde a una reconstrucción paleográfica para la época. Las zonas sombreadas en los océanos indican segmentos de corteza oceánica que han sido destruidos por procesos de subducción (Álvarez et al., 1982).

Como consecuencia del impacto se cree que se formó una nube de polvo por un periodo de varios meses, lo que ocasionó la interrupción de los procesos fotosintéticos en el planeta, produciendo el colapso de las cadenas tróficas, y por lo tanto, la extinción masiva de aproximadamente el 75% de las especies (Pollack et al., 1983). Cuando se publicó la propuesta en la década de 1980, aún faltaba por descubrir la huella que debió haber dejado el impacto: *el cráter*. Ingenieros de Petróleos Mexicanos localizaron dicha cavidad en la Península de Yucatán mientras buscaban hidrocarburos. Más tarde, Penfield y Camargo (1981) explicarían que habían encontrado un cráter de impacto, e hicieron la correlación con el trabajo de Álvarez y colaboradores. En 1991 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).

La formación de cráteres por impacto es un proceso geológico único debido a la enorme cantidad de energía que es liberada en lapsos de tiempo muy cortos en un área determinada, ya que son capaces de generar grandes cambios a escala global. La magnitud de la energía liberada depende principalmente de la velocidad y el tamaño del objeto impactante¹⁹. Los meteoritos más pequeños y lentos que golpean la Tierra pueden simplemente romperse en pedazos sin modificar el área de contacto. Los meteoritos grandes, por otra parte, tienen el poder para generar suficiente calor y presión en el impacto para fundir, e incluso vaporizar, tanto el cuerpo impactante, como una parte de la roca terrestre circundante²⁰.

La geometría de un cráter de impacto está determinada principalmente por el material que conforma el área impactada, la velocidad del choque y el tamaño del cuerpo impactante. La formación de los cráteres de impacto se dividen en tres etapas (Fig. 1.8): (1) contacto y compresión, (2) excavación y (3) modificación (Melosh, 1989). La etapa de *contacto y compresión* comienza una vez que el meteorito ha hecho contacto con la superficie terrestre, en esta fase se produce una compresión–descompresión de los materiales, tanto del cuerpo impactante como de la superficie colisionada, seguida de enormes cantidades expulsadas de detritos a grandes distancias del cráter, formando lo que se denomina como eyecta del cráter. En la segunda etapa, de *excavación*²¹, una onda de choque hemisférica se propaga hacia el interior de la zona impactada, generando presiones muy altas sobre este material; la onda de choque en expansión produce cambios irreversibles en el volumen de material impactado, después de que la onda de choque pasa, las altas presiones son liberadas por una onda de rarefacción²² (Barton et al., 2010). La tercera etapa, la de *modificación*, es el final del proceso de excavación y eyección, en ella se forma un cráter que es denominado cavidad de transición, puesto que aún ha de experimentar modificaciones

¹⁹ Los asteroides impactan la Tierra a una velocidad promedio de 25 km/s. Un cuerpo cuya masa es mayor a las mil toneladas penetra la atmósfera terrestre prácticamente intacta. Un cuerpo con una masa menor a las cien toneladas, al pasar por nuestra atmósfera desaceleraría su velocidad original a casi cincuenta por ciento (Grieve, 1990).

²⁰ Debido a la escasa probabilidad de que un meteorito de grandes dimensiones se fragmente durante su viaje a través de la atmósfera, usualmente no son encontrados fragmentos del cuerpo impactante en las proximidades de los grandes cráteres de impacto (Grieve, 1990).

²¹ Se ha determinado que la etapa de excavación puede durar unos cuantos segundos (Barton et al., 2010).

²² Se denomina *rarefacción* al proceso por el que un cuerpo o sustancia se hace menos denso. Se contraponen al fenómeno de compresión. La rarefacción puede propagarse en ondas longitudinales al igual que la compresión.

posteriores, las cuales dependerán del tamaño de la cavidad; durante la etapa de modificación posterior al impacto, la cavidad de transición colapsa debido a la fuerza de gravedad, ya que grandes movimientos de masas rocosas se precipitan desde el exterior y desde arriba hacia abajo del cráter, lo que ocasiona que se sature dicha cavidad (Barton et al., 2010).

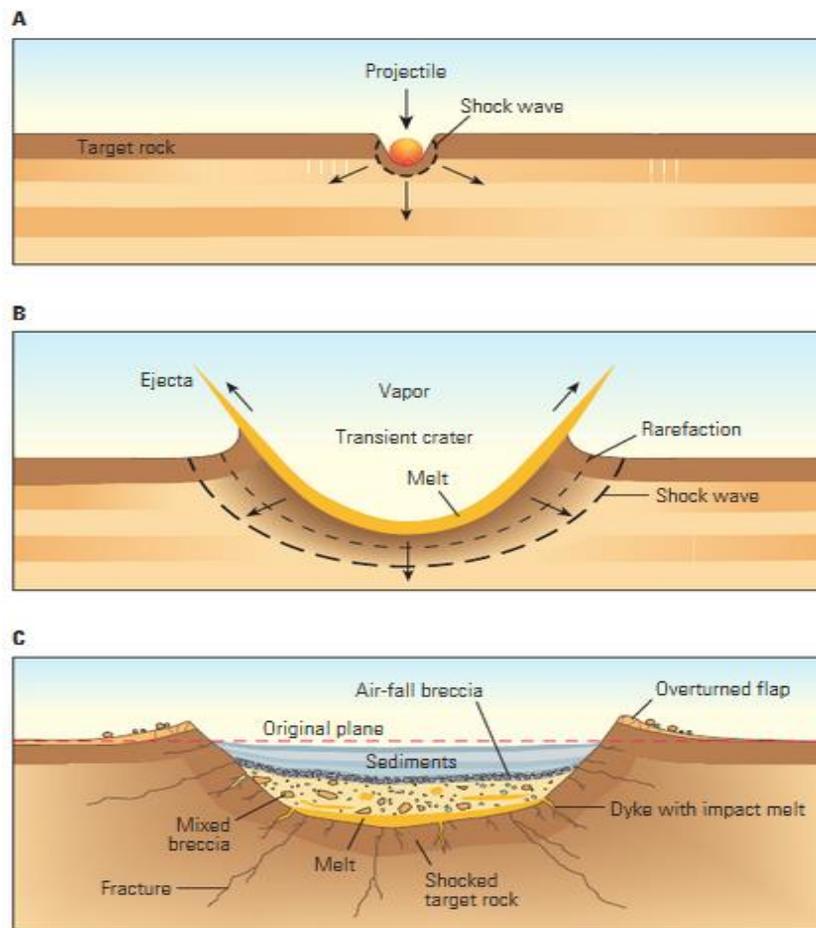


Fig. 1.8 Etapas de formación de un cráter de impacto: (a) contacto y compresión, (b) excavación y (c) modificación. En esta figura se ilustra la geometría de un cráter simple (Barton et al., 2010).

De acuerdo a su morfología final, los cráteres se han clasificado en dos grupos principales: *cráteres simples* y *complejos*. Los *cráteres simples* son los más pequeños, su diámetro varía dependiendo de la naturaleza de la roca impactada²³ y del tamaño del cuerpo impactante; éstas estructuras simples conservan su forma

²³ Cuando las rocas impactadas son de origen sedimentario, los cráteres simples llegan a tener diámetros de 2 km; cuando las rocas impactadas son del tipo cristalino, su diámetro puede alcanzar hasta 5 Km (Ortiz et al., 2002).

semicircular (Fig. 1.8, c); las orillas de este tipo de cráteres son inestables, por lo que tienden a caerse y depositarse en sus centros, este proceso es conocido como desplome, entre más grande sea el cráter simple, más inestable se vuelven sus orillas. Los *cráteres complejos* a diferencia de los simples, poseen un levantamiento central en su cavidad de transición que forma una estructura central conocida como *anillo de picos*, la cual está circundada por una depresión anular y un borde fracturado con patrones de fallamiento normal (Fig. 1.9).

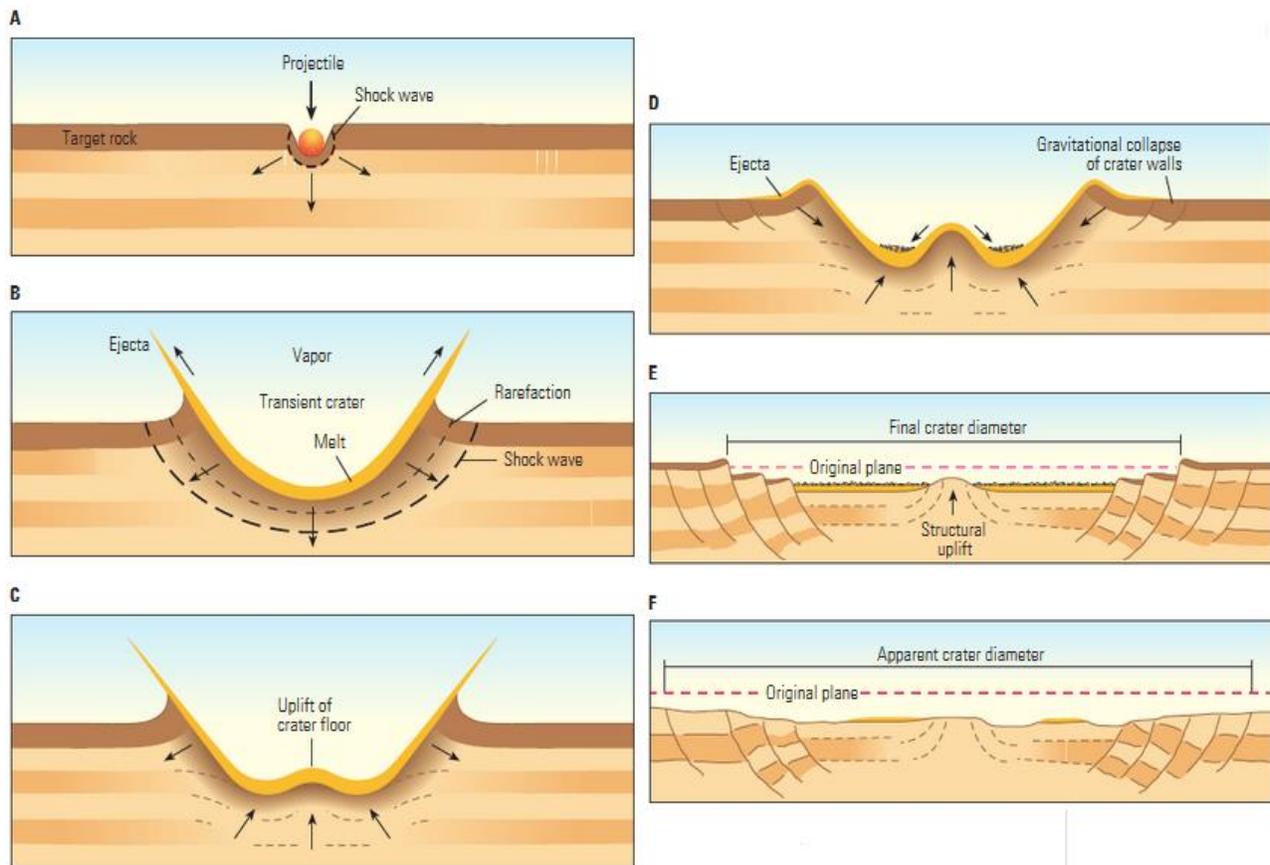


Fig. 1.9 Etapas de formación de un cráter de impacto complejo: las dos primeras etapas de contacto y compresión (A) y excavación (B) son similares a las de un cráter simple. Las diferencias comienzan en la etapa de modificación (C), pues en los cráteres complejos el centro tiene un levantamiento central (*uplift*) creando una estructura levantada. Lejos del centro, las paredes del cráter comienzan a desplomarse (D). El diámetro final de un cráter complejo es mayor al de uno simple (E), y después de los procesos erosivos, (F) el diámetro puede parecer aún mayor (Modificado de Barton et al., 2010).

1.2.2 Características estructurales.

El cráter Chicxulub constituye una de las tres estructuras de impacto de mayores dimensiones identificadas hasta el momento en nuestro planeta²⁴ (Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2011). Como ya se mencionó anteriormente, su edad y las características tectónicas y geológicas del lugar donde se encuentra, han permitido la preservación de su estructura y de las litologías formadas por el impacto. A continuación se describirán brevemente las características físicas más importantes del cráter.

El Chicxulub ha sido clasificado como un cráter complejo multianillado²⁵ con un diámetro circular aproximado de 200 kilómetros²⁶ (Schulte *et al.*, 2010), se ha determinado geoméricamente que la mitad de la estructura se encuentra en la zona marina y la otra mitad en la parte terrestre de la plataforma de Yucatán. El cráter está cubierto por una gruesa capa de sedimentos carbonatados y evaporíticos, los cuales lo han preservado de la erosión geológica y ambiental a lo largo del tiempo. En la formación del cráter todo el material cercano al sitio del impacto fue excavado y derretido; mientras que las rocas fueron levantadas para formar una zona central de ascenso de la estructura y se formaron brechas impactadas²⁷ (Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2010). Afuera de la zona de la excavación, las rocas superficiales cercanas al área del impacto colapsaron hacia el interior para formar la zona de terraza (Collins *et al.*, 2008) (Fig. 1.10).

²⁴ Los otros dos cráteres importantes son el cráter Sudbury localizado en Canadá y el Vredefort en Sudáfrica. Aunque a diferencia del Chicxulub, estos son más antiguos: se ha fechado la formación del Sudbury hace 1,850 millones de años, y 2,000 millones de años para el Vredefort; y no poseen el estado de conservación del Chicxulub, pues se encuentran sumamente erosionados y modificados. Los tres cráteres comparten en común un diámetro mayor a 150 kilómetros y una morfología de cráter complejo multianillado.

²⁵ Los cráteres complejos poseen una estructura formada por la acción del rebote elástico del material del piso de la cavidad que se emplaza al centro de la cuenca de impacto una vez que los esfuerzos en la zona del choque han alcanzado el equilibrio, a ésta estructura se le llama *anillo de picos* (Melosh, 1989). Si un cráter presenta más de un levantamiento estructural, se dice que presenta múltiples anillos de picos y se le denomina cráter multianillado.

²⁶ Diferentes grupos de investigadores han reportado variaciones en el diámetro del cráter, que van desde los ~170 km (Hildebrand *et al.*, 1991; Pilkington *et al.*, 1994) hasta los ~300 kilómetros (Sharpton *et al.*, 1993; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 1996).

²⁷ Material fragmentado y depositado a consecuencia del choque del meteorito con la plataforma.

Los tres principales elementos estructurales del cráter Chicxulub son: (1) el levantamiento central de ~40 kilómetros de diámetro, resultado del movimiento ascendente y descendente del material inmediatamente después del impacto; (2) una cavidad de transición con un diámetro de ~90 kilómetros cubierta por rocas fundidas y brechas impactadas; (3) una zona circundante de bloques fallados que se extiende hasta poco más allá de los 180 kilómetros de diámetro.

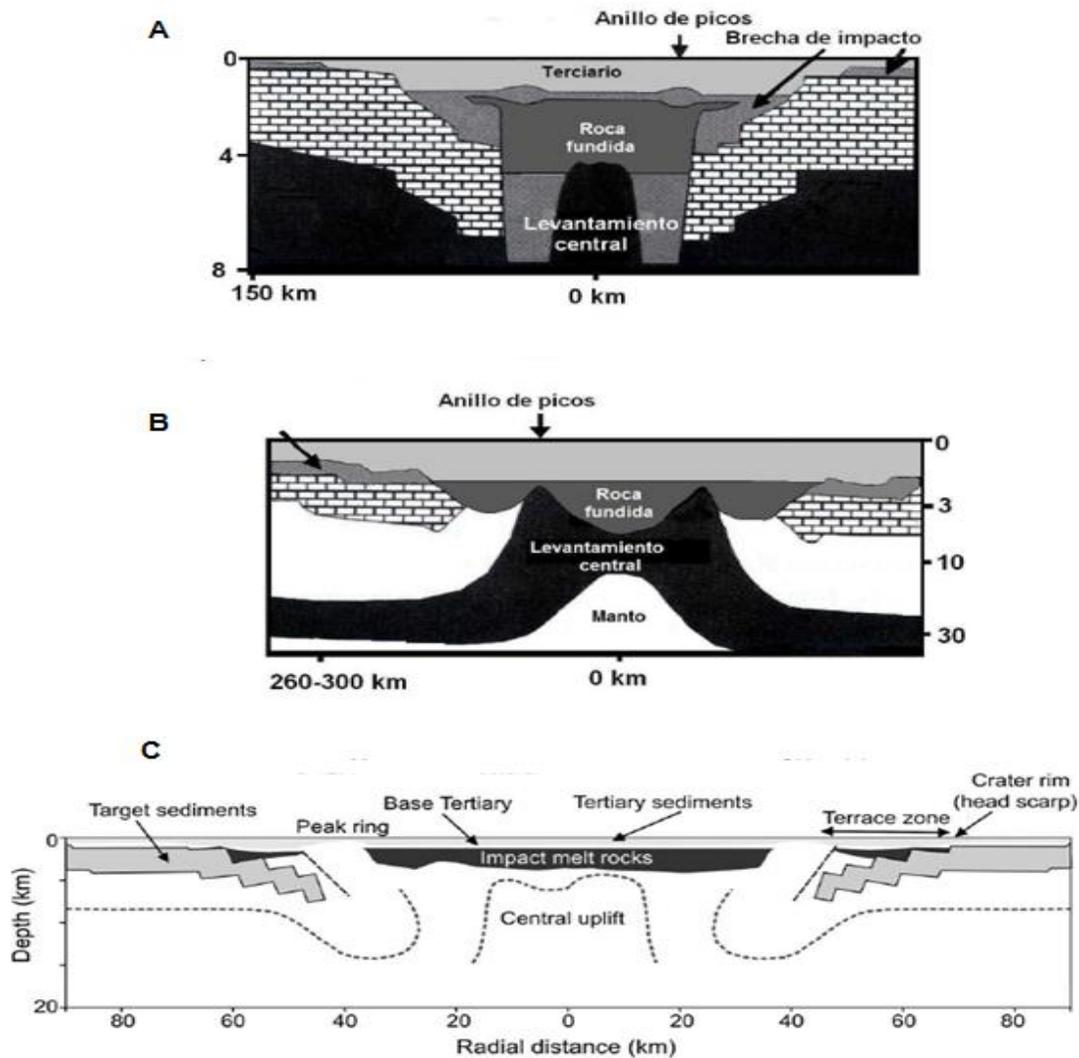


Fig. 1.10 Modelos estructurales propuestos del cráter Chicxulub²⁸: (A) Pilkington et al., 1994; (B) Sharpton et al., 1996 y (C) Collins et al., 2008.

²⁸ Aparte de los aquí ilustrados, otros modelos sobresalientes son de: Espíndola et al., (1995); Morgan et al., (1997, 2000, 2002 y 2004); Pilkington y Hildebrand, (2000); Gulick et al., (2008); Christeson et al., (2009); Vermeesch et al., (2009); Ortiz Alemán et al., (2010); Rebolledo Vieyra et al., (2010).

1.2.3 Estudios previos sobre el cráter.

Los primeros estudios geofísicos realizados en la península de Yucatán fueron realizados por Petróleos Mexicanos, que llevó a cabo trabajos de exploración en busca de petróleo a inicios de la década de 1950. Dichas investigaciones registrarían anomalías gravimétricas y magnéticas con patrones circulares de aproximadamente 200 kilómetros de diámetro en el margen septentrional de la península, los cuales en un inicio, fueron asociados a la presencia de un gran cráter volcánico (López Ramos, 1975)²⁹. La perforación de pozos exploratorios continuo y esto permitió recuperar núcleos de roca que hicieron posible hacer una nueva evaluación de los datos geofísicos, por lo cual Penfield y Camargo (1981) reinterpretarían dichas anomalías como la señal de la existencia de un cráter por impacto meteorítico, en correspondencia con la hipótesis planteada por Álvarez (et al., 1980). Posteriormente, Hildebrand (et al., 1991, 1998) y Sharpton (et al., 1992) utilizarían estos mismos núcleos para fechar la edad del cráter Chicxulub y asociarlo con el límite K/T.

Pilkington et al. (1994) mostraron una sección preliminar del cráter del Chicxulub, la cual está elaborada a partir de la información de pozos, datos gravimétricos, magnéticos y de reflexión sísmica. Espíndola et al. (1995) realizaron una modelación gravimétrica y magnética de la estructura del cráter. Hildebrand y colaboradores (1995) realizaron un procesamiento de los datos gravimétricos, que condujo a observar una correlación entre el gradiente horizontal³⁰ del campo gravimétrico y la distribución de los cenotes. Posteriormente se hicieron algunas perforaciones que ayudaron a establecer la estratigrafía de la zona del impacto (Camargo–Zanoguera, 1997).

A partir de entonces se han realizado numerosos estudios geofísicos y perforación de pozos para recopilar información que permitan obtener imágenes de alta resolución

²⁹ López Ramos interpretó esto de acuerdo a los registros litológicos de algunas de las perforaciones realizadas, como la presencia de rocas andesíticas asociadas a centros volcánicos.

³⁰ El gradiente horizontal del campo gravimétrico enfatiza el efecto de los cambios laterales de densidad y suprime el gradiente regional de dicho campo que esconde las evidencias gravimétricas del cráter.

del cráter, dentro y fuera de la línea de costa; caracterizar los depósitos producidos por el impacto y los sedimentos que cubren la estructura; así como determinar su tamaño y morfología, tales como: Hildebrand et al. (1991, 1998), Álvarez et al. (1995), Sharpton et al. (1992, 1993), Smith et al. (1992), Urrutia Fucugauchi et al. (1996, 2004, 2008, 2011), Rebolledo–Vieyra et al. (2004, 2010), Morgan et al. (1997, 2007), Campos–Enríquez et al. (1997; 2004), Gulick et al. (2008, 2013), Christeson et al. (2001, 2018). Esto por mencionar algunos de los trabajos más representativos.

;

CAPÍTULO II

PERFORACIÓN DE POZOS Y TOMA DE REGISTROS GEOFÍSICOS

Se han realizado numerosos estudios geofísicos en el cráter Chicxulub para investigar su naturaleza. Estos trabajos aportaron información fundamental que le han permitido a los diferentes grupos de investigadores elaborar modelos estructurales del cráter e indagar las consecuencias geológicas y ambientales del impacto. Sin embargo, para corroborar o corregir los datos obtenidos a través de las mediciones geofísicas y darles certidumbre a los modelos propuestos, es necesario contar con información directa sobre el Chicxulub, la cual sólo puede ser obtenida mediante el muestreo de la estructura a través de la perforación de pozos con la toma de registros geofísicos y extracción de muestras. Debido a esto, la perforación de pozos se ha convertido en una actividad crucial durante las expediciones científicas en el cráter.

Los primeros pozos exploratorios de donde se obtuvo información del cráter Chicxulub fueron realizados por Petróleos Mexicanos³¹. Posteriormente, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) implementaría un programa de perforación científica para ampliar los estudios sobre el cráter³². Luego, la misma Universidad realizaría dos proyectos más de perforación, uno en consorcio con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y el otro dentro del programa de investigación científica CSDP³³. Estas perforaciones se llevaron a cabo en la parte terrestre del Chicxulub (Fig. 2.1).

³¹ Los pozos que PEMEX perforaría dentro de la estructura del Chicxulub son el Yucatán-6 (Y-6), Chicxulub-1 (C-1) y Sacapuc-1 (S-1). Se perforaron otros pozos pero éstos no estuvieron dentro del cráter, los cuales son: Ticul-1, Yucatán-1, Yucatán-2, Yucatán-4, Yucatán-5 y Yucatán-5A.

³² La UNAM comenzaría este programa en 1994, en él perforaría ocho pozos de los cuáles sólo tres interceptarían material del impacto (Urrutia Fucugauchi et al., 1996; Rebolledo Vieyra et al., 2000, 2005): pozo UNAM-5 (U-5) también llamado Santa Elena-5 (SE-5); pozo UNAM-6 (U-6) también llamado Peto-1 (PE-1) y pozo UNAM-7 (U-7) mejor conocido como Tekax-1 (TK-1).

³³ CSDP son las siglas en inglés para Proyecto Científico de Perforación del Cráter Chicxulub (*The Chicxulub Scientific Drilling Project*), el cual está integrado por la UNAM, la ICDP y el GFZ (*Geo Forschungs Zentrum*). Durante este programa se perforó el pozo Yaxcopoil-1 (Yax-1) en 2002.

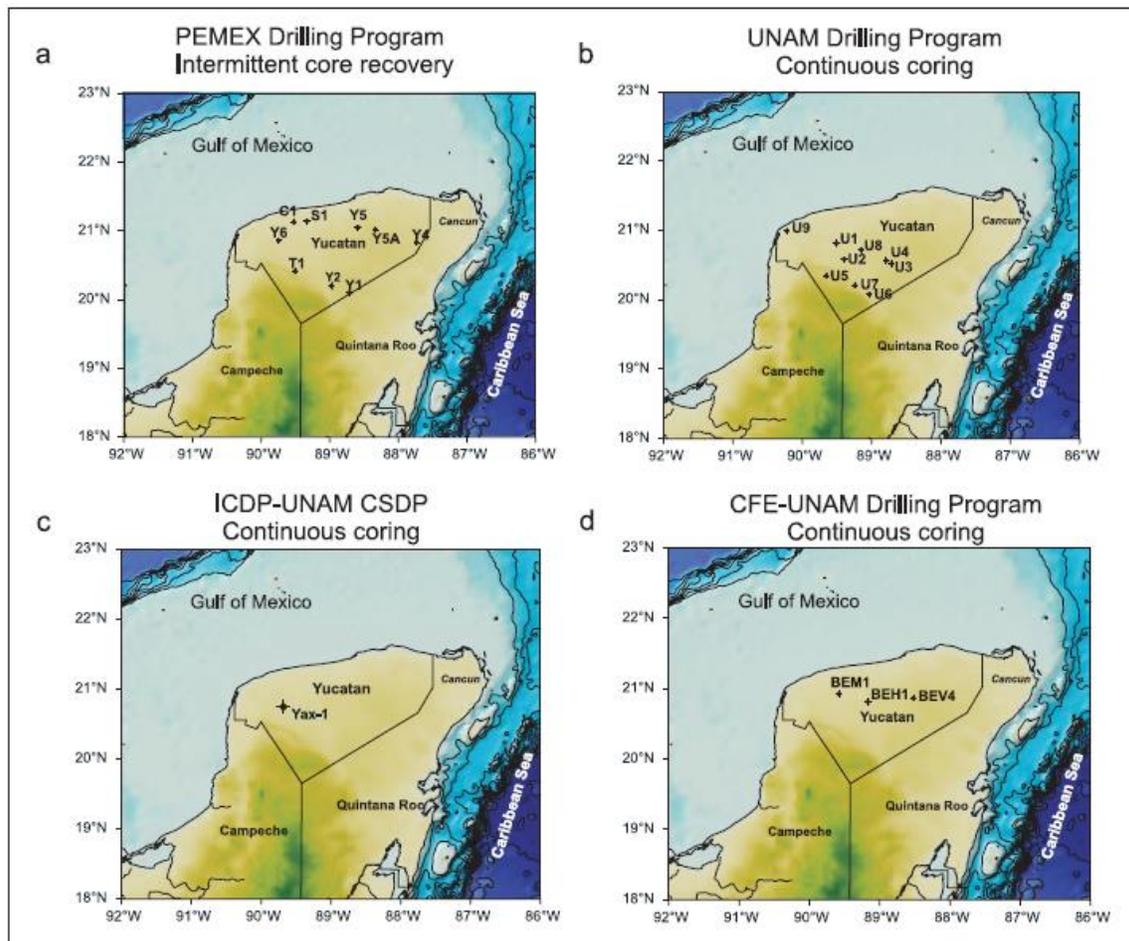


Fig. 2.1 Síntesis de los programas de perforación en la Plataforma de Yucatán y la parte terrestre del cráter Chicxulub (Urrutia Fucugauchi et al., 1996, 2008): (a) Programa de Perforación de Pemex (nueve pozos en total); (b) Programa de Perforación de la UNAM (ocho pozos perforados); (c) Proyecto CSDP (un pozo); y (d) Programa de Perforación CFE–UNAM (tres pozos) (Tomado de Urrutia Fucugauchi et al., 2011).

Además de estos proyectos de perforación continental, se ha iniciado un programa de perforación marina (Fig. 2.2). Mientras las perforaciones terrestres tenían como objetivo confirmar la existencia del Chicxulub como una estructura de impacto, delimitar su tamaño y litologías (UNAM y CSDP), así como la búsqueda de recursos energéticos e hidrológicos asociados al cráter (PEMEX, CFE–UNAM); las perforaciones marinas están orientadas a investigar características provocadas por el impacto meteorítico: (1) la formación del anillo de picos, (2) características morfológicas y estructurales de la cavidad, y (3) efectos de la biota, paleoclimáticos y ambientales producidos por la colisión; es decir, buscan obtener muestras directas

que permitan aportar nueva información y ampliar la obtenida con los estudios geofísicos realizados en la zona para mejorar los modelos estructurales propuestos. La perforación marina comenzó en 2016 por un equipo internacional de científicos de la IODP y la ICDP que conformaron la Expedición 364 (Morgan et al., 2017; Christeson, et al., 2018), la cual se detallará más adelante.

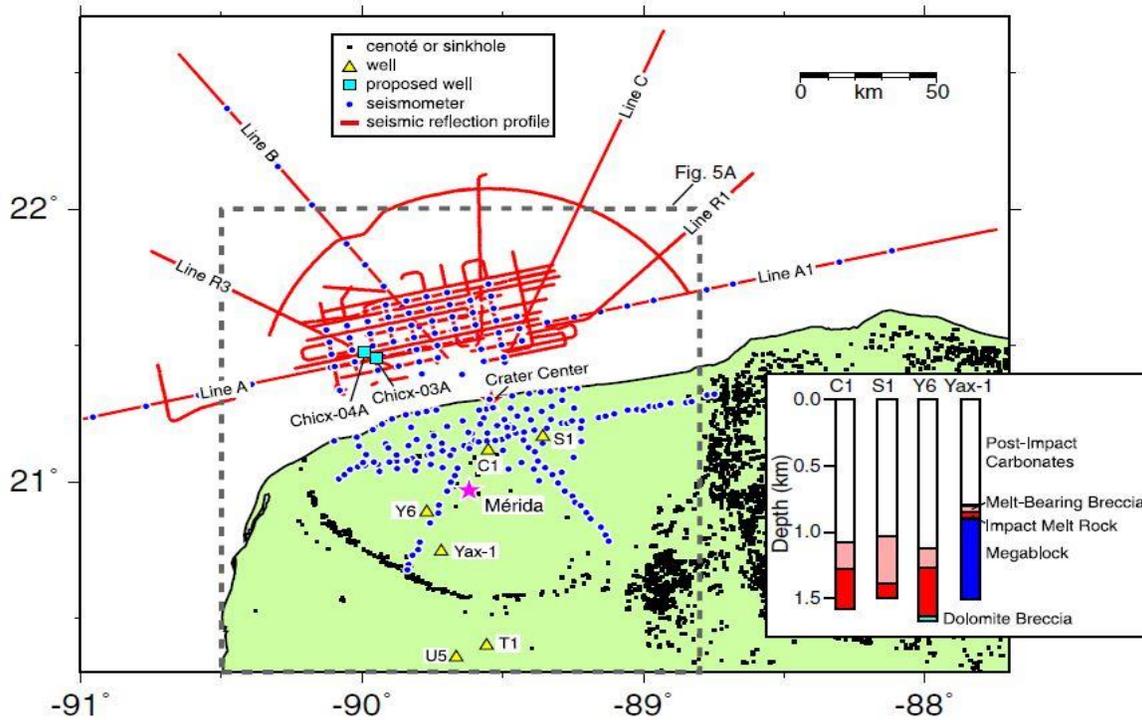


Fig. 2.2 Mapa de ubicación de los pozos propuestos en el programa de perforación marina: Chicx-03A y Chicx-04A (Gulick et al., 2013)³⁴.

En el primer capítulo se expusieron las características geológicas de la Plataforma de Yucatán, las cuáles proporcionaron condiciones ideales (baja actividad tectónica y ausencia de magmatismo) para que el cráter Chicxulub se conservara enterrado debajo de sedimentos que preservaron su estructura de erosiones y deformaciones. Sin embargo, a cambio de ello, no existen afloramientos superficiales de las litologías de impacto, por ello la perforación de pozos es fundamental para obtener muestras directas que los estudios geofísicos no pueden suministrar.

³⁴ Además de mostrar la localización de los pozos marinos propuestos, este mapa muestra un rectángulo en líneas punteadas que indica el campo de anomalías aeromagnéticas del Chicxulub (Ortiz Alemán y Urrutia Fucugauchi, 2010); lo cenotes y sumideros en puntos negros (Connors et al., 1996); con estrellas se señalan las localizaciones de la ciudad de Mérida y el centro nominal del cráter; el recuadro muestra la estratigrafía de cuatro pozos a distancias radiales (de izquierda a derecha) más cercanas al centro del cráter (Dressler et al., 2004; Stöffler et al., 2004).

El material directo que puede obtenerse con la perforación de pozos permite identificar la columna litológica que se está atravesando, así como sus características físicas y estructurales. Esta información proviene de dos fuentes principales: (1) muestras de roca y (2) registros geofísicos de pozo.

Las *muestras de roca* se dividen en dos tipos: (a) muestras de canal y (b) núcleos. Las muestras de canal conocidas comúnmente como recortes o detritos, son generadas por la barrena y llevadas a la superficie desde el fondo del pozo mediante la circulación de los fluidos de perforación, por lo cual no son un material muy confiable, pues al estar contacto con los fluidos, sufren una invasión de éstos dentro de su espacio poroso, haciendo difícil determinar con precisión algunos de sus parámetros. Los *núcleos* son las muestras de roca más completas, pues se obtienen mediante herramientas especiales para su recuperación, por lo que poseen un tamaño estándar para su estudio y tienen marcada la profundidad a la cual se tomaron. Los registros geofísicos de pozo son mediciones de las variaciones de las propiedades físicas de las rocas contra la profundidad. Existen diferentes tipos de registros, los cuáles están en función de las propiedades físicas que medirán. Proporcionan datos directos durante la perforación y son fundamentales para la delimitación de las litologías y sus características. Al existir registros geofísicos que miden diferentes propiedades, suelen tomarse un conjunto de registros diferentes al mismo tiempo para correlacionar la información obtenida entre ellos y realizar una evaluación más confiable y certera de las formaciones atravesadas. La toma de registros suele ser una operación más factible técnica y económicamente en las exploraciones científicas y de recursos naturales, por lo cual el avance tecnológico para este método ha sido mayor al de la recuperación de muestras de rocas.

Las muestras directas permiten corroborar o reevaluar los datos geofísicos, como en el pasado, que los datos obtenidos durante la perforación de los primeros pozos permitieron determinar que el cráter Chicxulub era de impacto y no uno volcánico (Penfield y Camargo, 1981), por mencionar un ejemplo de su relevancia.

2.1 Propiedades petrofísicas.

Las propiedades petrofísicas son características físicas y químicas de las rocas que varían con la profundidad y en presencia de fluidos³⁵, permiten determinar la naturaleza³⁶ de las formaciones que se encuentran en el subsuelo. Las propiedades petrofísicas más importantes son: (a) porosidad, (b) permeabilidad, (c) saturación de fluidos y (d) resistividad. A continuación se hace una breve descripción de ellas:

(a) POROSIDAD: esta propiedad se refiere al volumen de poros (*huecos o espacios vacíos*) en una roca, y se expresa en términos de porcentaje o en fracción decimal. También se le conoce como la capacidad de una roca para almacenar fluidos. Existen diferentes tipos de porosidades³⁷, los cuales dependen de factores como: *arreglo, forma y tamaño de los granos, tipo de fábrica, empaquetamiento y cementación*. Convencionalmente se simboliza con la letra griega ϕ .

(b) PERMEABILIDAD: esta propiedad se define como la capacidad de una roca de permitir el flujo de fluidos a través de su medio (*poros interconectados*) cuando se encuentra saturada al cien por ciento de fluido. Generalmente se mide en Darcies³⁸. También existen diferentes tipos de permeabilidades³⁹, las cuáles están en función de: *tamaño, arreglo de los granos y tipo de cemento entre ellos*;

³⁵ A esta interacción se le conoce como *sistema roca-fluido*. Estos fluidos pueden ser agua, hidrocarburos o fluidos hidrotermales.

³⁶ Esta naturaleza está determinada por condiciones petrográficas como su mineralogía, anisotropía, parámetros texturales, tamaño de grano y discontinuidades como fracturas.

³⁷ Porosidad primaria (*intergranular e intrapartícula*), porosidad secundaria (*por fractura o disolución*), porosidad efectiva (*volumen de poros interconectados disponibles para el movimiento de fluidos*), porosidad no efectiva (*espacios vacíos que no están interconectados entre sí*) y porosidad total (*se refiere a todo el espacio vacío de la roca, incluyendo los poros aislados*).

³⁸ Se define que una roca tiene una permeabilidad de 1 darcy, si un centímetro cúbico de un fluido con una viscosidad de 1 centipoise fluye por un segundo a través de un centímetro cuadrado bajo un gradiente de presión de 1 atmósfera. Para efectos de comparación, la viscosidad del agua a 20 °C es de 1.005 centipoise.

³⁹ Se clasifica en permeabilidad absoluta (*cuando sólo una fase del fluido está presente en la roca*), permeabilidad efectiva (*capacidad de la roca de conducir un fluido a través de ella en presencia de otro inmisible con el primero*) y permeabilidad relativa (*es la relación entre la permeabilidad efectiva de un fluido determinado a una saturación parcial y la permeabilidad de otro fluido a una saturación del cien por ciento*).

dimensión y grado de conectividad de los poros. Convencionalmente se representa con la letra K.

(c) SATURACIÓN DE FLUIDOS: es la relación del volumen de los fluidos dentro del volumen total de poros, es decir, la cantidad de fluidos contenidos en una roca. Está expresada en términos de porcentaje del volumen poroso⁴⁰. La saturación se representa usualmente con la letra S y un subíndice o letra minúscula dependiendo del fluido del que se trate, por ejemplo, para referirnos a una saturación de agua la representaríamos como S_w , para una saturación de petróleo la nomenclatura sería de S_o ⁴¹.

(d) RESISTIVIDAD: es la propiedad de un material para impedir u oponerse al flujo de una corriente eléctrica a través de su medio. Sus unidades son Ohm por metro ($\Omega \cdot m$). Se clasifica dependiendo del medio en el que se mide, si este es anisótropo o isótropo⁴². La resistividad es el inverso de la conductividad. Convencionalmente la resistividad se simboliza con la letra R. En petrofísica hay dos tipos de resistividad: R_t (resistividad profunda) y R_{xo} (resistividad somera) que tienen que ver con el nivel de medición de la herramienta de registro.

Si bien estas no son todas las propiedades petrofísicas, son las más determinantes. Existen registros geofísicos de pozo que miden otras características⁴³ pero que tienen como propósito final medir de forma indirecta éstas mismas propiedades junto con otros atributos que permitan una mejor evaluación geológica.

⁴⁰ Por ejemplo, una saturación de agua del 30%, significa que 30/100 del espacio poroso está lleno con agua.

⁴¹ Es conveniente recordar que existen más conceptos relacionados con el término de saturación de fluidos, principalmente usados en la caracterización de yacimientos para la explotación de recursos naturales, tales como la saturación intersticial o congénita, saturación irreductible y saturación residual.

⁴² Si se trata de un medio isótropo se define como *resistividad aparente*; si se trata de un medio anisótropo, la resistividad se divide en dos componentes: *resistividad paralela, horizontal o longitudinal* (medida cuando el flujo de corriente es paralelo a los límites de las capas) y *resistividad perpendicular, vertical o transversal* (cuando el flujo de corriente es perpendicular a los estratos) considerando un pozo vertical y estratos horizontales.

⁴³ Otras propiedades petrofísicas importantes son: radiactividad, susceptibilidad magnética, tiempo de tránsito (ondas sísmicas), potencial natural (espontáneo), temperatura, densidad y conductividad eléctrica.

2.2 Registros geofísicos de pozo.

Un registro geofísico de pozo es la representación gráfica (digital o analógica) de una propiedad física de las rocas en función de su profundidad (Fig. 2.3), indica las características geológicas de las formaciones atravesadas por un pozo y proporciona información sobre la perforación del mismo⁴⁴.

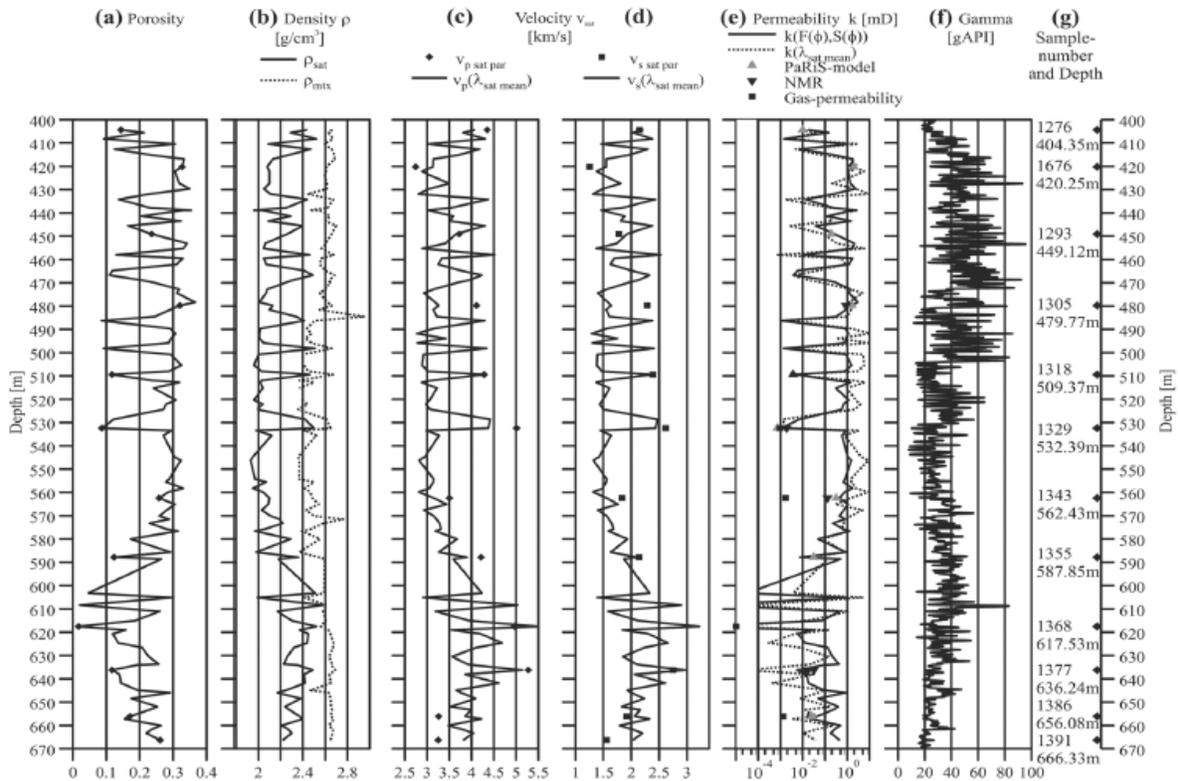


Fig. 2.3 Ejemplos de registros geofísicos de pozos representando diversas propiedades petrofísicas a profundidad: (a) porosidad, (b) densidad de rocas saturadas y de la matriz, (c) y (d) muestran velocidades de onda P y S respectivamente, (e) permeabilidad, (f) registro gamma y (g) número de muestras y su profundidad en metros. Los registros de esta imagen pertenecen al pozo Yaxcopoil-1 (Popov et al., 2004).

Algunos registros miden características directa o indirectamente de la roca, otros de los fluidos contenidos en ellas. Con los valores obtenidos y utilizando modelos matemáticos, se caracterizan y aproximan las propiedades físicas de las formaciones.

⁴⁴ Algunos registros geofísicos son específicos para medir el estado mecánico del pozo, proporcionan información sobre: diámetro del agujero, calidad en la cementación de las tuberías y desviación del pozo, por mencionar algunos datos.

Existen diferentes tipos de registros geofísicos de pozos⁴⁵, los cuáles se clasifican en dos categorías principales: (1) en función de la propiedad petrofísica que miden y (2) en función del principio físico de la herramienta:

(1). En función de la propiedad petrofísica que miden se clasifican en: *resistivos* y *porosos*.

→ Resistivos: Miden la diferencia de potencial causada por el paso de la corriente eléctrica a través de las rocas.

→ Porosos: Miden la densidad de los materiales que circundan el pozo, proporcionan información sobre los cambios litológicos y la presencia de fluidos.

(2). Con base en el principio físico de la herramienta se dividen en: *resistivos*, *acústicos*, *radiactivos* y *mecánicos*.

→ Resistivos: se tienen dos tipos de herramientas resistivas: los de resistividad profunda (Rt) y los de resistividad somera (Rxo). En los de resistividad profunda se encuentran el *eléctrico (ES)*, *eléctrico enfocado (LL)*, *doble eléctrico enfocado (DIL)*, *potencial espontáneo (SP)*, *inducción (I-ES)*, *doble inducción-eléctrico enfocado (DIL)*, *doble laterolog (DLL)*, *eléctrico enfocado azimutal (ARI)* y el de *arreglo de inducción (AIT)*. En los de resistividad somera se hallan el *microeléctrico (ML)*, *microeléctrico enfocado (MLL)*, *microproximidad (MPL)* y *microesférico enfocado (MSFL)*.

→ Acústicos: estos registros son mediciones continuas del tiempo que emplea una onda sonora compresional en viajar a través de la formación. El tiempo requerido para este viaje se denomina *tiempo de tránsito*. Su objetivo es medir la porosidad, lo cual dependerá de las litologías y la presencia de fluidos. Se tienen cuatro tipos de herramientas acústicas: *sónico de porosidad (BHC)*, *sónico de amplitud (A-BHC)*, *sónico de densidad variable (VDL)* y *BHTV-TV POZO*.

⁴⁵ En esencia, los registros funcionan de la misma forma: una sonda envía una señal hacia la formación o el pozo y posteriormente la señal regresa a la herramienta (alterada por la formación), la sonda lee la señal devuelta, y así sucesivamente hasta haber medido las profundidades deseadas.

- Radiactivos: este tipo de registros determinan la radiactividad natural de las formaciones⁴⁶. Se basan en mediciones de éstas características producto de la desintegración natural de pequeñas cantidades de elementos radiactivos presentes en las rocas. Todas las formaciones tienen contenidos variables de material radiactivo cuya magnitud depende de las características individuales de las rocas que las componen⁴⁷. Se tienen cinco tipos de herramientas nucleares: rayos gamma, neutrones, densidad (radiación natural), radiactividad inducida y de propagación electromagnética. En los rayos gamma se encuentran *rayos gamma naturales (GR)* y *espectroscopía de rayos gamma naturales (NGT)*; en los de neutrones tenemos *radiactivo (GNT)*, *epitermal (SNP)* y *compensado (CNL)*; en los de densidad se hallan los de *densidad de formación (FDC)* y *litodensidad (LDC)*; los de radiactividad inducida son *rayos gamma inducido (GST)* y *tiempo de decaimiento termal (TDT)*; en el de propagación electromagnética se encuentra la *resonancia magnética nuclear (NRM)*.
- Mecánicos: este tipo de registros tienen herramientas que miden específicamente características del pozo y su estado mecánico. Se tienen los registros de temperatura, calibración (caliper) y desviación del pozo.

La selección de los registros geofísicos de pozo depende de múltiples factores que van desde los aspectos técnicos y económicos⁴⁸, la ubicación del pozo y sus características⁴⁹, hasta el tipo de formación y las propiedades que se van a medir.

⁴⁶ Casi todas las rocas presentan cierta radiactividad natural, la fuente más abundante de ella se encuentra en el isótopo del potasio (⁴⁰K) y en los elementos radiactivos de las series del uranio (²³⁸U) y el torio (²³²Th).

⁴⁷ La radiactividad natural está en función del tipo de formación, la edad y el proceso de depositación de los sedimentos. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido arcilloso, porque los elementos radiactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas. Las formaciones limpias de arcillas generalmente tienen un nivel muy bajo de radiactividad a menos que existan contaminantes como cenizas volcánicas, residuos de granito o que el agua de formación contenga sales radiactivas disueltas.

⁴⁸ Disponibilidad de los equipos de perforación y toma de registros, tiempo y costos de éstas actividades; profundidad que se va a medir, los pozos exploratorios generalmente requieren un programa completo de toma de registros, mientras que los pozos de desarrollo tienen objetivos previamente delimitados.

⁴⁹ Si el pozo es terrestre o marino, su desviación y tipo de terminación (*esta determina la forma de tomar el registro que puede ser en agujero entubado o descubierto*), el diámetro del pozo y los fluidos de perforación utilizados.

2.3 Expedición 364 IODP: Programa de Perforación Marina.

En el 2016 (de abril a mayo), el Programa Internacional de Descubrimiento de los Océanos (IODP) y el Programa Internacional Continental de Perforación Científica (ICDP) llevaron a cabo conjuntamente la Expedición 364⁵⁰, en la cual perforaron el pozo Chicx–03A para llegar al anillo de picos del cráter Chicxulub (Gulick et al., 2016) (Fig. 2.4).



Fig. 2.4 Mapa del sitio de la Expedición 364–IODP (Tomado de ECORD⁵¹).

Los objetivos científicos que la Expedición 364 abordan tres temas principales (Morgan et al., 2017):

- (1). Formación del anillo de picos: ¿Cuál es la naturaleza de las rocas que forman el anillo de picos?, ¿de qué nivel de la corteza (superior, media o inferior) provienen las rocas que lo integran?, ¿por qué el anillo tiene bajas densidades y velocidades

⁵⁰ La expedición fue coordinada por el Consorcio Europeo de Perforación en Océanos. El equipo científico incluyó 32 investigadores de 12 países: Estados Unidos, México, Japón, Australia, Canadá, China, Bélgica, Inglaterra, Austria, Alemania, Francia y Países Bajos.

⁵¹ Son las siglas en inglés del *European Consortium for Ocean Drilling Research*. Mapa tomado de su página de internet: www.ecord.org

sísmicas?, ¿hubo intensa actividad hidrotermal en las rocas que formaron el anillo de picos?, de ser así ¿cuánto tiempo duró esta actividad?

- (2). Efectos en la biota, paleoclimáticos y ambientales: ¿Qué tipo de vida microbiana colonizó el anillo de picos?, ¿fue diversa o exótica?, ¿su origen estuvo relacionado con el sistema hidrotermal posterior al impacto?, ¿cuánto tiempo tomó la recuperación de la vida en los océanos?, ¿en la zona de impacto la biodiversidad se restableció gradualmente?, ¿cómo se afectaron los diversos ecosistemas?, ¿los organismos retornaron una vez que las condiciones ambientales se estabilizaron?, ¿cómo fueron las relaciones entre las especies sobrevivientes al evento del K/Pg, la evolución de nuevos taxones y la supervivencia después del impacto?
- (3). Características morfológicas y estructurales del cráter: ¿Cuál fue su cinemática y dinámica de formación?, ¿cuáles son los mecanismos que debilitan a las rocas durante los grandes impactos?, ¿cuál es la composición y el carácter de las brechas de impacto y las rocas fundidas?, ¿cómo se fue sedimentando la cavidad producida por el impacto?

2.3.1 Pozo Chicxulub–03A.

El pozo Chicxulub–03A (Chicx–03A) se perforó en la costa norte de la Península de Yucatán a 30 kilómetros al noroeste de Puerto Progreso; se sitúa geográficamente en la latitud 21°27.009'N y longitud 89°56.962'W del meridiano de Greenwich (Fig. 2.5). El sitio de perforación de este pozo se determinó con base en los conjuntos de datos sísmicos adquiridos en 1996 y 2005 que tomaron imágenes del anillo de picos⁵² (Morgan et al., 2016, 2017). El pozo se perforó en un tirante de agua de 19.8 metros y tiene una profundidad total de 1334.69 metros (Gulick et al., 2017), de la cual se recuperaron 839.51 metros de muestras de roca (núcleos) y se midieron 1334.4 metros con registros geofísicos (Morgan et al., 2017).

⁵² Estudios geofísicos marinos (*perfiles de sismica de reflexión*) registraron que el anillo de picos está compuesto por rocas con una baja velocidad sísmica (Morgan et al., 2017).

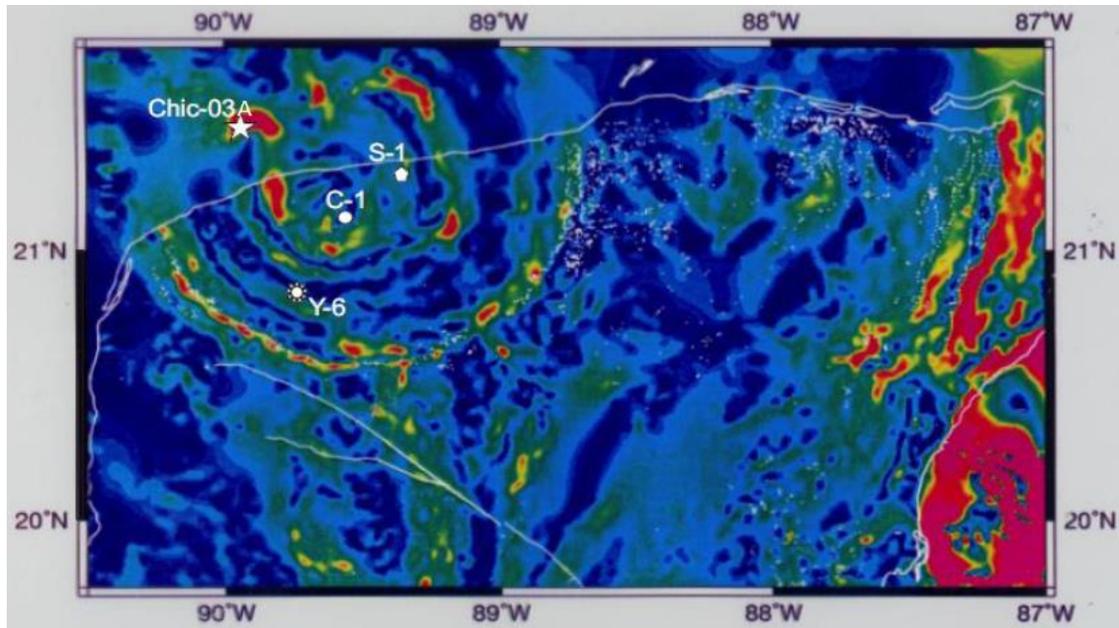


Fig. 2.5 Localización del pozo Chicx–03A en un mapa de baja gravedad en el sector central marino del cráter (Morgan et al., 2016)⁵³.

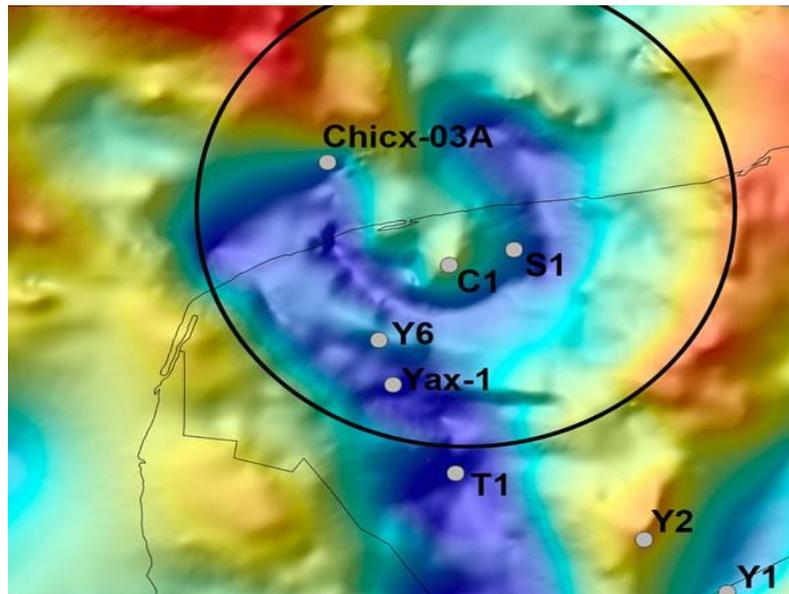


Fig. 2.6 Ubicación del pozo Chicx–03A en un mapa de anomalías de Bouguer (Kring, 2016)⁵⁴.

⁵³ Los pozos Chicxulub–1 (C–1), Sacapuc–1 (S–1) y Yucatán–6 (Y–6) también se muestran en este mapa de anomalías de gravedad del gradiente horizontal (Connors et al., 1996).

⁵⁴ El círculo negro describe el tamaño aproximado del cráter; se muestran los pozos perforados originalmente: C–1, S–1 y Y–6 que tuvieron recuperación intermitente de muestras de roca; los pozos T–1, Y–1 y Y–2 no se encuentran dentro de la estructura del Chicxulub; Yax–1 fue el primer pozo perforado con un programa de extracción continua de núcleos.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS

La perforación de pozos proporciona el material directo necesario para caracterizar las litologías de una formación con mayor certidumbre a través del estudio de los núcleos recuperados, los registros geofísicos medidos, y correlacionando ambos materiales si se cuenta con las dos fuentes de información. El objetivo de esta tesis es realizar una caracterización petrofísica del pozo Chicx–03A mediante el análisis de sus registros geofísicos para determinar las características geológicas y estructurales de la columna atravesada por el Chicx–03A. Se utilizarán únicamente estas mediciones por tres motivos: (1) no se ha realizado un trabajo similar sobre este pozo; (2) por disponibilidad de la información, pues aunque se cuenta con algunas muestras de roca, este material no tiene la misma facilidad de manejo para su investigación como la que poseen los registros⁵⁵; y (3) para demostrar que el sustentante adquirió los conocimientos fundamentales durante sus estudios de posgrado para resolver problemas científicos de esta índole y que desarrolló habilidad en el manejo de la metodología empleada. La interpretación cualitativa de los registros está compuesta de una descripción general del conjunto de éstos para detallar una columna geológica e identificar zonas específicas de interés. Para realizar una eficiente interpretación es necesario tener conocimientos previos de los principios de operación de estas herramientas y de los atributos físicos que miden. Por ello, anteriormente se hizo una breve revisión de los tipos de registros geofísicos de pozo y las propiedades petrofísicas que determinan. En este capítulo se describen los registros tomados en el pozo Chicx–03A y la metodología empleada para su análisis.

⁵⁵ Después de su recuperación, los núcleos del Chicx–03A se exportaron al *Bremen Core Repository* de Alemania, donde un año después se realizó un taller científico para brindar un informe de las muestras y dividir las a los diferentes grupos de investigación para continuar con su estudio (Gulick et al., 2017). Se repartieron a centros de investigación en geociencias como el *Gulf Coast Repository* de Estados Unidos, el *Kochi Core Center* de Japón y el *Instituto de Geofísica* de la UNAM en México, entre otros organismos.

3.1 Registros geofísicos del pozo Chicxulub – 03A.

El conjunto de los registros geofísicos de pozo medidos en el Chicx–03A fue determinado por los objetivos científicos de la Expedición 364, la técnica de perforación y extracción de núcleos utilizada⁵⁶, y las condiciones mecánicas del pozo durante las operaciones de su construcción (Gulick et al., 2017) (Fig. 3.1).

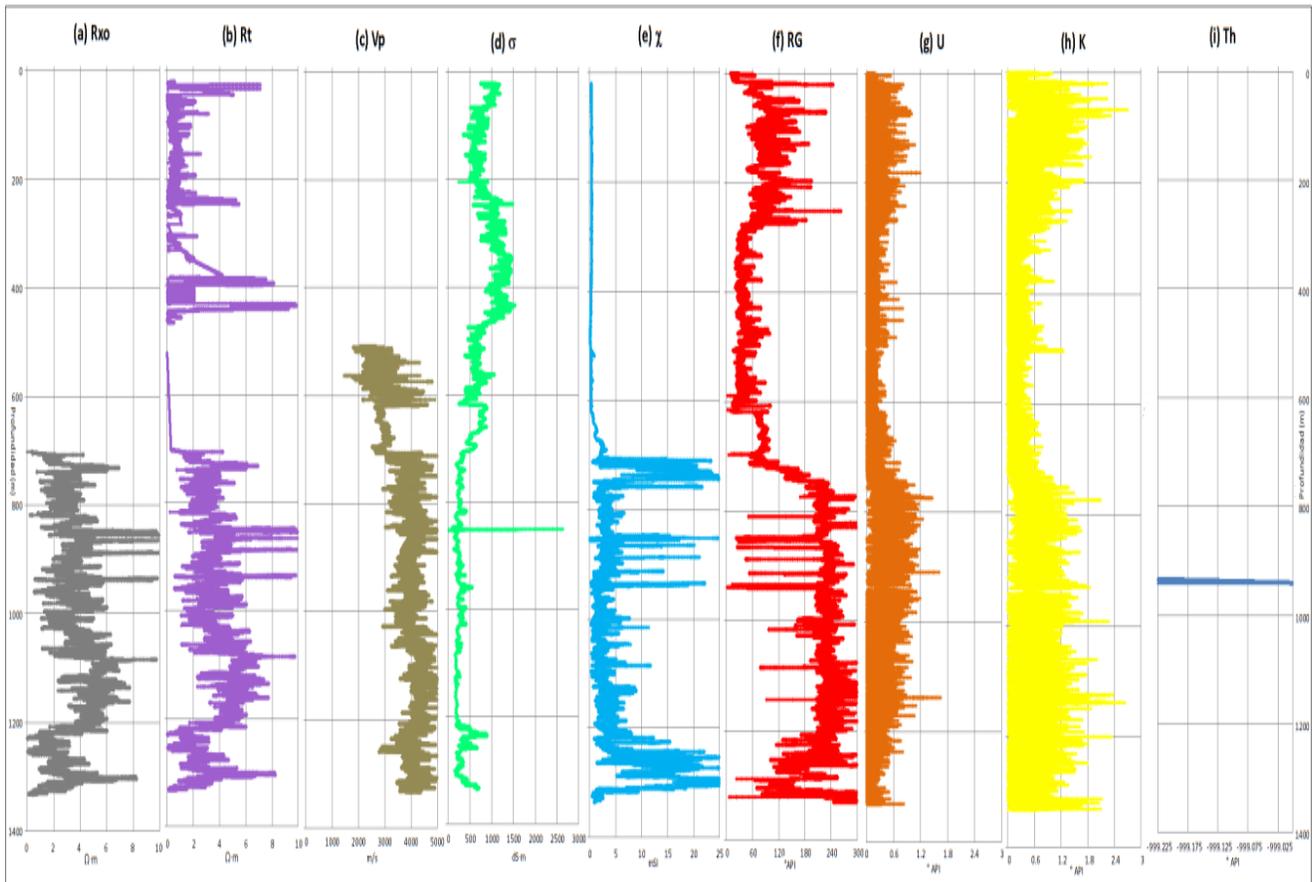


Fig. 3.1 Síntesis de los registros geofísicos del pozo Chicx–03A: (a) y (b) son de resistividad somera y profunda respectivamente; (c) velocidad de onda P; (d) conductividad eléctrica; (e) susceptibilidad magnética; (f) rayos gamma; (g), (h) e (i) muestran los contenidos de uranio [U], potasio [K] y torio [Th] correspondientemente (Fuente: IODP, elaboración propia).

⁵⁶ El Chicx–03A se perforó utilizando una plataforma tipo *jack-up* (*autoelevable*) llamada L/B Myrtle, debido a su profundidad inicial estimada de 1500 metros debajo del lecho marino y su ubicación en aguas someras (tirante de agua de 19.8 metros). La Myrtle estuvo asistida por otra plataforma de menor tamaño llamada Atlas Copco T3WDH y el buque Justo Sierra perteneciente a la UNAM. Los núcleos extraídos tienen un tamaño aproximado de 83 milímetros de diámetro (Gulick et al., 2017).

Se midieron un total de seis parámetros con sus respectivas componentes⁵⁷. Este grupo de datos revela la información necesaria para detallar las variaciones relacionadas con las propiedades físicas de las diferentes litologías, orientación de las estructuras geológicas, propiedades elásticas de las rocas y geometría del pozo.

La toma de registros se llevó a cabo en tres etapas: (1) intervalo superior de 0–503 metros, (2) intervalo medio de 506–699 metros e (3) intervalo inferior de 700–1334 metros (Morgan et al., 2017).

3.2 Metodología de análisis.

Una vez obtenidos los datos de los registros geofísicos del pozo, el primer paso fue representarlos en una gráfica de dos dimensiones (propiedad física versus profundidad)⁵⁸. Como segundo paso se hace una descripción general de cada medición. Luego, se realiza un examen gráfico y numérico para dividir los registros en diferentes *unidades* que posean el mismo comportamiento, es decir, que tengan un rango de valores semejante. Una vez identificadas estas unidades se les efectúa un análisis estadístico⁵⁹ particular para obtener los estadígrafos⁶⁰ necesarios que permitan su evaluación cualitativa y definir las litologías detectadas por los registros, pues cada unidad representa una capa distinta. Con esta metodología, además de determinar el número y tipo de litologías encontradas, se pueden identificar perfiles de concordancia entre el conjunto total de los registros, lo cual ayudará a elaborar una caracterización petrofísica del pozo Chicx–03A.

⁵⁷ Además de los cinco parámetros mostrados en la figura 3.1, se midieron los factores mecánicos del pozo: *temperatura, diámetro del agujero, desviación, orientación e imágenes de pared de pozo*.

⁵⁸ La IODP proporciona los datos de los registros geofísicos del pozo compilados en una tabla de valores numéricos, no en su representación gráfica.

⁵⁹ Esto debido a la gran cantidad de información con la que se cuenta, pues las mediciones se realizaron centímetro a centímetro, obteniendo un total de 133,440 datos por registro.

⁶⁰ Término empleado para designar variables que definen una distribución estadística de una serie de datos muestrales para su análisis. Los estadígrafos se clasifican dependiendo del valor y naturaleza de las variables en: (a) medidas de tendencia central (*moda, media y mediana*), (b) medidas de posición (*deciles, cuartiles, percentiles y quintiles*) y (c) medidas de dispersión (*rango, desviación estándar y varianza*).

(a) Registros de resistividad:

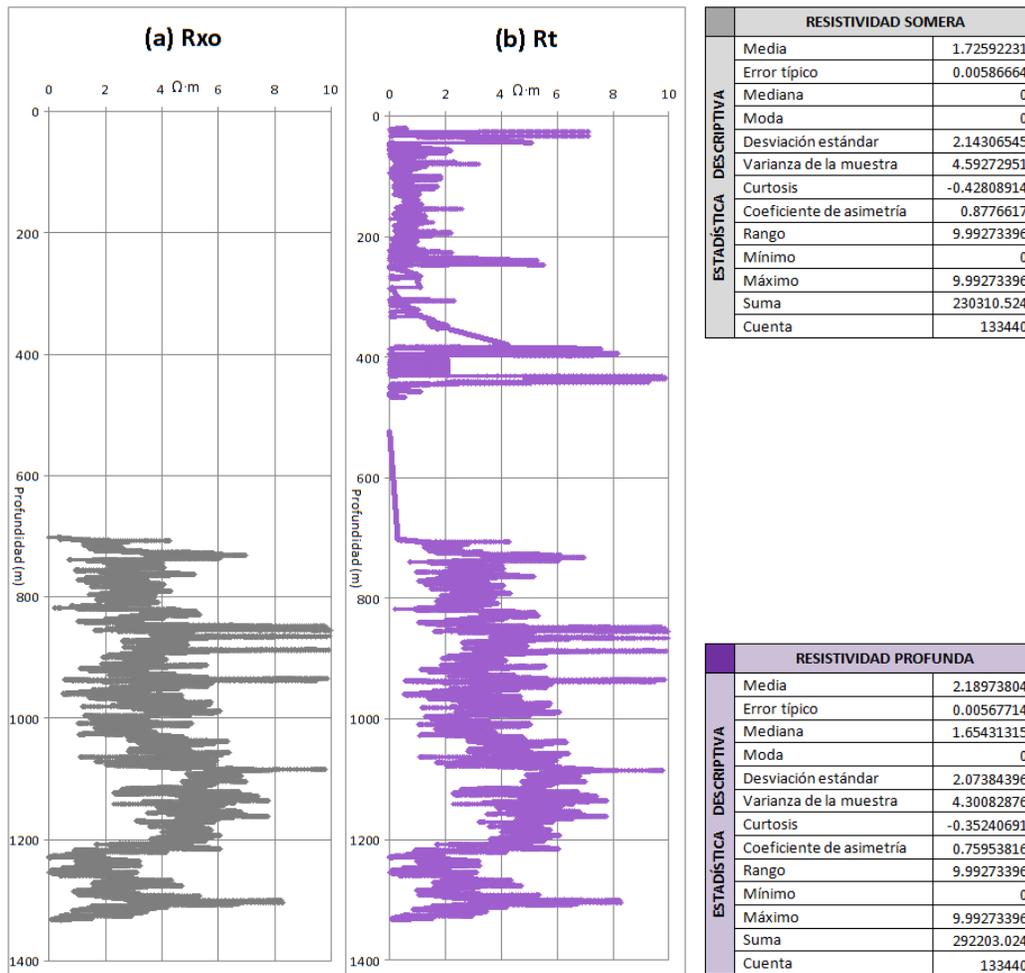


Fig. 3.2 Registros de resistividad: (a) somera (Rxo) y (b) profunda (Rt).

Este tipo de registros miden la resistividad eléctrica (R) de los materiales que circundan el pozo. Proporcionan información referente a las litologías⁶¹ y los fluidos⁶². Estos perfiles se leen de izquierda a derecha. Su unidad de medida es el Ohm por metro ($\Omega \cdot m$), el rango de valores de los aquí mostrados va de 0–10 $\Omega \cdot m$. De estos registros se obtienen dos curvas, una de resistividad somera (Rxo) y la otra de resistividad profunda (Rt)⁶³.

⁶¹ Relativa a su mineralogía, porosidad, permeabilidad, espesor de los estratos y cambios litológicos, principalmente.

⁶² Tipo de fluidos, salinidad de las aguas, presencia de hidrocarburos y la temperatura a la que se encuentran.

⁶³ Estas curvas están relacionadas con la profundidad de investigación hacia la formación. Rxo también recibe los nombres de *normal corta* o *resistividad de zona lavada*, Rt los de *normal larga* o *resistividad verdadera*.

(b) Registro de velocidad de Onda P⁶⁴ (Vp):

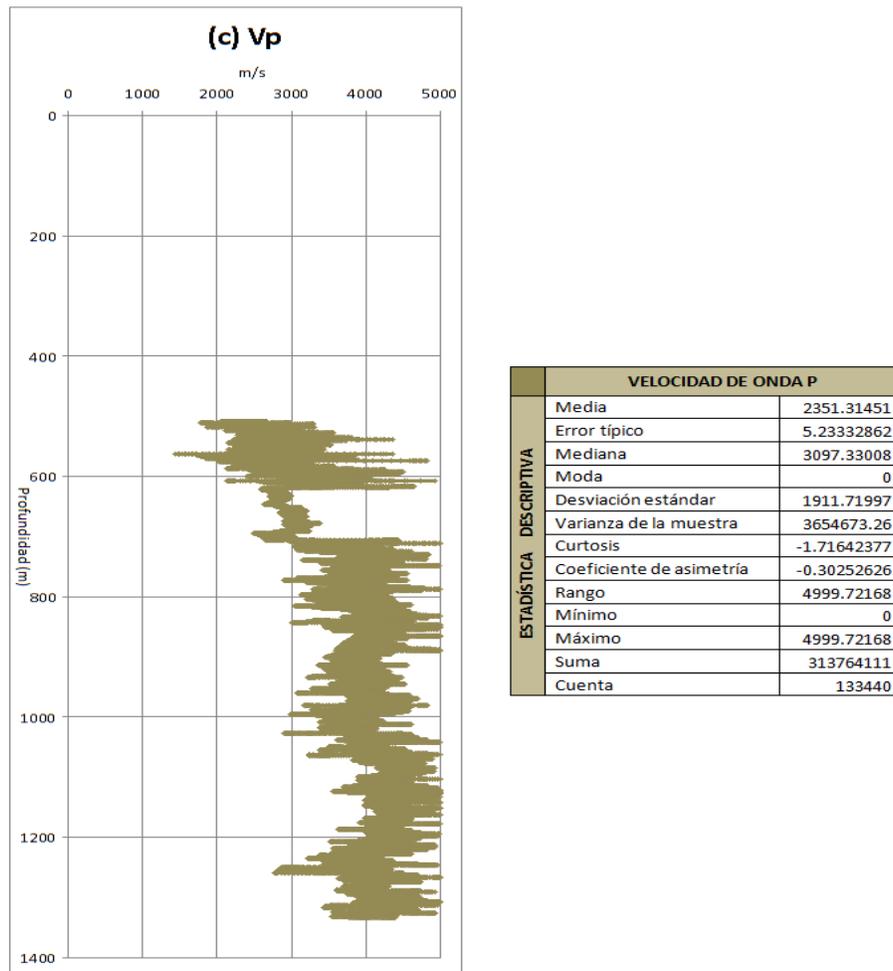


Fig. 3.3 Registro de velocidad de onda P (Vp).

El registro de velocidad de onda P es un perfil del tipo acústico⁶⁵. Es útil junto con otros registros para determinar las propiedades elásticas de las rocas y su densidad⁶⁶, así como la presencia de fluidos en ellas. Este perfil se lee de izquierda a derecha. Su unidad de medida es el metro sobre segundo (m/s), el rango de valores del mostrado en la figura va de 0–5000 m/s.

⁶⁴ Existen dos tipos de ondas sísmicas: ondas P (ondas primarias, también llamadas longitudinales o de compresión; son las ondas más veloces) y ondas S (ondas secundarias, también conocidas como transversales o de cizalla; éste tipo de ondas es insensible a la saturación de fluidos).

⁶⁵ Estos registros están en función del tiempo (Δt), a esto se le llama *tiempo de tránsito*. Este Δt depende de la litología y porosidad de una formación.

⁶⁶ Características determinadas por la porosidad (*forma, tamaño y cantidad de poros*); composición mineralógica, consolidación y cementación de las rocas; entre otros factores.

(c) Registro de conductividad eléctrica (σ):

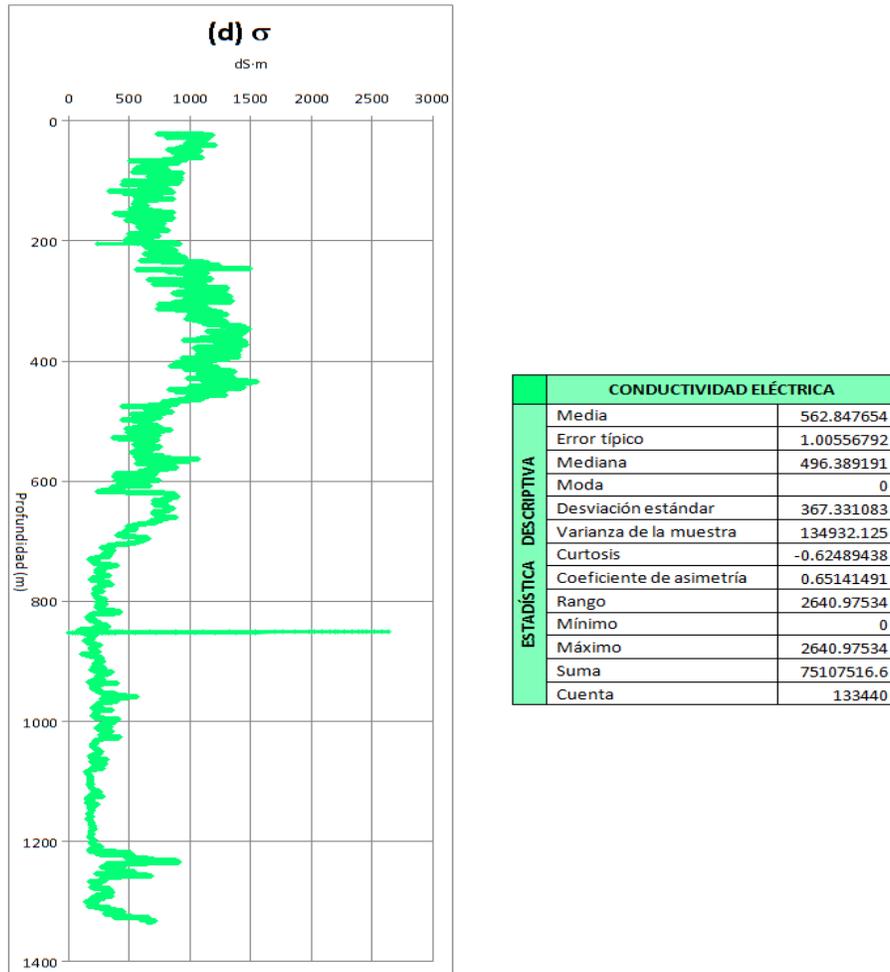


Fig. 3.4 Registro de conductividad eléctrica (σ).

Este registro calcula la capacidad que tienen los materiales que rodean el pozo de permitir el paso de una corriente eléctrica a través de su medio. Aporta información relativa a la mineralogía y porosidad de las litologías, pero principalmente a la conductividad de los fluidos presentes en ellas⁶⁷. Este perfil se lee de izquierda a derecha. Su unidad de medida es el Siemens por metro (S·m), el rango de valores de éste va de 0–3000 dS·m (deciSiemens por metro).

⁶⁷ En cuanto a las litologías, indica la presencia de minerales metálicos en la matriz de las rocas que favorecen el paso de una corriente eléctrica. Respecto a los fluidos, determina la presencia de sales disueltas en las aguas de formación, cuya conductividad es proporcional a su salinidad y temperatura; los hidrocarburos presentan una baja conductividad.

(d) Registro de susceptibilidad magnética (χ):

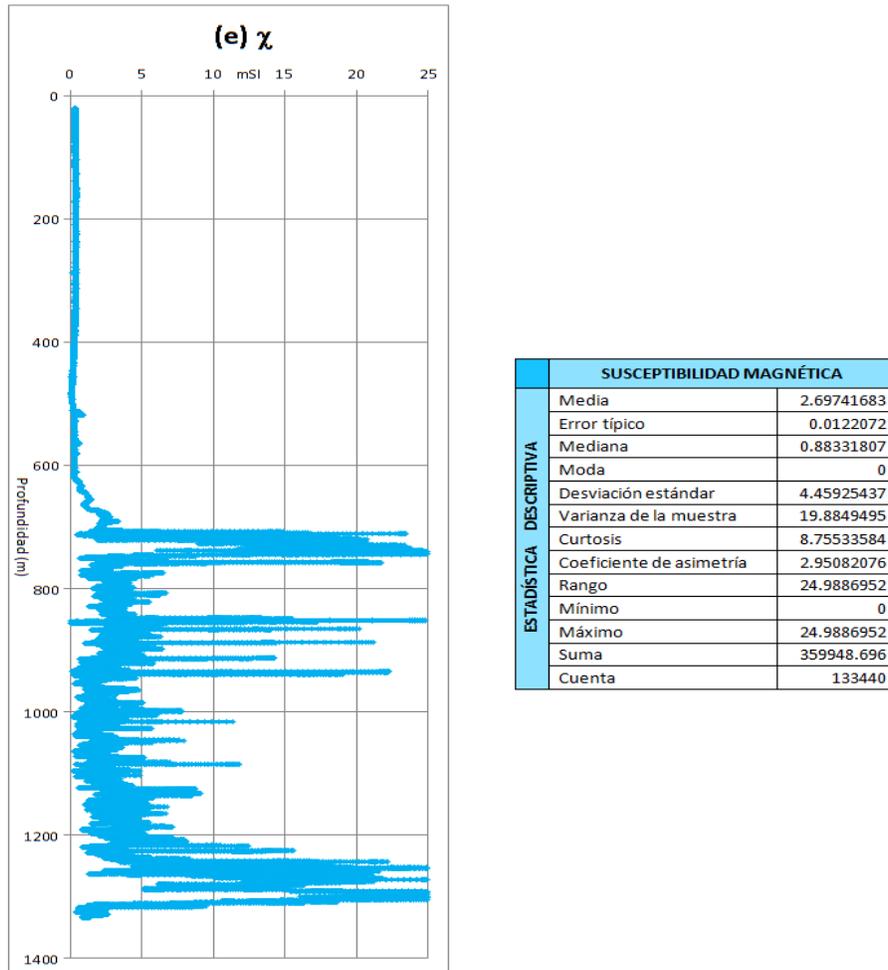


Fig. 3.5 Registro de susceptibilidad magnética (χ).

Este registro determina el grado de sensibilidad de los materiales circundantes del pozo para magnetizarse⁶⁸ bajo la influencia de un campo magnético. Provee información referente a la anisotropía⁶⁹, mineralogía⁷⁰ y permeabilidad de las rocas. Este perfil se lee de izquierda a derecha. Es una constante de proporción adimensional (mSI), el rango de valores va de 0–25 mSI.

⁶⁸ La magnetización es la propiedad de un material medida por la densidad de momentos dipolares magnéticos. Existen dos tipos básicos de magnetización: *inducida* y *remanente*.

⁶⁹ Variación de las propiedades físicas de un medio en función de la dirección en la cual se miden.

⁷⁰ La susceptibilidad magnética de las rocas es directamente proporcional a la concentración de minerales magnéticos y el contenido de hierro (Fe) en ellas.

(e) Registro de rayos gamma (RG):

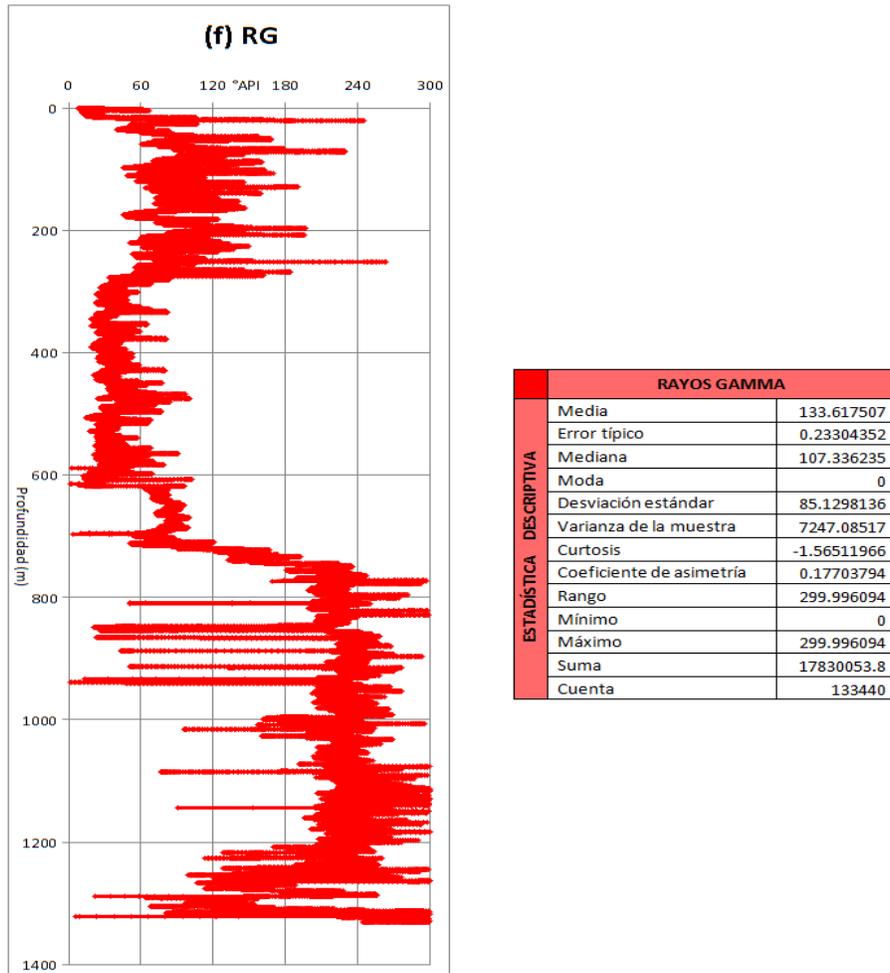


Fig. 3.6 Registro de rayos gamma (RG).

El registro de rayos gamma mide la radiación natural emitida por una formación⁷¹. Es útil para indicar arcillosidad⁷², presencia de lutitas, definir espesores de los estratos, cambios litológicos y para correlación⁷³. Estos perfiles se leen de izquierda a derecha. Se miden en unidades API ($^{\circ}$ API)⁷⁴, el rango de valores del aquí mostrado es de 0–300 $^{\circ}$ API.

⁷¹ Producto de la desintegración natural de pequeñas cantidades de elementos radiactivos presentes en las rocas.

⁷² Término indicador alusivo al contenido, volumen y tipo de arcillas en una litología; si los niveles de arcilla son nulos o muy bajos, se dice que es una *formación limpia*.

⁷³ Identificación de litologías y zonas de interés con otros pozos, y en combinación con diferentes registros como el SP (*potencial espontáneo*).

⁷⁴ Siglas en inglés del *American Petroleum Institute* (Instituto Americano del Petróleo).

(f) Registros de Uranio (U), potasio (K) y torio (Th):

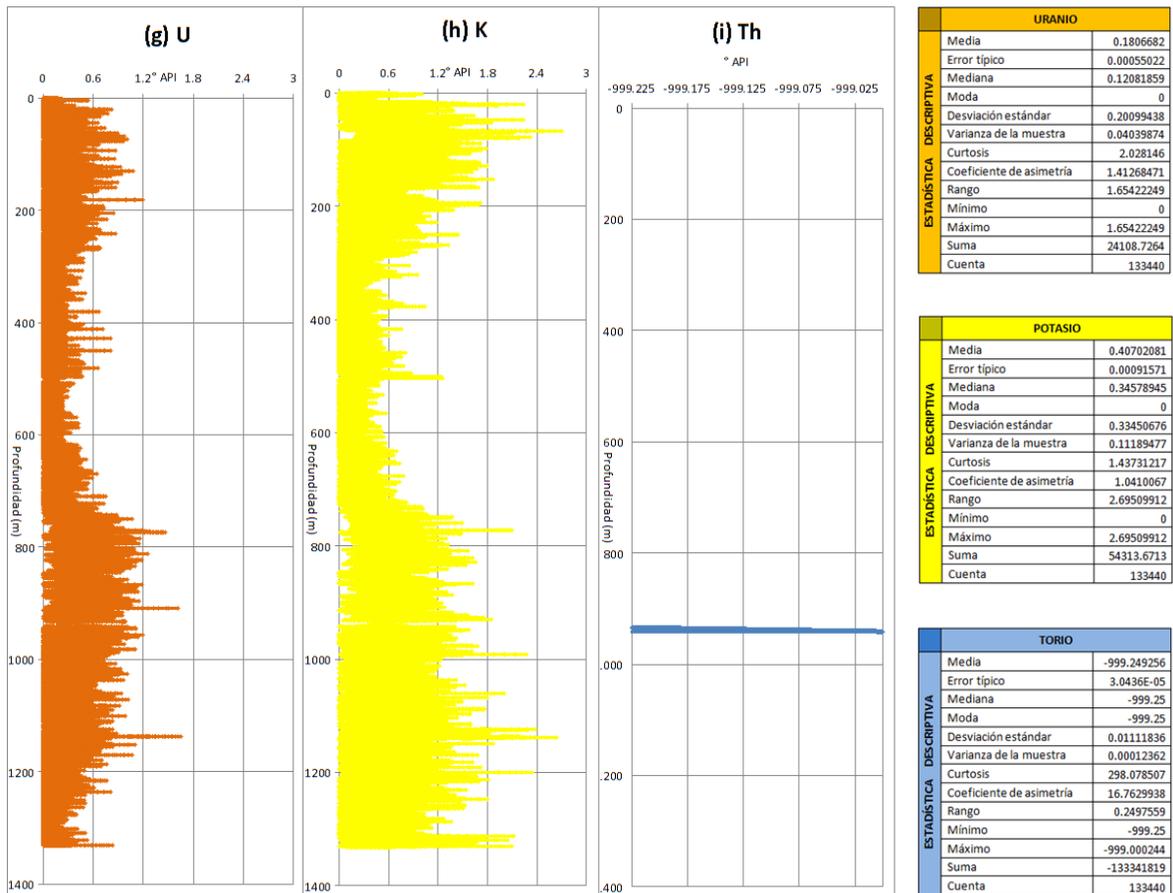


Fig. 3.7 Registros de (g) uranio (U), (h) potasio (K) e (i) torio (Th).

Estos registros muestran los contenidos de uranio (^{238}U), potasio (^{40}K) y torio (^{232}Th), isótopos que representan las fuentes de radiactividad natural en el subsuelo. Proporcionan información para determinar el contenido mineralógico de una formación⁷⁵. Estos perfiles se leen de izquierda a derecha. Se miden en unidades API ($^{\circ}\text{API}$). El rango de valores para los contenidos de potasio y uranio va de 0–3 $^{\circ}\text{API}$, para el torio es de -999.225 a -999 $^{\circ}\text{API}$.

⁷⁵ Los minerales que contienen uranio son escasos, éste se encuentra asociado principalmente a los carbonatos, dolomitas y materiales orgánicos como el carbón y la gilsonita. El potasio se encuentra presente en la illita, feldspatos alcalinos, micas, lutitas, arcillas y en algunos minerales evaporíticos. Al igual que el uranio, los minerales que contienen torio son escasos, la presencia de éste último se asocia principalmente a las arcillas y minerales pesados.

3.3 Descripción cualitativa.

(a) Registro de resistividad somera (Rxo).

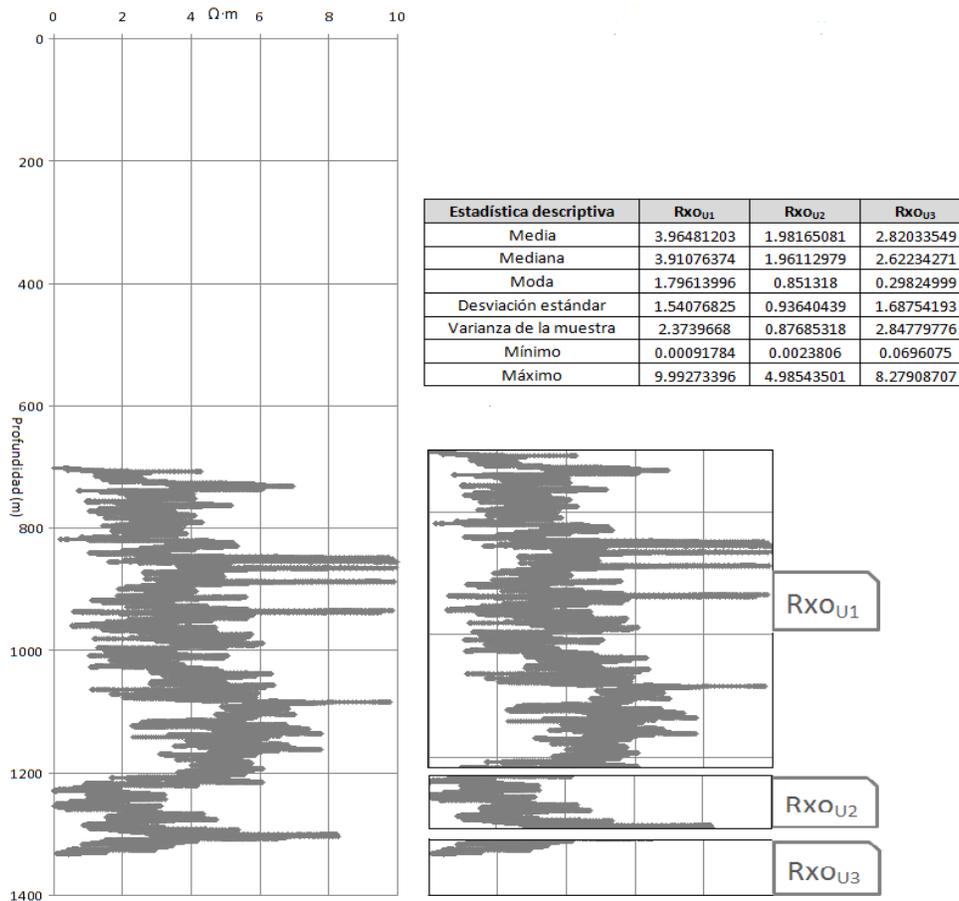


Fig. 3.8 Análisis cualitativo del registro de resistividad somera (Rxo).

En este registro se identificaron tres unidades litológicas: la primera (Rxo_{U1}) se localiza en el intervalo de 702.2 a 1216.2 metros, aquí las resistividades tienen un rango de 0 a 9.992 $\Omega \cdot m$, con una media de 3.96 $\Omega \cdot m$; la segunda unidad (Rxo_{U2}) abarca de 1216.25 a 1292.4 m, en este paquete los valores de resistividad decrecen respecto a la primera unidad con un rango de 0.002 a 4.98 $\Omega \cdot m$, y un promedio de 1.98 $\Omega \cdot m$; la tercera (Rxo_{U3}) comprende las profundidades de 1292.45 a 1332.9 m, en esta unidad la resistividad vuelve a incrementarse con valores que van de 0.07 a 8.28 $\Omega \cdot m$, y una media de 2.82 $\Omega \cdot m$. Rxo_{U1} posee las resistividades más altas, seguida de Rxo_{U3}, Rxo_{U2} presenta las más bajas.

(b) Registro de resistividad profunda (Rt).



Fig. 3.9 Análisis cualitativo del registro de resistividad profunda (Rt).

El registro de resistividad profunda se divide en seis unidades litológicas (tres más que el de resistividad somera): la unidad 1 (Rt_{U1}) comprende el intervalo de 21 a 235.6 metros, con resistividades de 0 a 7.13 Ω·m y una media de 0.72 Ω·m; la segunda unidad (Rt_{U2}) abarca de 235.6 a 466 m, con un máximo de 9.86 Ω·m y un promedio de 1.83 Ω·m; después hay una zona donde no se registra ningún valor, de 466.07 a 522.56 m. La tercera unidad (Rt_{U3}) se localiza de 522.5 a 702.2 m y posee una resistividad media de 0.15 Ω·m; la cuarta (Rt_{U4}) va de 702.23 a 1216.24 m, ésta presenta las mediciones más altas, con un rango de 0.18 a 9.99 Ω·m; la quinta unidad (Rt_{U5}) se ubica en el intervalo de 1216.25 a 1292.4 m, y tiene resistividades que van de 0 a 5.08 Ω·m, con un promedio de 2.01 Ω·m; y finalmente la sexta (Rt_{U6}) se encuentra de 1292.45 a 1332.9 m, registra valores de 0.07 a 8.28 Ω·m, presentando una media de 2.82 Ω·m.

(c) Registro de velocidad de Onda P (Vp).

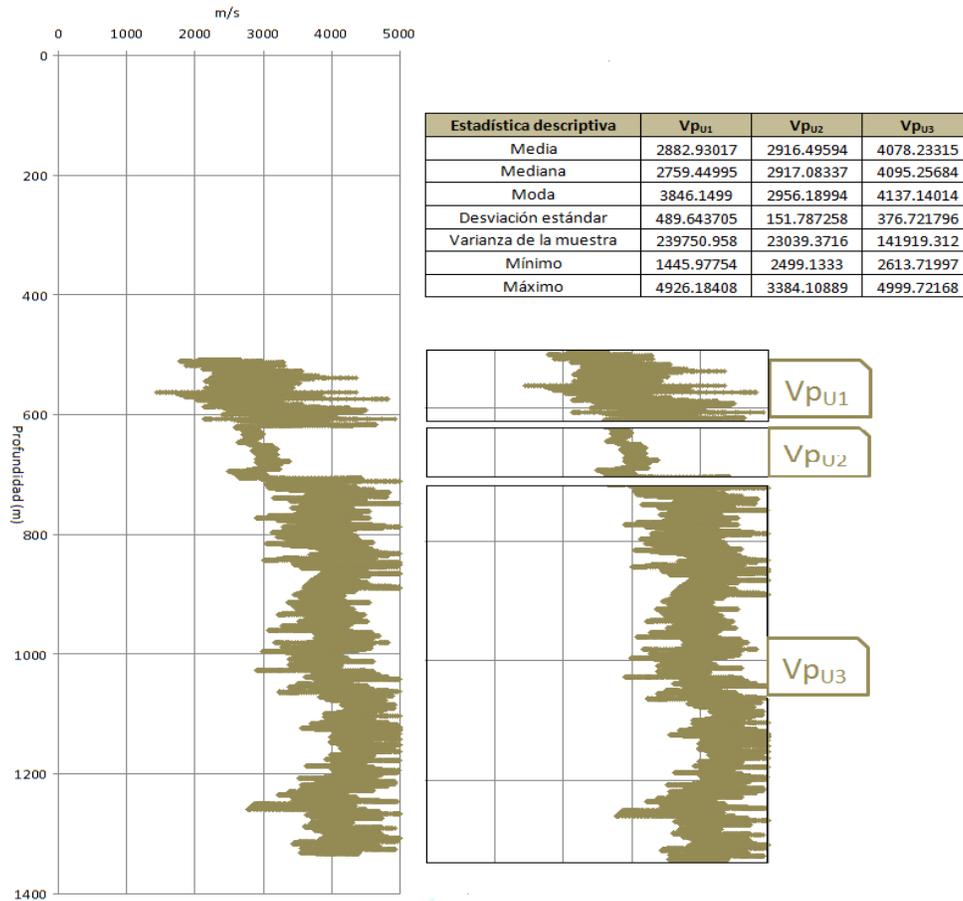


Fig. 3.10 Análisis cualitativo del registro de velocidad de onda P (Vp).

En este registro se distinguen tres unidades litológicas: la primera (Vp_{U1}) se localiza en el intervalo de 508.48 a 619.72 metros, en esta las velocidades tienen un rango de 1445.97 a 4926.18 m/s, con una media de 2882.93 m/s; la segunda unidad (Vp_{U2}) abarca de 619.73 a 701.34 m, en este paquete los valores de las velocidades muestran un ligero aumento en su media respecto a la primera unidad, con un promedio de 2916.5 m/s en un rango de 2499.13 a 3384.10 m/s; y la tercera unidad (Vp_{U3}) comprende el intervalo de 701.35 a 1333.68 m, aquí las velocidades van de 2613.72 a 4999.72 m/s, con una media de 4078.23 m/s. El cambio de velocidades entre unidades se va incrementando respecto a la profundidad, la velocidad media de Vp_{U1} es la más baja con 2882.93 m/s, para Vp_{U2} aumenta ligeramente a 2916.5 m/s, y finalmente en Vp_{U3} el promedio incrementa a 4078.23 m/s.

(d) Registro de conductividad eléctrica (σ).

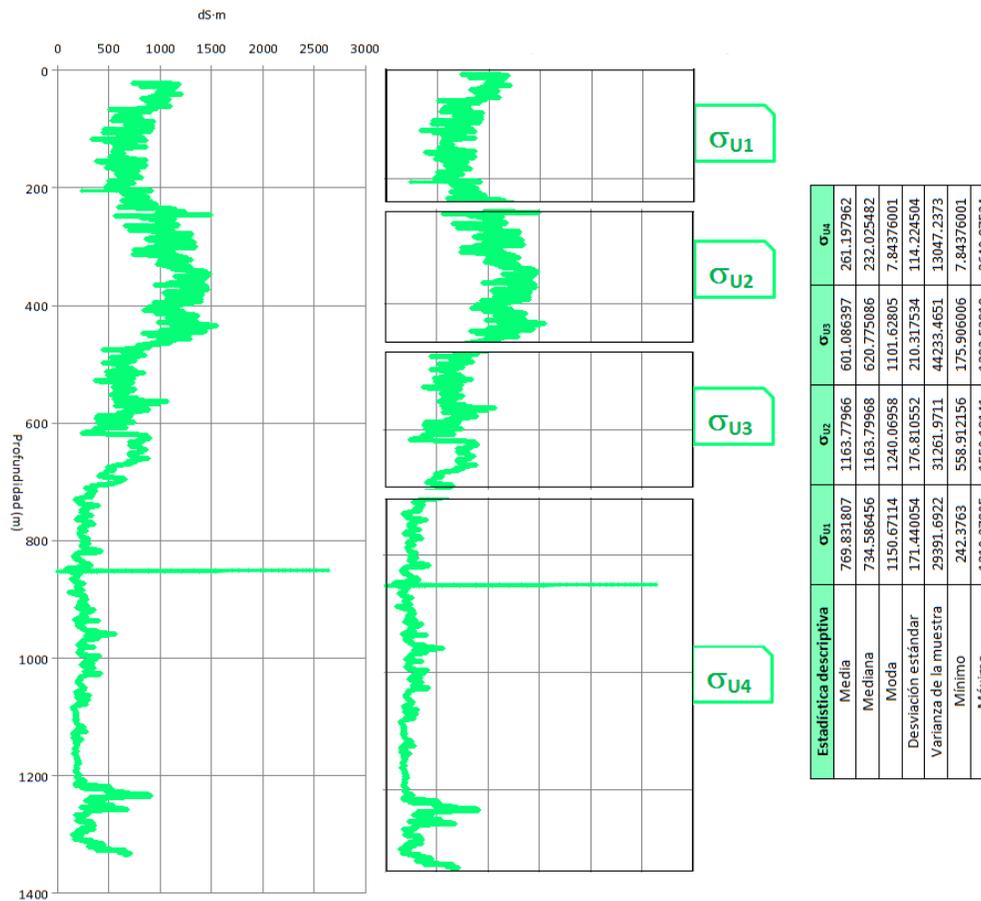


Fig. 3.11 Análisis cualitativo del registro de conductividad eléctrica (σ).

En el registro de conductividad eléctrica se distinguen cuatro unidades: la primera (σ_1) se ubica de 21.2 a 240.9 metros, la conductividad registrada en este intervalo tiene un rango de 242.37 a 1210.38 dS·m, con un promedio de 769.83 dS·m; la segunda (σ_2) comprende de 240.91 a 453.9 m, presenta una conductividad de 558.91 a 1550.2 dS·m y una media de 1163.78 dS·m; la tercera unidad (σ_3) abarca las profundidades de 453.91 a 760.64 m, muestra un rango de 175.9 a 1293.54 dS·m, con un promedio de 601.08 dS·m; y finalmente la cuarta unidad (σ_4), localizada en el intervalo de 760.65 a 1333.6 m, posee un rango de 7.84 a 2640.97 dS·m, y una conductividad media de 261.2 dS·m, en esta unidad existe un *pico*⁷⁶ pasando los ochocientos metros que presenta las conductividades máximas y mínimas registradas.

⁷⁶ El cual podría deberse a *valores atípicos* (del inglés *outliers*), que son observaciones numéricamente distintas al resto de la muestra. Estos valores son indicativos de datos que pertenecen a una población diferente o a errores de medición.

(e) Registro de susceptibilidad magnética (χ).

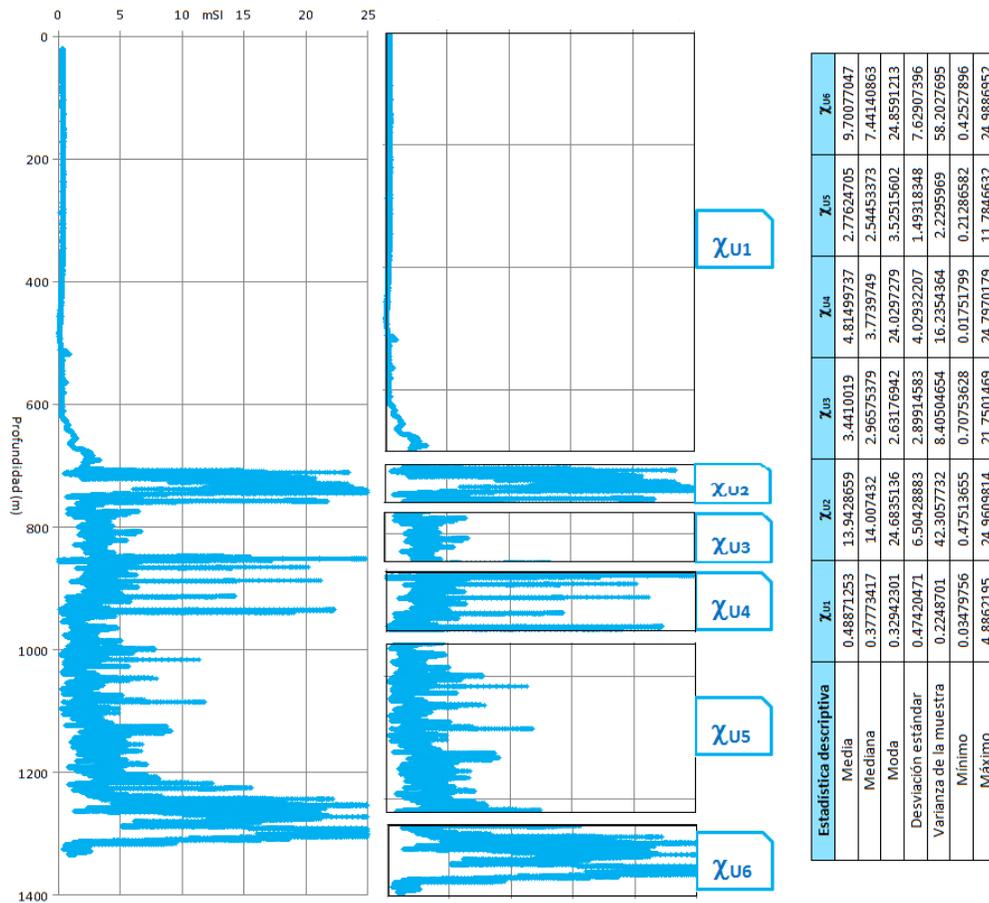


Fig. 3.12 Análisis cualitativo del registro de susceptibilidad magnética (χ).

El registro de susceptibilidad magnética se divide en seis unidades litológicas: la primera (χ_{U1}) comprende el intervalo de 21.2 a 706.63 metros, con susceptibilidades de 0.3 a 4.88 mSI y una media de 0.49 mSI; la segunda unidad (χ_{U2}) abarca de 706.64 a 746 m, con un máximo de 24.96 mSI y un promedio de 13.94 mSI; la tercera unidad (χ_{U3}) se localiza de 747 a 846.7 m y posee una susceptibilidad media de 3.44 mSI; la cuarta (χ_{U4}) va de 846.74 a 939.52 m, presenta un rango de 0.017 a 24.8 mSI; la quinta unidad (χ_{U5}) se ubica en el intervalo de 939.53 a 1216.45 m, y tiene susceptibilidades que van de 0.21 a 11.78 mSI, con un promedio de 2.77 mSI; y finalmente la sexta (χ_{U6}) se encuentra de 1216.5 a 1334.27 m, registra valores de 0.425 a 24.98 mSI, presentando una media de 9.7 mSI. Las unidades χ_{U2} , χ_{U4} y χ_{U6} presentan las susceptibilidades magnéticas más altas.

(f) Registro de rayos gamma (RG).

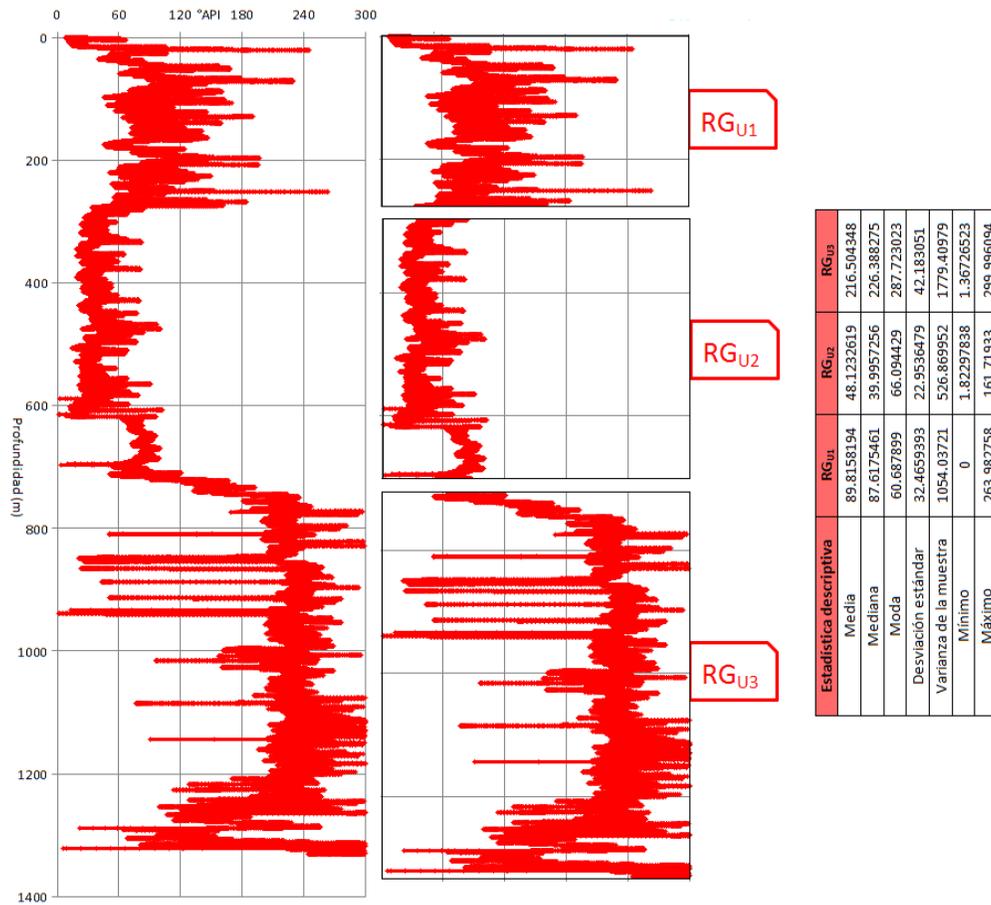


Fig. 3.13 Análisis cualitativo del registro de rayos gamma (RG).

En el registro de rayos gamma se identificaron tres unidades litológicas: la primera (RG_{U1}) se localiza en el intervalo de 0 a 269.5 metros, aquí la radiactividad natural tiene un rango de 0 a 263.98 °API, con una media de 89.81 °API; la segunda unidad (RG_{U2}) se ubica a partir de 269.51 y hasta 720.11 m, en este paquete la radiactividad disminuye considerablemente respecto a la primera unidad, con un rango de 1.82 a 161.72 °API, y un promedio de 48.12 °API; la tercera unidad (RG_{U3}) comprende las profundidades de 720.12 a 1331.67 m, en esta unidad la radiactividad vuelve a incrementarse con valores que van de 1.36 a 299.99 °API, y una media de 216.5 °API. El cambio en los niveles de radiactividad entre las unidades se va acrecentando respecto a la profundidad (mismo comportamiento que el registro de Vp), siendo RG_{U3} la más radiactiva seguida de RG_{U1}, RG_{U2} presenta los valores más bajos.

(g) Registro de contenido de uranio (U).

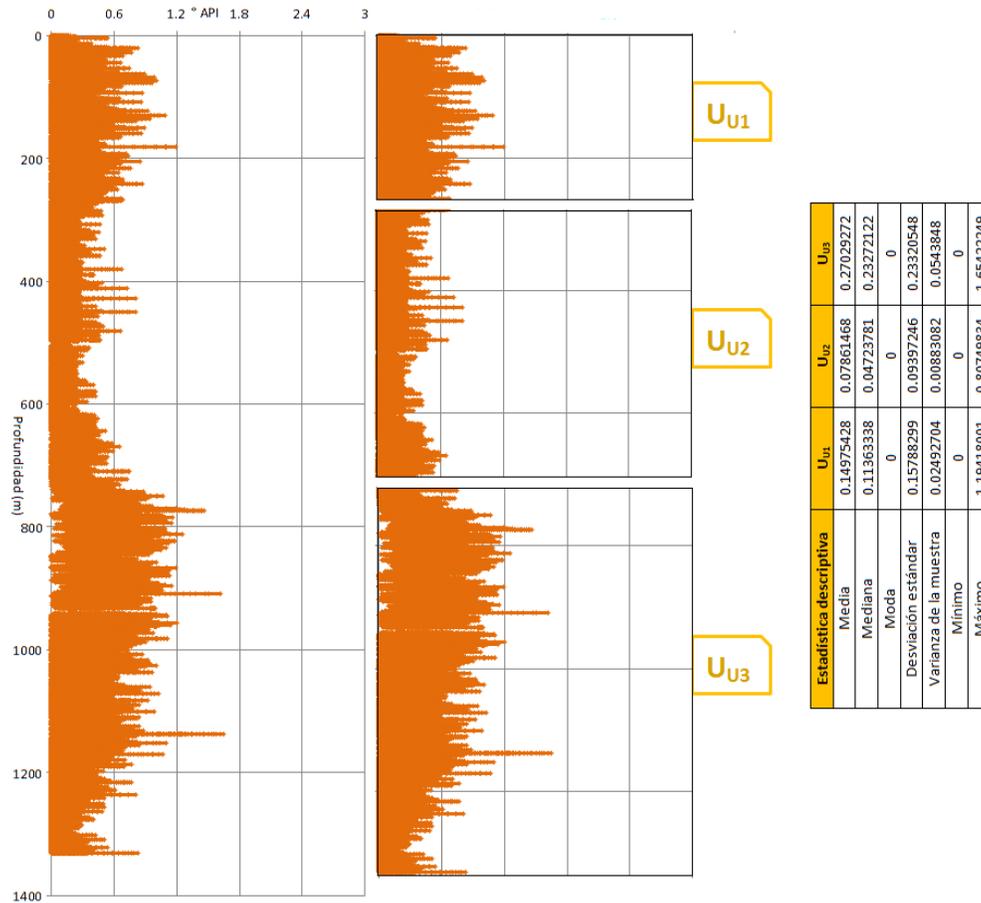


Fig. 3.14 Análisis cualitativo del registro de uranio (U).

Para el registro de uranio (^{238}U) el perfil se dividió en tres unidades litológicas: la primera unidad (U_{U1}) se localiza en el intervalo de 0 a 269.5 metros, aquí las trazas radiactivas tienen un rango de 0 a 1.19 °API, con una media de 0.15 °API; la segunda unidad (U_{U2}) se ubica a partir de 269.51 y hasta 720.11 m, en este paquete los valores de radiactividad decrecen ligeramente respecto a la primera unidad, con un rango de 0 a 0.80 °API, y un promedio de 0.078 °API; la tercera (U_{U3}) comprende las profundidades de 720.12 a 1331.67 m, en esta unidad los niveles van de 0 a 1.65 °API, y una media de 0.27 °API. La segunda unidad (U_{U2}) presenta los valores más bajos de contenido de uranio. Este registro presenta un comportamiento similar el registro de rayos gamma.

(h) Registro de contenido de potasio (K).



Fig. 3.15 Análisis cualitativo del registro de potasio (K).

Para el registro de potasio (^{40}K) el perfil se dividió en tres unidades litológicas: la primera (K_{U1}) se localiza en el intervalo de 0 a 69.5 metros, aquí las trazas radiactivas tienen un rango de 0 a 2.695 °API, con una media de 0.52 °API; la segunda unidad (K_{U2}) se ubica a partir de 269.51 y hasta 720.11 m, en este paquete los valores de radiactividad presentan un rango de 0 a 1.25 °API, y un promedio de 0.14 °API; la tercera (K_{U3}) comprende las profundidades de 720.12 a 1331.67 m, en esta unidad los niveles de potasio van de 0 a 2.63 °API, y posee una media de 0.55 °API. Ésta última unidad (K_{U3}) presenta el promedio más alto de contenido de potasio. Este registro presenta un comportamiento semejante a los registro de rayos gamma y contenido de uranio.

(i) Registro de contenido de torio (Th).

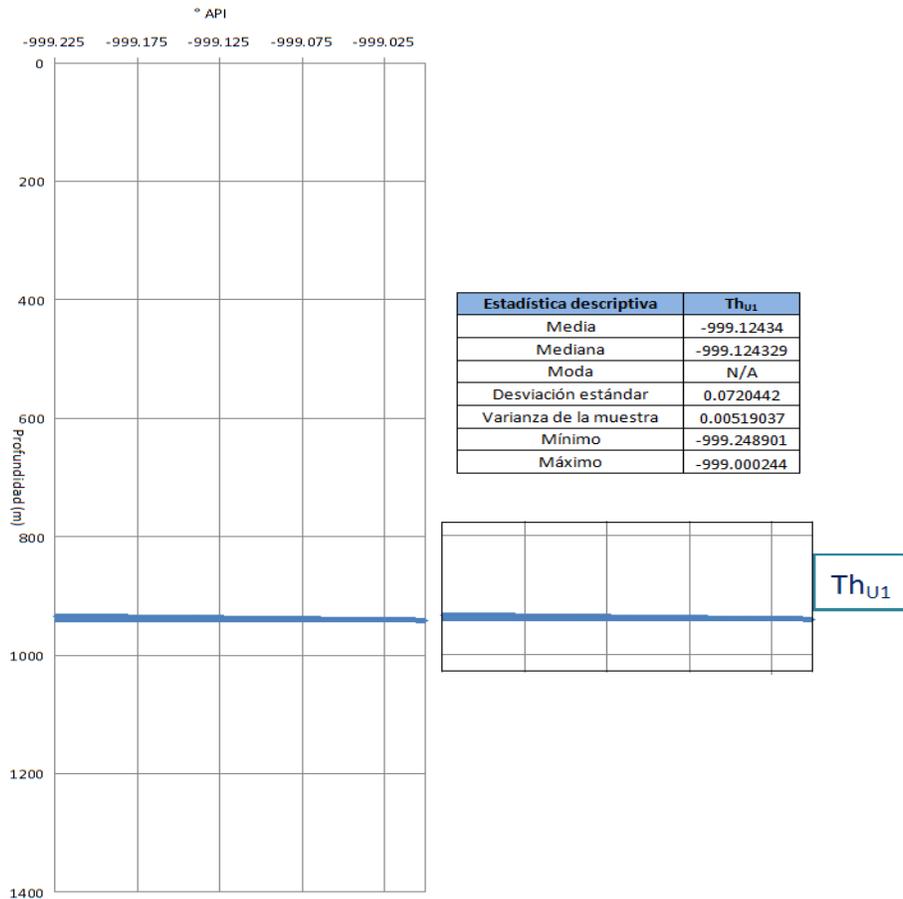


Fig. 3.16 Análisis cualitativo del registro de torio (Th).

Para el caso del torio (^{232}Th) se distingue una sola unidad litológica (Th_{U1}), la cual corresponde al intervalo de 933.07 a 940.97 metros. El contenido de este elemento radiactivo tiene una escala de valores de -999.225 a -999.00 °API (rango de 0.2486 °API). A lo largo de esta unidad, que es la más pequeña detectada en el conjunto total de los registros del pozo⁷⁷ con un espesor neto de 7.91 metros, se aprecia un incremento gradual de las trazas del torio con un promedio de -999.12434 °API.

⁷⁷ En el apéndice III se presenta la estadística descriptiva completa de las unidades litológicas de todos los registros geofísicos del pozo.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN PETROFÍSICA

El presente capítulo es la parte culminante de esta tesis. Aquí se muestran los resultados del análisis y la interpretación de la estadística y la petrofísica, para luego integrarlos en un modelo que describa la columna litológica del pozo Chicx–03A. En el episodio anterior, los registros geofísicos del pozo se dividieron en diferentes unidades que representan distintas capas o estratos. El criterio para delimitar éstas unidades se fundamentó en identificar paquetes que mostraran discontinuidades en sus características cualitativas y cuantitativas⁷⁸. Con esta metodología, además de determinar el número y tipo de litologías encontradas, se pueden identificar perfiles de correlación⁷⁹ entre el conjunto total de los registros, lo cual ayudará a elaborar una caracterización más certera.

4.1 Interpretación petrofísica del análisis estadístico.

El primer paso para la interpretación, fue describir los registros del Chicx–03A y las propiedades petrofísicas que miden, ya que éstas determinan la naturaleza de las formaciones que se encuentran, pues cada una tiene valores distintivos de porosidad, permeabilidad, radiactividad, resistividad y saturación de fluidos, características que permiten identificar los tipos de roca de las diferentes unidades de cada registro.

⁷⁸ La información obtenida de un registro geofísico de pozo puede ser de dos tipos: *cualitativa* o *cuantitativa*. En la cualitativa se usan uno o más registros para determinar las propiedades petrofísicas y del fluido de las rocas, límites de unidades estratigráficas y condiciones de pozo a pozo. La cuantitativa nos proporciona básicamente datos de porosidad y saturaciones de fluidos.

⁷⁹ En probabilidad y estadística, la *correlación* se define como una medida de la fuerza (*grado de dispersión de los datos con la línea de ajuste o tendencia*) y de la dirección (*también llamada sentido, es la variación de los valores de una variable con respecto a otra*) de una relación o asociación lineal y proporcional entre dos variables distintas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores de la otra.

(a) Registro de resistividad somera (Rxo).

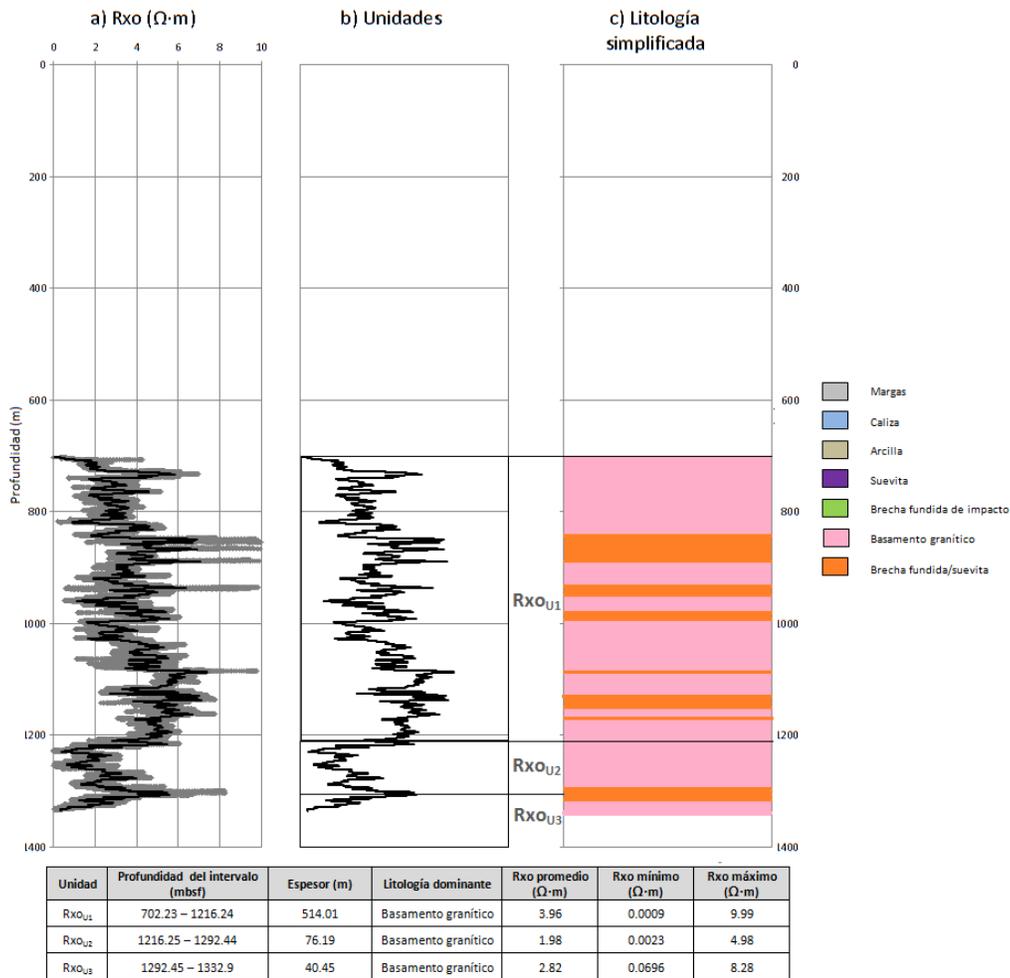


Fig. 4.1 Interpretación petrofísica del registro de resistividad somera (Rxo)⁸⁰: (a) registro con media móvil⁸¹, (b) límites de las unidades litológicas⁸² y (c), litología simplificada.

El registro de resistividad somera tiene una variación muy baja en los promedios de sus tres unidades, lo cual nos indica que existe una sola litología dominante. Los intervalos Rxo_{U1} y Rxo_{U3} presentan resistividades de 3.96 y 2.82 Ω·m respectivamente, promedios muy aproximados entre sí y que sobresalen con respecto de la segunda unidad, Rxo_{U2}, la cual posee una resistividad media de 1.98 Ω·m, siendo el intervalo que tiene las mediciones más bajas. Estas resistividades muestran

⁸⁰ En la parte inferior de la imagen se presenta una tabla que resume las características de cada unidad litológica, pero en el apéndice III se pueden consultar detalladamente la estadística descriptiva, los histogramas y las gráficas de las unidades de los registros geofísicos del pozo.

⁸¹ La línea de *media móvil* se agregó a cada registro para conocer la tendencia de los datos.

⁸² La profundidad del intervalo está dada en metros debajo del fondo marino (mbsf son sus siglas en inglés, *metres below seafloor*).

valores consistentes al del basamento granítico (Morgan et al., 2000, 2002)⁸³. Sin embargo, este registro se dividió en tres unidades litológicas posibles debido a que la primera y la tercera unidad presentan picos de valores máximos, a diferencia de la segunda unidad, la cual no tuvo ningún incremento abrupto de resistividad. Estos picos indican breves cambios litológicos dentro de la litoestratigrafía dominante, así que las resistividades máximas señalan la presencia de diques⁸⁴, los cuales pueden ser de brecha de impacto⁸⁵.

El registro de resistividad somera no presenta valores en el parte superior del agujero, de 0 a 700 metros, debido a problemas surgidos por el estado mecánico del pozo⁸⁶. En el intervalo de 0 a 400 metros el Chicx–03A presenta condiciones de pozo imperfectas como forma elíptica del agujero e irregularidades en el tamaño de su diámetro debido a la presencia de karst⁸⁷ en esta profundidad, factores que afectaron la recuperación y calidad general de los datos obtenidos por las herramientas de resistividad somera (DLL3) y la acústica (ABI40), pues la toma de registros del pozo se hizo en condición de agujero descubierto. Y de 400 a 700 metros el registro de resistividad no se corrió debido a problemas de comunicación con la sonda, sólo se adquirieron puntos de datos insuficientes cada cinco metros aproximadamente, por lo cual se decidió suprimir esta información debido a su escasa confiabilidad.

⁸³ El programa de registro de fondo de pozo fue gestionado por el European Petrophysics Consortium (EPC) y la Universidad de Montpellier (Francia), con apoyo de las universidades de Alberta (Canadá) y de Texas (Estados Unidos de América). Este programa definió los parámetros de las propiedades físicas para las litologías esperadas basándose en información de estudios geofísicos anteriores y análisis mineralógicos, petrofísicos y geoquímicos de muestras de rocas de perforaciones previas (Morgan et al., 2000, 2011, 2017; Gulick et al., 2013). Esta información no puede ser publicada en este trabajo de tesis pero sí puede ser consultada previa solicitud a la IODP.

⁸⁴ En geología, un *dique* es una masa o formación ígnea intrusiva con morfología laminar y discordante de disposición subvertical. Los diques se emplazan o sitúan en zonas de debilidad donde existen fracturas o donde la presión del fluido es suficientemente grande para que ellos mismos formen sus propias fracturas durante el emplazamiento.

⁸⁵ Los diques de brechas de impacto son características distintivas de las estructuras de impacto. Se tiene la hipótesis de que se forman durante el proceso de excavación de la craterización por impacto, mediante la inyección de material en el suelo y durante la formación de la cavidad de excavación.

⁸⁶ La principal influencia en la calidad de la adquisición de datos de un registro geofísico son las condiciones mecánicas del pozo.

⁸⁷ Un *karst* (también llamado *carst*) es un tipo de relieve originado por meteorización química provocada por agua en rocas carbonatadas.

(b) Registro de resistividad profunda (Rt).

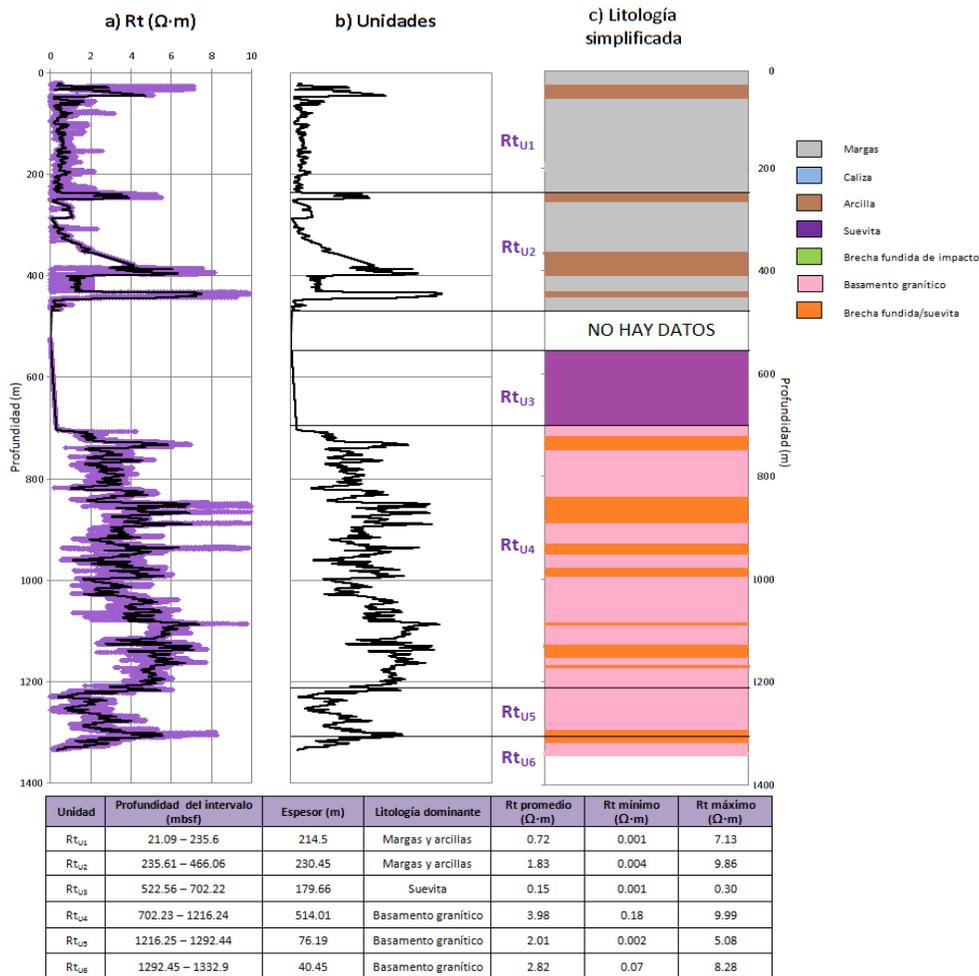


Fig. 4.2 Interpretación petrofísica del registro de resistividad profunda (Rt): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

En el registro de resistividad profunda se identificaron seis unidades litológicas, tres más que en su homólogo somero, y a diferencia de éste, la herramienta que realizó su medición no tuvo problemas para obtener información en la parte superior del pozo a partir de los 21 metros de profundidad⁸⁸, excepto en la zona de 466.07 a 522.56 metros, donde no se registró ningún dato⁸⁹. En las dos primeras unidades, Rt_{U1} y Rt_{U2}, las resistividades promedio son de 0.72 y 1.83 Ω·m respectivamente, valores bajos que corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas constituidas principalmente

⁸⁸ Para el registro de resistividad profunda se utilizó una herramienta de doble inducción-eléctrico enfocado (DIL).

⁸⁹ Al igual que con el registro Rxo, la sonda de resistividad profunda también presentó problemas de comunicación que impidieron una adecuada recuperación de datos en esta profundidad.

por margas, calizas y lutitas. Las resistividades máximas en estos intervalos confirman la presencia de lutitas, habiendo una mayor cantidad de éstas en la segunda unidad, cualidad que determina la diferencia en la resistividad media entre ambas unidades, que conformarían un solo paquete de rocas sedimentarias posteriores al impacto.

La tercera unidad (R_{tU3}) se caracteriza por un cambio importante en las propiedades del registro, el cual está marcado por una fuerte disminución de la resistividad y que indica una zona de transición litológica de las rocas sedimentarias post-impacto al anillo de picos del cráter, el cual estaría constituido principalmente por suevita y brecha fundida de impacto (Morgan et al., 2000, 2011, 2017; Gulick et al., 2013)⁹⁰.

En la parte inferior del pozo, el registro de resistividad profunda presentó un comportamiento casi idéntico al de resistividad somera. La cuarta unidad (R_{tU4}) posee las resistividades más altas con un promedio de $3.98 \Omega \cdot m$; la quinta unidad (R_{tU5}) tiene la media más baja de estos tres intervalos inferiores con $2.01 \Omega \cdot m$, y no exhibe ningún cambio litológico, descartando así la presencia de diques en esta zona; y finalmente la sexta unidad (R_{tU6}) presenta una media de $2.82 \Omega \cdot m$, parecida a la cuarta unidad, ambas muestran picos en sus resistividades, confirmando así la existencia de diques en dichos intervalos.

Si la tercera unidad supone la parte superior del anillo de picos, las unidades cuatro, cinco y seis constituirían el anillo de picos inferior.

⁹⁰ La *suevita* y las *brechas fundidas de impacto* pertenecen al grupo de rocas llamadas *impactitas*, que son un grupo de rocas originadas durante un impacto. Las *impactitas* se dividen en tres grupos principales: (1) brechas de impacto, (2) fundidos de impacto y (3) rocas afectadas por el choque. La *suevita* es una brecha de impacto compuesta de fragmentos angulares de la roca impactada y de vidrios incrustados provenientes de rocas que fueron calentadas a elevadas temperaturas durante el impacto, llegando a fundirse y después enfriarse rápidamente para formar cristales. Si una roca fundida se enfría lentamente, en vez de producir una suevita, se crea una *brecha fundida de impacto*, la cual es fundamentalmente una roca volcánica parecida a la lava basáltica. Estos tipos de rocas demuestran las condiciones extremas de presión y temperatura generadas por un impacto, capaces de fundir grandes volúmenes de roca casi instantáneamente.

(c) Registro de velocidad de Onda P (Vp).

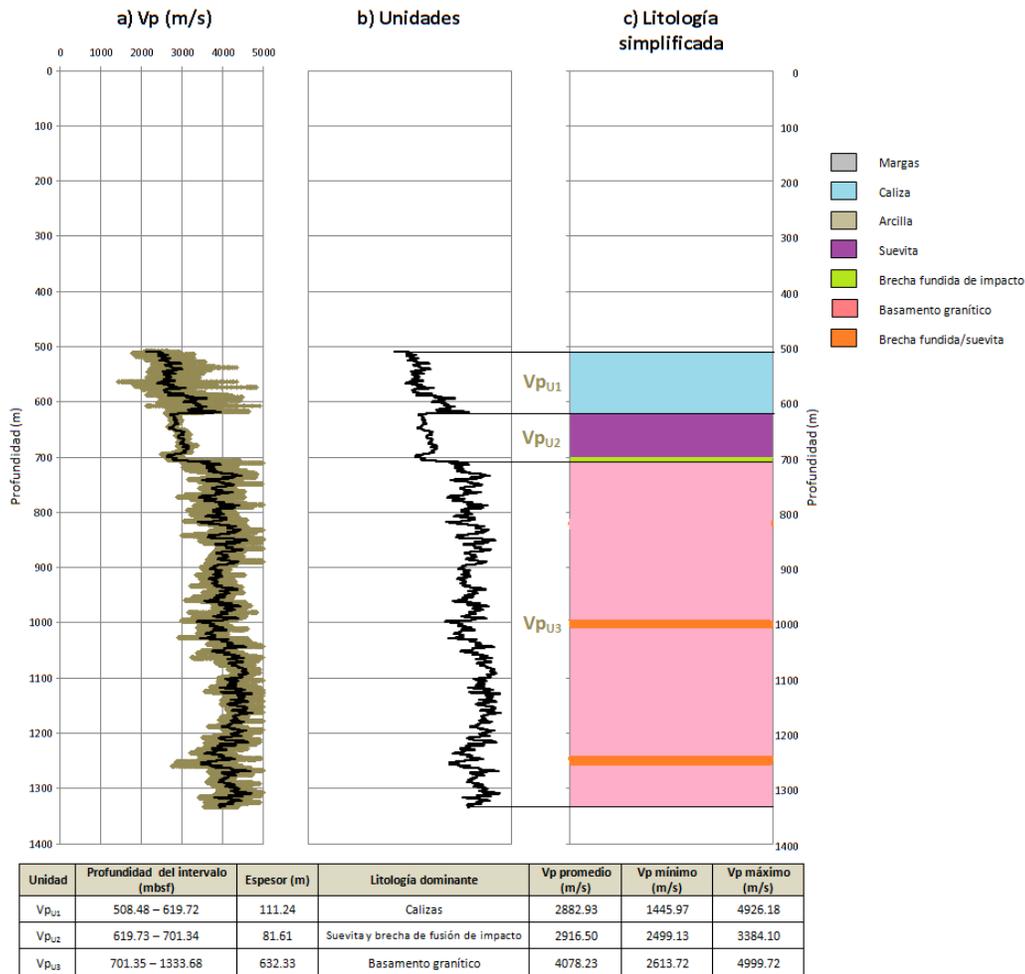


Fig. 4.3 Interpretación petrofísica del registro de velocidad de onda P (Vp): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

En el registro de velocidad de onda P se detectaron tres unidades litológicas a partir de 508.48 y hasta 1333.68 metros⁹¹. En la primera unidad (Vp_{U1}) se observa que la velocidad de onda P va de 1445.97 a 4926.18 m/s, mostrando un claro aumento de la velocidad respecto a la profundidad, lo que indica que la densidad de las rocas se incrementa mientras su porosidad disminuye. Del registro de resistividad profunda determinamos que esta zona pertenece a un intervalo de rocas sedimentarias, las cuales estarían compuestas principalmente de margas, calizas y lutitas⁹²; y como el

⁹¹ La herramienta de este registro (ABI40), al igual que el de resistividad somera, presentó problemas con el estado mecánico del pozo que impidieron una adecuada recuperación de datos en la parte superior del agujero.

⁹² En el capítulo dos de la tesis se hizo revisión de la geología local y regional del cráter Chicxulub en la cual se explica que la mayoría de los carbonatos que componen la Plataforma de Yucatán son principalmente margas, calizas y lutitas.

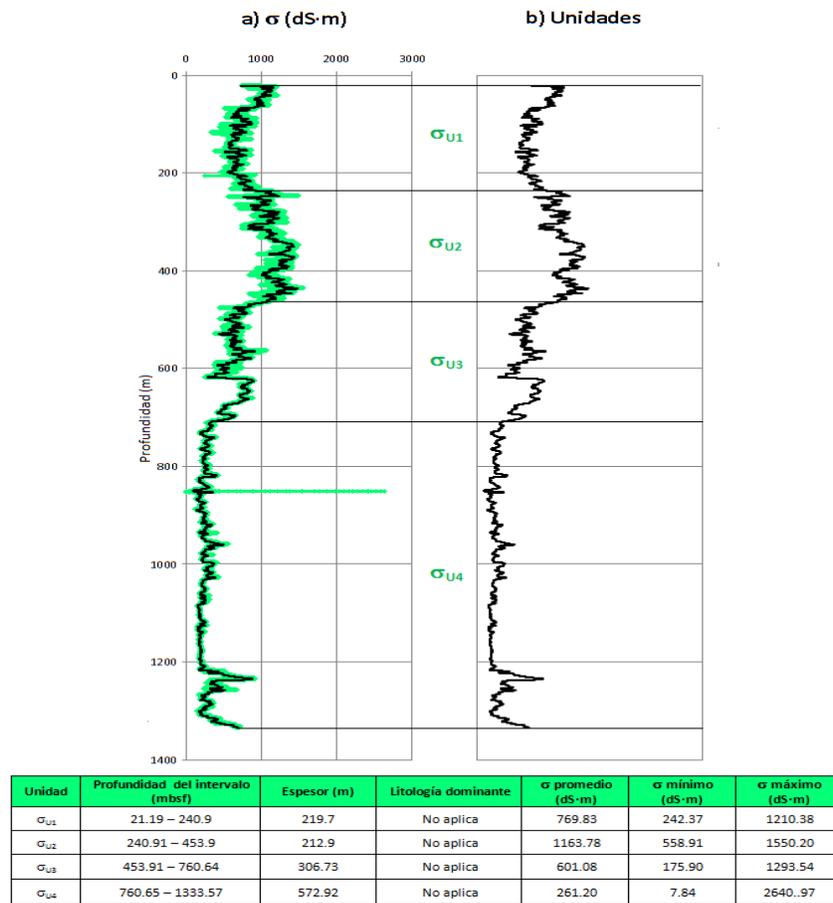
registro exhibe un aumento en la velocidad de onda, podemos inferir que en esta unidad existe una transición de margas y lutitas a calizas, o que éstas últimas predominan en lo que sería la base de los sedimentos post-impacto que recubrieron el cráter.

El segundo intervalo (V_{pU2}) es una zona de baja velocidad, aquí las velocidades de la onda P son más bajas en comparación con las rocas sedimentarias de la primera unidad, mostrando una fuerte disminución en su densidad, lo que significa un cambio litológico abrupto. Estudios geofísicos indican que el anillo de picos del Chicxulub está compuesto de rocas que tienen bajas velocidades y densidades debido a que están muy fracturadas y son altamente porosas (Morgan et al., 2000, 2011; Gulick et al., 2013), así que la litología de esta unidad estaría formada por suevita y brecha fundida de impacto (Stöffler y Grieve, 2007), ésta última se sitúa en la base del intervalo dado que existe una ligera y abrupta disminución de la velocidad⁹³. Esta unidad marca la transición de la roca sedimentaria al anillo de picos del cráter a partir de 619.73 metros, que es donde se abaten las velocidades de onda. Este intervalo puede correlacionarse con la tercera unidad del registro de resistividad profunda (R_{tU3}), donde se definió el cambio litológico de los sedimentos post-impacto a las rocas impactadas.

En la tercera unidad (V_{pU3}) las velocidades de las ondas P aumentan con la profundidad con excursiones locales asociadas a diques de impactitas⁹⁴. En general, las densidades no varían mucho, a excepción de los cambios provocados por los diques. Los valores de velocidad permanecen constantes a través del basamento granítico.

⁹³ La suevita posee una densidad ligeramente mayor a la de la brecha fundida de impacto debido a su gran cantidad de vidrios incrustados.

⁹⁴ Estas impactitas pueden ser suevitas, brechas fundidas o una combinación de ambas rocas (Stöffler y Grieve, 2007).

(d) Registro de conductividad eléctrica (σ).Fig. 4.4 Interpretación petrofísica del registro de conductividad eléctrica (σ).

El registro de conductividad eléctrica se utilizó para determinar la calidad del fluido del pozo durante la construcción del Chicx-03A⁹⁵. Así que, si bien, se distinguieron cuatro unidades, éstas representan principalmente el comportamiento del fluido dentro del pozo⁹⁶. Sin embargo, éste registro sí midió la conductividad de las rocas más allá de la zona de invasión del agujero, puesto que los valores promedio corresponden a las litologías detectadas en los perfiles de resistividad y velocidad de onda P. Por ejemplo, a partir de 701.34 y hasta 1220 metros, las conductividades medias registradas fueron de ~200 dS·m, cantidades asociadas con rocas graníticas, cuyo

⁹⁵ Este registro se utilizó junto con el registro de temperatura como un indicador de la calidad de los fluidos de perforación y limpieza dentro del pozo y para detectar la presencia y tipo de fluidos provenientes de la formación.

⁹⁶ Como se mencionó en el capítulo anterior, la toma de registros se llevó a cabo en tres etapas, por lo que los registros de parámetros de fluidos (*conductividad y temperatura*) deben usarse cualitativamente. El registro de conductividad eléctrica se vio afectado por la presencia agua de mar y lodo de perforación en el pozo. Las conductividades máximas y mínimas registradas en el intervalo 845.62 a 851.43 metros se debieron a una pérdida del fluido hacia la formación.

rango varía de 200 a 650 dS·m; valores coincidentes con las mediciones promedio de las unidades tres (σ_3) y cuatro (σ_4), principalmente con ésta última. Además, se observa una anti-correlación (discordancia) entre este registro y el de velocidad de onda P (V_p) a partir de los 508.48 metros y hasta la profundidad total del pozo (Fig. 4.5).

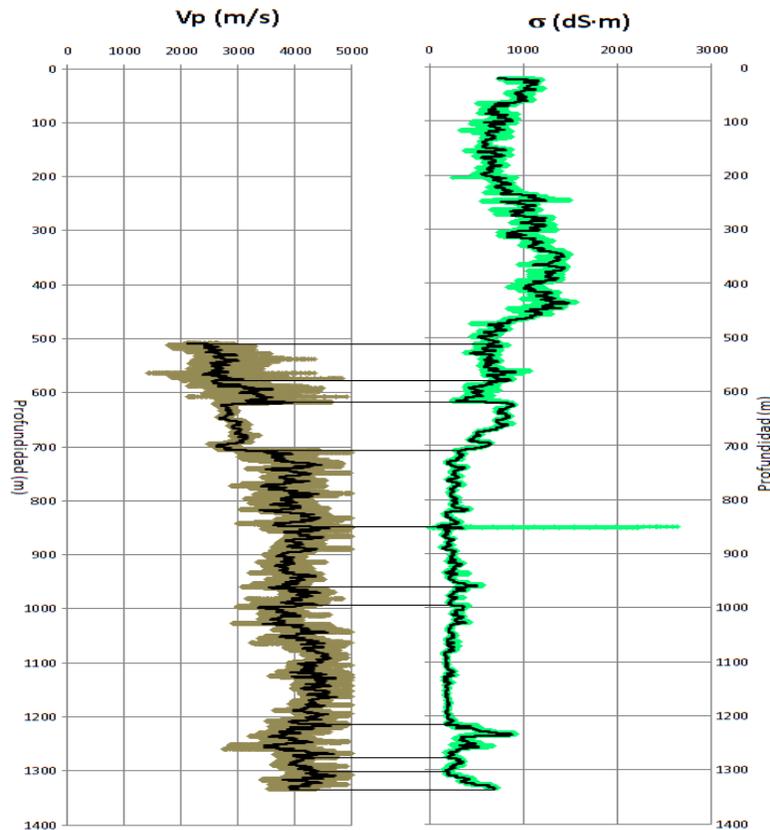


Fig. 4.5 Perfil de anti-correlación de los registros de velocidad de onda P (V_p) y conductividad eléctrica (σ).

Si bien el objetivo principal del registro de conductividad eléctrica era determinar y evaluar la calidad de los fluidos del pozo, de este perfil también se pudo obtener información útil para la caracterización litológica del Chicx-03A⁹⁷. Y aunque no se emplea directamente para este propósito, si se utilizó de forma indirecta para asistir y verificar las mediciones del registro de velocidad de onda P.

⁹⁷ Se mencionó anteriormente que este registro puede aportar información relativa a la mineralogía y porosidad de las litologías de investigación, pero se utiliza principalmente para determinar y evaluar los fluidos contenidos en ellas.

(e) Registro de susceptibilidad magnética (χ).

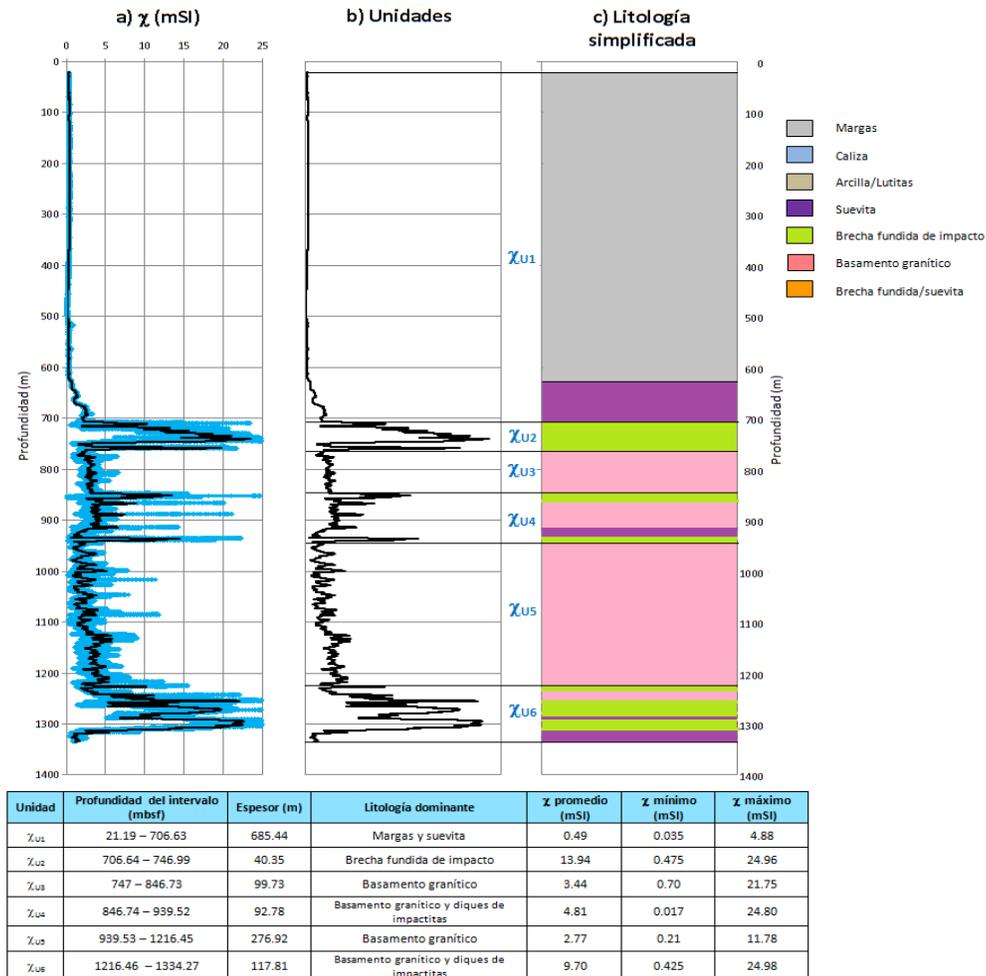


Fig. 4.6 Interpretación petrofísica del registro de susceptibilidad magnética (χ): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

En el registro de susceptibilidad magnética se identificaron seis unidades litológicas, la primera (χ_{U1}) se caracteriza por una baja susceptibilidad constante relativa a las rocas sedimentarias post-impacto; en la parte final de este intervalo, en las profundidades de 617.45 a 706.63 metros, se aprecia un incremento repentino de la susceptibilidad que señala la transición de los sedimentos que recubrieron el cráter a las litologías que integran el anillo de picos del Chicxulub, esta zona estaría compuesta principalmente por suevita, la cual posee una susceptibilidad mayor a la de las rocas carbonatadas, pero menor a las brechas fundidas de impacto (Urrutia Fucugauchi et al., 1996; Rebolledo-Vieyra y Urrutia Fucugauchi, 2006), estas brechas constituyen la litología dominante de la segunda unidad (χ_{U2}), intervalo que presenta la

susceptibilidad media más alta de todas las unidades⁹⁸ y que sería consistente con la segunda unidad del registro de velocidad de onda P (V_{pU2}) y la tercera del de resistividad profunda (R_{tU3}).

Las unidades tres (χ_{U3}), cuatro (χ_{U4}), cinco (χ_{U5}) y seis (χ_{U6}) muestran una susceptibilidad magnética consistente al basamento granítico con evidentes incursiones positivas y negativas de diques de impactitas, estas incursiones son positivas si los diques consisten o tienen una composición predominante de brecha fundida de impacto, son negativas si su estructura es mayormente de suevita. Este comportamiento de las mediciones en la parte inferior del pozo es similar en los registros de resistividad y de velocidad de onda P.

Las unidades tres y cinco poseen susceptibilidades muy semejantes entre sí con promedios de 3.44 y 2.77 mSI respectivamente, la diferencia es determinada por la presencia de los diques de impactitas y del tipo de roca dominante que los conforman. Las susceptibilidades máximas y mínimas indican una mayor presencia de diques en los intervalos cuatro y seis.

El registro de susceptibilidad magnética es fundamental en el estudio del cráter Chicxulub debido a las propiedades magnéticas que poseen las rocas originadas y afectadas por el impacto⁹⁹.

⁹⁸ Las impactitas tienen generalmente una susceptibilidad magnética más alta respecto a las rocas carbonatadas (*margas, calizas, lutitas, dolomías*) y a los granitoides. De las impactitas, las brechas fundidas de impacto poseen una mayor susceptibilidad magnética respecto a las suevitas (Urrutia Fucugauchi et al., 1996; Rebolledo-Vieyra y Urrutia Fucugauchi, 2006).

⁹⁹ Estas propiedades magnéticas de las rocas del anillo de picos se pueden usar para investigar las fuentes de anomalías magnéticas en todo el cráter y como herramienta para correlacionar entre los pozos en tierra, el Chicx-03A y para futuras perforaciones científicas (Morgan et al., 2017).

(f) Registro de rayos gamma (RG).

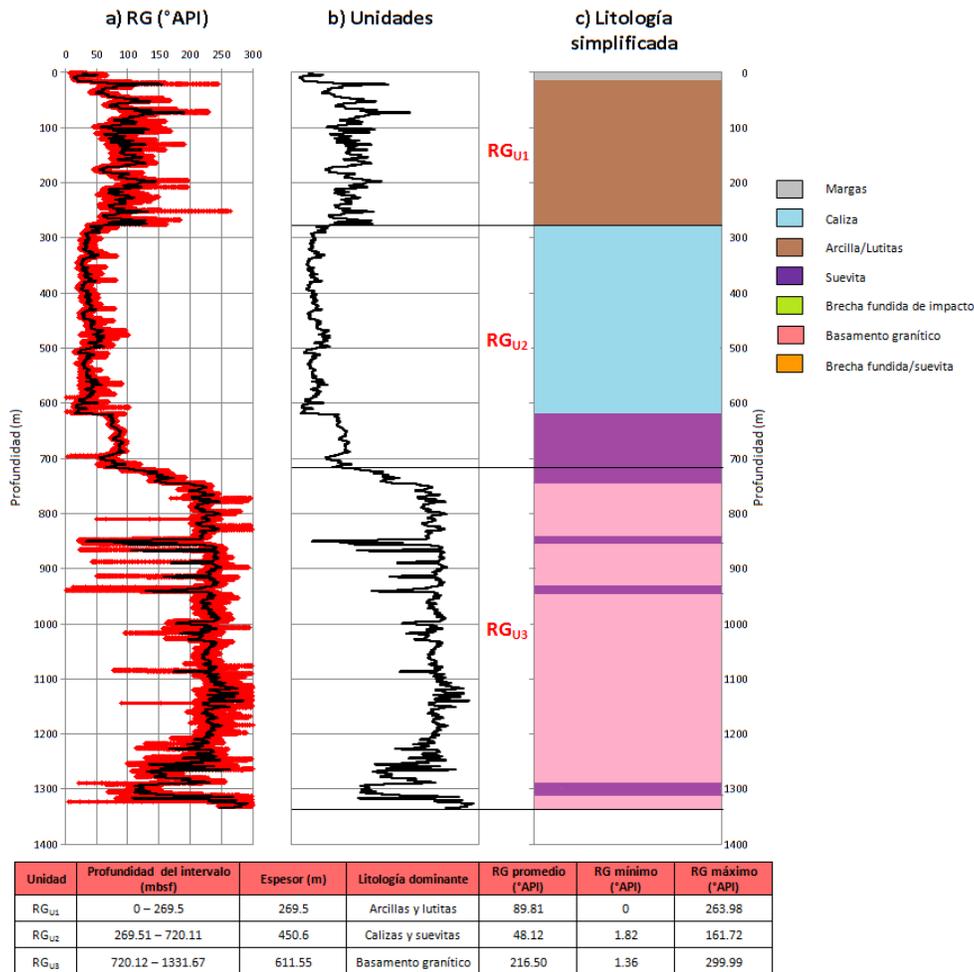


Fig. 4.7 Interpretación petrofísica del registro de rayos gamma (RG): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

En el registro de rayos gamma se identificaron tres unidades litológicas, la primera (RG_{U1}) se localiza en el intervalo de 0 a 269.5 metros, aquí la radiactividad natural tiene un rango de 0 a 263.98 °API¹⁰⁰, con una media de 89.81 °API; en esta unidad las radiaciones naturales indican un alto contenido de arcilla, por lo que arcillas y lutitas serían las litologías dominantes en la parte superior del pozo.

La segunda unidad (RG_{U2}) se encuentra de 269.51 y hasta 720.11 m, en este intervalo la radiactividad natural disminuye considerablemente respecto a la primera unidad,

¹⁰⁰ Esta es una unidad normalizada: 16.5 °API corresponden a una concentración de elementos radiactivos equivalentes a un microgramo de radio por tonelada de roca.

con un rango de 1.82 a 161.72 °API, y un promedio de 48.12 °API; en esta profundidad los sedimentos post-impacto están conformados principalmente por calizas hasta la profundidad de 617.33 metros, a partir de aquí los rayos gamma se incrementan de forma abrupta. Este cambio repentino en la radiación significa una variación litológica del pozo, determinando la zona de transición de la roca sedimentaria posterior al impacto a la suevita del anillo de picos del cráter. Esta zona está marcada por el aumento de las señales de rayos gamma y de susceptibilidad magnética.

La tercera unidad (RG_{U3}) comprende las profundidades de 720.12 a 1331.67 m, en este intervalo la radiactividad vuelve a incrementarse proporcionando valores consistentes con el basamento granítico con una media de 216.5 °API. En este registro también se detectaron incursiones de diques de suevita. Los rayos gamma naturales y la susceptibilidad magnética son constantes en general en el basamento granítico y ambos muestran claras incursiones de diques de suevitas y brechas fundidas.

Los valores del registro de rayos gamma son confiables, y junto con el registro de susceptibilidad magnética, estos perfiles no tuvieron problemas en sus herramientas para la recuperación de datos, a diferencia de los registros de resistividad y velocidad de onda P. Sin embargo, el grupo de científicos de la Expedición 364 sugiere que la información obtenida del registro de rayos gamma se utilice de forma cualitativa, debido a la atenuación de la señal entrante en las herramientas que realizaron la medición (Morgan et al., 2017)¹⁰¹. Los componentes espectrales de los rayos gamma (U, Th, K) son poco veraces, ya que los recuentos totales en la formación fueron bajos, registrando con frecuencia valores negativos, los cuales son indicadores de estadísticas incorrectas (Gulick et al., 2017).

¹⁰¹ Dos factores debilitaron la señal entrante del registro: (1) los rayos gamma fueron tomados a través de la tubería de revestimiento, es decir, se corrió el registro en agujero entubado; si bien, esta medición puede obtenerse tanto en agujero descubierto como entubado, se considera que debido a la tubería existe una ligera atenuación de la señal entrante; y (2), debido a las condiciones mecánicas del pozo, en algunos intervalos se aumentó la velocidad de la sonda para poder realizar todas las mediciones previstas, lo que incrementó el ruido en la señal de la herramienta.

(g) Registro de contenido de uranio (U).

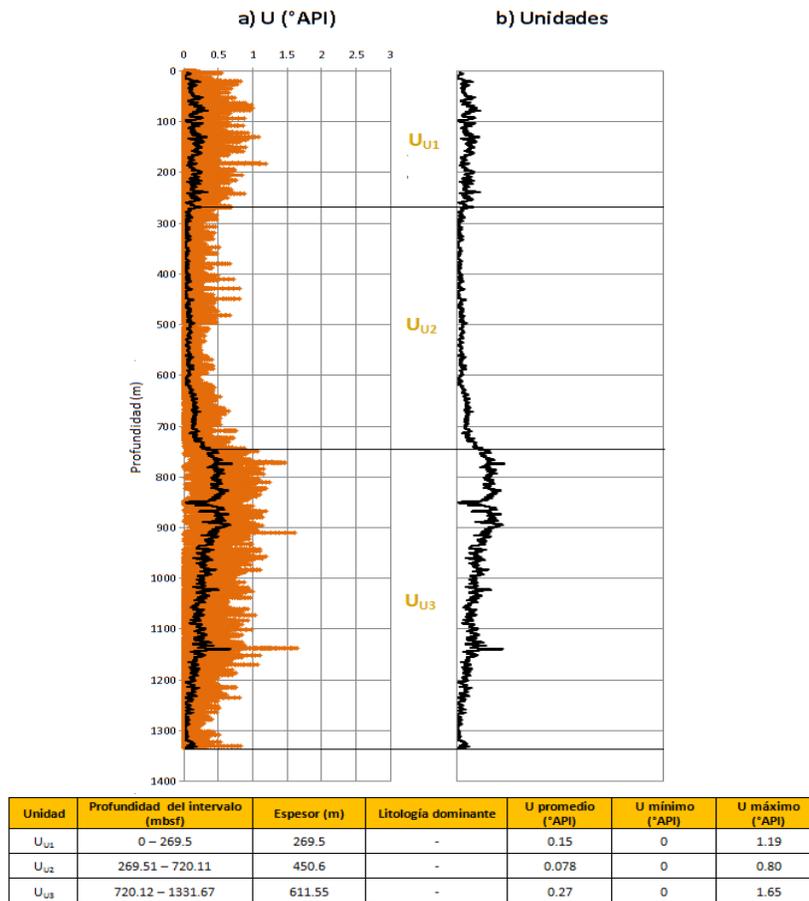


Fig. 4.8 Interpretación petrofísica del registro de uranio (U).

En el registro de contenido de uranio (U) se identificaron tres unidades, las cuales presentan un comportamiento muy similar a las unidades del registro de rayos gamma, pero debido a la poca confiabilidad de los datos de esta medición (Morgan et al., 2017)¹⁰², no se utilizará para definir litologías, sino como una herramienta de verificación del registro de rayos gamma¹⁰³.

¹⁰² En el apartado del registro de rayos gamma se menciona que sus componentes espectrales (^{238}U , ^{40}K y ^{232}Th) presentan una gran incertidumbre en sus datos debido a que registraron valores negativos y estadísticas incorrectas, por lo cual no se recomienda su uso para definir litologías.

¹⁰³ Los diferentes tipos de roca producen y emiten distintas cantidades y espectros de rayos gamma debido a sus contenidos variables de uranio, potasio y torio, isótopos que representan las fuentes de radiactividad natural más abundantes en el subsuelo. Esta peculiaridad en la cantidad y traza de radiación permite determinar el contenido mineralógico de una formación, es decir, clasificar con mayor certeza el tipo de roca que la compone. Por ejemplo, las rocas que contienen uranio se asocian principalmente a los carbonatos, dolomías y materiales orgánicos como el carbón y la gilsonita.

(h) Registro de contenido de potasio (K).

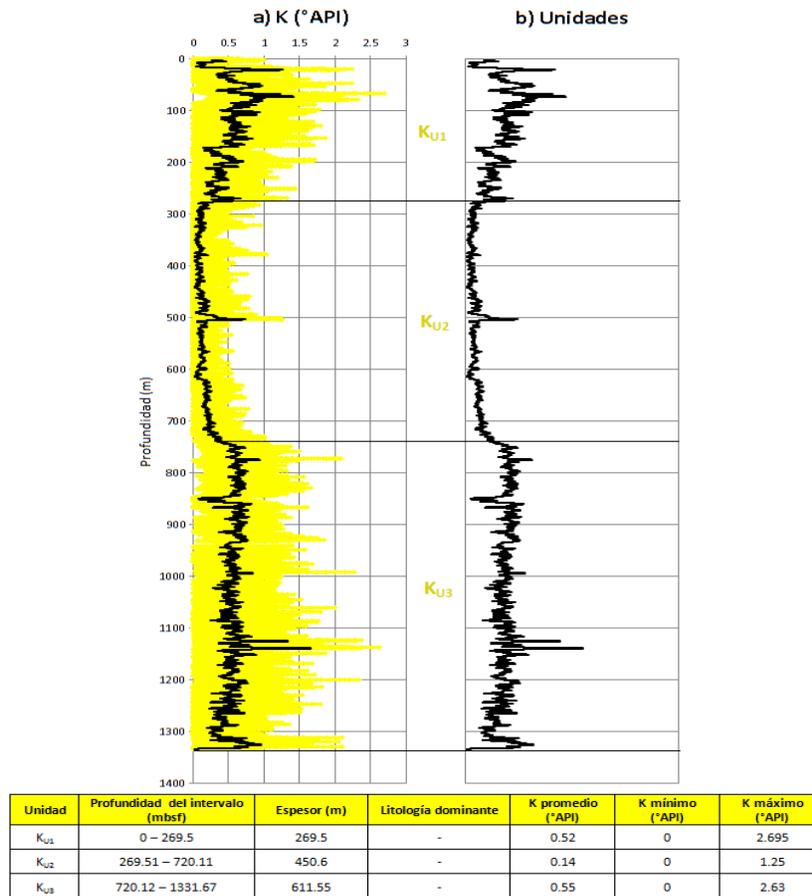


Fig. 4.9 Interpretación petrofísica del registro de potasio (K).

El registro de contenido de potasio (K) también se dividió en tres unidades, las cuales muestran un comportamiento similar a las unidades de los registros de rayos gamma y de contenido de uranio. Este registro, al igual que el del uranio, no se empleará para la caracterización litológica del pozo de forma individual¹⁰⁴, pero puede ser usado, junto con el de uranio, como una herramienta cualitativa para asistir a las mediciones de los rayos gamma.

¹⁰⁴ El potasio se encuentra presente en la illita, feldspatos alcalinos, micas, lutitas, arcillas y en algunos minerales evaporíticos.

(i) Registro de contenido de torio (Th).

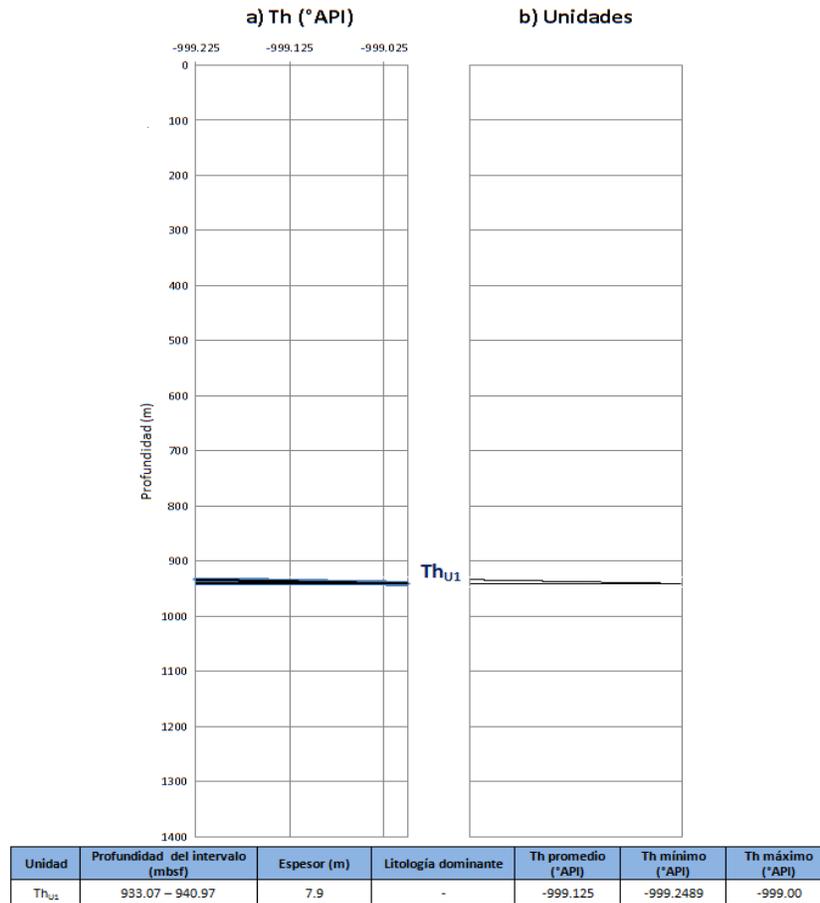


Fig. 4.10 Interpretación petrofísica del registro de torio (Th).

En el registro de contenido de torio (Th) se recuperaron datos en un solo intervalo. Fuera de esta unidad, de casi ocho metros de espesor, se registraron cantidades no válidas, los cuáles se reemplazaron por un valor nulo de -999.25 (Morgan et al., 2017)¹⁰⁵. El registro de torio¹⁰⁶ no muestra ningún comportamiento similar a los contenidos de uranio, potasio ni a los rayos gamma. Este perfil no tiene la calidad necesaria para asistir la evaluación del registro de rayos gamma.

¹⁰⁵ Los valores de registro inválidos pudieron deberse a los siguientes factores: (1) datos del registro en agujero entubado; (2) efecto en la respuesta de la herramienta al acercarse a la tubería de revestimiento; y (3) ruido o interferencia en el canal de la herramienta.

¹⁰⁶ Los minerales que contienen torio son escasos, su presencia se asocia principalmente a las arcillas y minerales pesados.

4.2 Integración de los datos del pozo.

Después de la descripción de los registros geofísicos del pozo, se realizó un examen gráfico para dividir en unidades litológicas posibles cada perfil. Posteriormente se efectuó un análisis estadístico general a los registros y uno particular a cada unidad identificada, con esto se obtuvo los estadígrafos necesarios para diagnosticar que litologías posee cada unidad, y por ende, elaborar una columna litoestratigráfica general y simplificada por registro. Esta metodología nos permite identificar perfiles de correlación entre los diferentes registros para realizar una interpretación más certera, y para definir qué propiedades petrofísicas se pueden interpretar y cuáles no, es decir, clasificar qué registros son necesarios y cuales son prescindibles (Tabla 1)¹⁰⁷.

Registro utilizados para la caracterización del Chicx-03A	Descripción
Resistividad somera (Rxo)	Mediciones confiables que determinan litologías
Resistividad profunda (Rt)	Mediciones confiables que determinan litologías
Velocidad de onda P (Vp)	Mediciones confiables que determinan litologías
Conductividad eléctrica (σ)	Mediciones que asisten y verifican el registro Vp
Susceptibilidad magnética (χ)	Mediciones confiables que determinan litologías
Rayos gamma (RG)	Mediciones confiables que determinan litologías
Registro no utilizados para la caracterización del Chicx-03A	Descripción
Contenido de uranio (U)	Estadísticas incorrectas, valores negativos, poca confiabilidad
Contenido de potasio (K)	Estadísticas incorrectas, valores negativos, poca confiabilidad
Contenido de torio (Th)	Estadísticas incorrectas, valores nulos

Tabla 1. Síntesis de la clasificación de los registros para la integración de los datos del pozo.

Es necesario mencionar que antes de iniciar con la metodología de análisis e interpretación, los registros del Chicx-03A se encontraban a la misma profundidad¹⁰⁸.

¹⁰⁷ La mayoría de las caracterizaciones petrofísicas a partir de registros geofísicos de pozo se llevan a cabo para la exploración de recursos naturales tales como agua, hidrocarburos y minerales; por lo cual es necesario el uso de herramientas, modelos matemáticos y métodos de interpretación específicos para estos casos.

¹⁰⁸ La medición de la profundidad total con herramientas de cable es inexacta debido a: variaciones en el intervalo de las corridas de los registros, peso y forma de la sonda (*si es cilíndrica o está montada en un caliper*) y al estado mecánico del pozo. Por ello, el cambio y la coincidencia de profundidad de los registros geofísicos del pozo es una tarea fundamental que consiste en evaluar la profundidad de ejecución de cada registro y referenciarlos a marcadores exactos para todos los perfiles, como los datos de plataforma y del fondo del mar, pues una falla al correlacionar los registros cuando existe un desfase de profundidades invalidaría por completo la interpretación de los mismos. Para el Chicx-03A este ajuste incluyó las siguientes correcciones: (1) posibles discrepancias en la profundidad entre la puesta a cero inicial y la puesta a cero al retirar las herramienta (*fueron generalmente menores a un metro*); (2) posible diferencia entre el cero del registrador y el piso de la plataforma; (3) correcciones específicas para ciertas herramientas; (4) cambio manual por parte del personal de la expedición a un registro de referencia utilizando características distintivas.

(a) Integración de los registros de resistividad (Rxo, Rt) y velocidad de onda P (Vp).

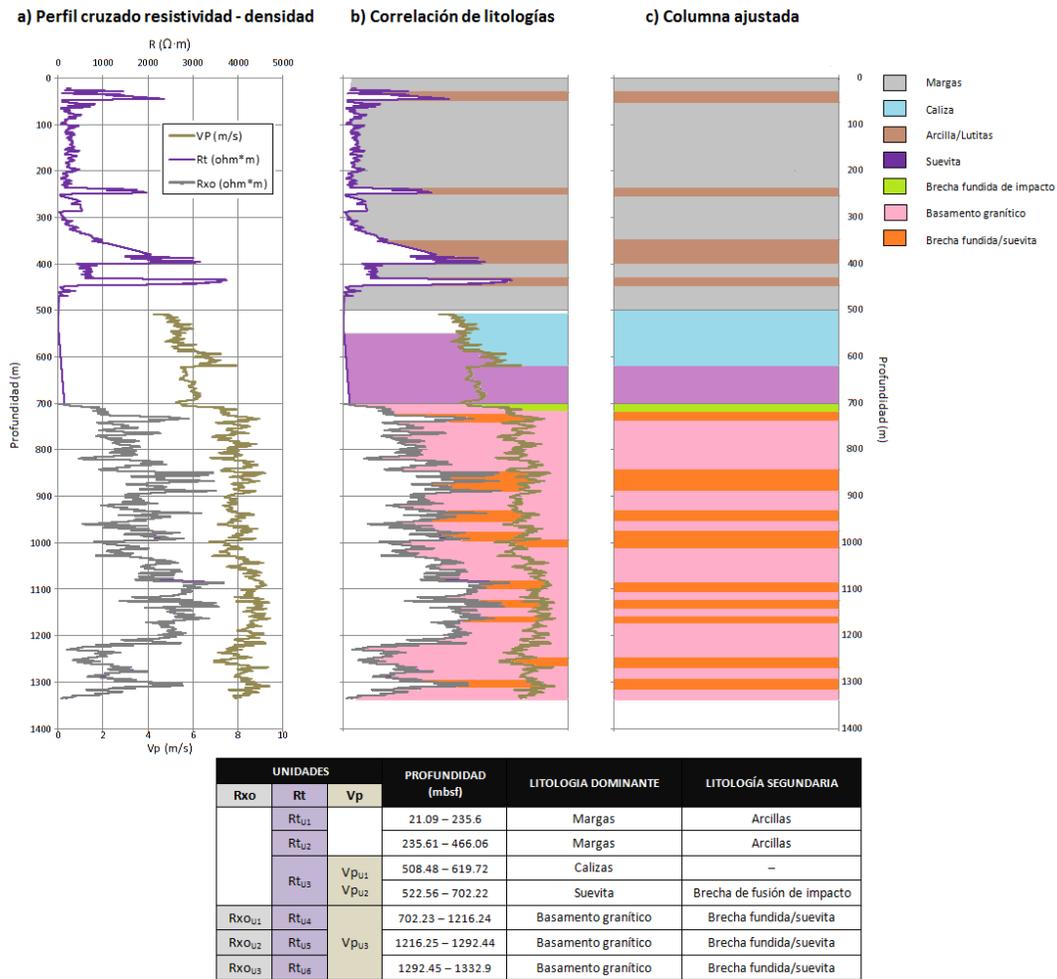


Fig. 4.11 Integración de los registros de resistividad (Rxo, Rt) y velocidad de onda P (Vp): (a) perfil cruzado¹⁰⁹; (b) correlación de litologías y (c), columna ajustada.

De 0 a 466 metros se cuenta únicamente con los datos de resistividad profunda, pues como se mencionó anteriormente, las herramientas de los registros de Rxo y Vp no recuperaron datos confiables en esta zona del pozo. En esta profundidad los valores

¹⁰⁹ Este *perfil cruzado* es un tipo de *crossplot* (gráfico cruzado) para determinar la relación entre los registros de resistividad y velocidad de onda P, los cuales operan bajo un principio físico de medición diferente, pero que determinan propiedades petrofísicas que se asocian entre sí (*porosidad, permeabilidad y densidad de las rocas*), mostrando las respuestas de cada registro para los diferentes tipos de roca detectados. Los *crossplots* son diagramas bidimensionales con variables diferentes escaladas en sus ejes X y Y; las escalas suelen ser lineales, pero también pueden ser logarítmicas; estos gráficos son utilizados para determinar la relación entre dos medidas diferentes de una misma muestra o momento (al uso de *crossplots* para esto se le llama *método de cartas*). Estos diagramas son herramientas comunes en la interpretación petrofísica a partir de datos obtenidos de núcleos y registros geofísicos de pozo.

de resistividad corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas¹¹⁰, que estarían constituidas principalmente por margas, calizas y lutitas¹¹¹, las resistividades máximas en este intervalo confirman la presencia de lutitas¹¹². Después hay una sección de 42 metros (de 406.06 a 508.48 m) donde ninguno de estos tres registros obtuvo información, pero que sí está registrado en los perfiles de rayos gamma naturales y susceptibilidad magnética, así que su litología se determina con éstos últimos. A partir de 508.48 y hasta los 619.72 metros, el registro de onda P muestra un aumento de la velocidad respecto a la profundidad, indicando que la densidad de las rocas sedimentarias se incrementa mientras su porosidad disminuye; podemos inferir que en esta unidad predominan las calizas. Luego, de 619.73 a 702.22 metros está la zona de baja velocidad sísmica que en el registro de resistividad aparece como un intervalo de transición, que representa el cambio litológico de los sedimentos post-impacto a las impactitas que conforman el anillo de picos del cráter, que son rocas altamente fracturadas y porosas (Morgan et al., 2000, 2011; Gulick et al., 2013). Bajo estas rocas, de 702.23 y hasta 1332.9 los perfiles de los tres registros determinan que la litoestratigrafía dominante se trata del basamento granítico que subyace a la Plataforma de Yucatán, con algunos picos máximos de resistividad y mínimos en la velocidad que señalan cambios litológicos abruptos debido a la presencia de diques de rocas con una densidad menor a la de los granitoides, que podrían ser diques de suevita y brechas fundidas (Stöffler y Grieve, 2007).

La resistividad y la velocidad de onda P están bien correlacionadas en la escala del pozo, muestran perfiles concordantes entre sí, lo que revalida y ajusta el comportamiento litológico individual de cada registro.

¹¹⁰ La calidad de los datos se evalúa comparándola con valores razonables para las litologías registradas (Morgan et al., 2017).

¹¹¹ Principales rocas que constituyen los sedimentos post-impacto que recubrieron el cráter Chicxulub (Morgan y Warner, 1997; Vermeesch y Morgan, 2008; Urrutia Fucugauchi et al., 2011).

¹¹² Las lutitas tienen un tamaño de grano muy fino, lo que favorece una gran porosidad y baja permeabilidad, características que determinan su alta resistividad. Si las lutitas están rellenas de fluidos no conductores (*hidrocarburos o aguas de baja salinidad*) su resistividad aumentará, si almacenan fluidos conductores (*aguas de formación*) su resistividad disminuirá. Las lutitas pueden contener cantidades relativamente grandes de material orgánico, en comparación con otros tipos de rocas, a éstas se les denomina *lutitas negras*.

(b) Integración de los registros de rayos gamma (RG) y susceptibilidad magnética (χ).

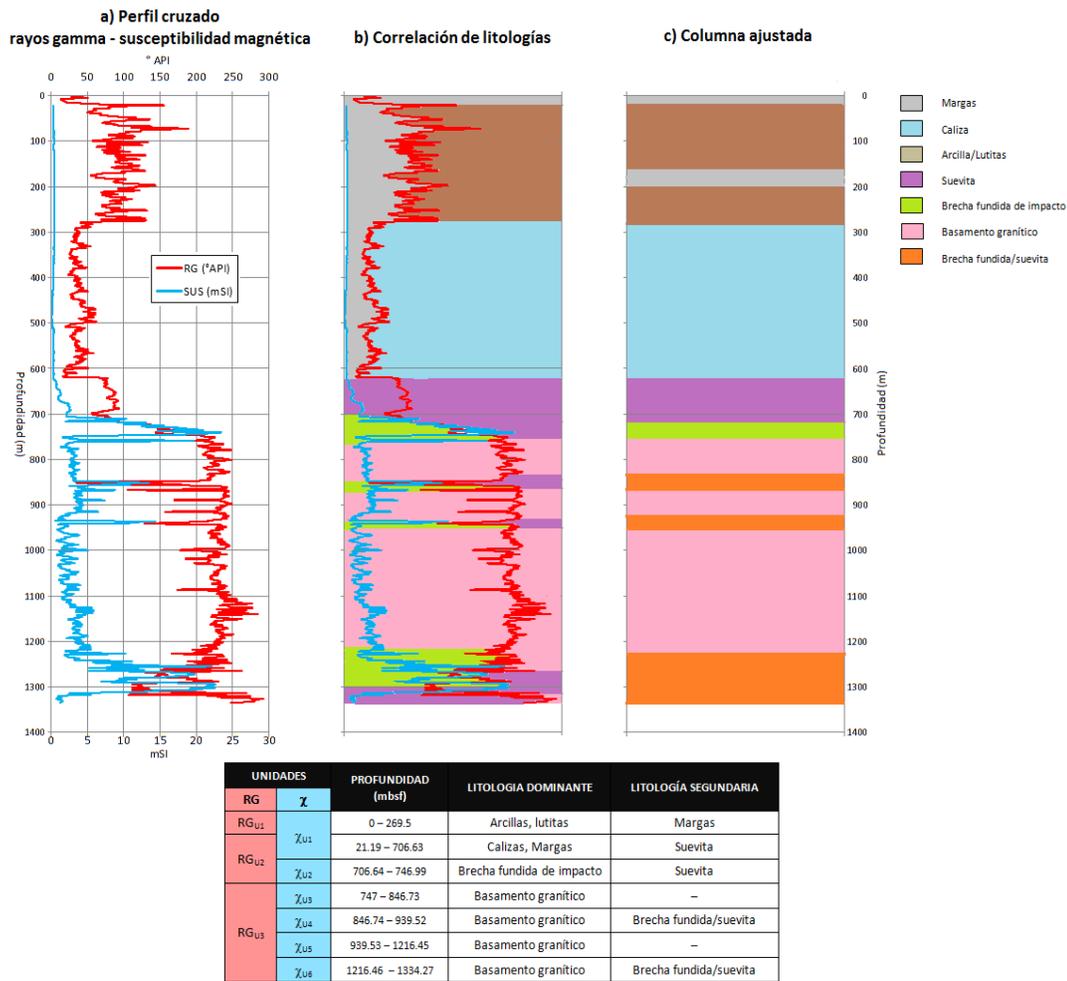


Fig. 4.12 Integración de los registros de rayos gamma (RG) y susceptibilidad magnética (χ): (a) perfil cruzado; (b) correlación de litologías y (c), columna ajustada.

Esta integración muestra dos registros que poseen un contraste marcado entre sí en la determinación de algunas litologías: rocas que presentan una baja susceptibilidad magnética, tienen altos valores de radiactividad natural, y viceversa, rocas con baja radiactividad exhiben una alta susceptibilidad. Cabe señalar que este comportamiento contrastante no se da o no es tan marcado en todos los tipos de rocas, pero es fundamental en la caracterización petrofísica de litologías de impacto, donde la susceptibilidad magnética es una herramienta importante en su descubrimiento y localización (Urrutia Fucugauchi et al., 2004)¹¹³. La discordancia de estos perfiles

¹¹³ Las impactitas presentan anomalías magnéticas importantes, así como una anisotropía muy acentuada.

permite correlacionar litologías de igual manera que se hace en la concordancia de registros como los de resistividad y densidad.

De 0 a 617.3 metros los valores de susceptibilidad magnética son bajos, consistentes con litologías carbonatadas, entretanto los rayos gamma presentan un promedio de 90° API, con una variación general baja, salvo en la parte superior del pozo (21.2 a 269.5 m), donde se registraron valores máximos de radiación, indicativos de la presencia de arcillas y lutitas¹¹⁴, por lo que este intervalo correspondería a una formación predominantemente arcillosa. A partir de 617.33 y hasta los 712.84 metros, las mediciones de ambos registros comienzan a aumentar respecto a la profundidad, por lo que se marca en este intervalo la transición de los sedimentos post-impacto al anillo de picos. De 712.84 a 747.02 metros se observa un cambio muy evidente en el comportamiento de los perfiles, especialmente el de susceptibilidad magnética, que presenta sus valores máximos en este pequeño intervalo; la variabilidad es alta respecto a la parte superior de las impactitas, lo cual puede deberse a una anisotropía mucho mayor, señalando la presencia de diferentes litologías de impacto.

El contacto entre las impactitas de la parte superior del anillo de picos y el basamento granítico se encuentra en 747.2 metros, y se caracteriza por una fuerte disminución en la susceptibilidad magnética y un aumento de los rayos gamma. Este intervalo inferior del pozo presenta una variación moderada en la radiactividad (con un promedio de 216.5 °API, valor consistente con los granitoides) y baja en la susceptibilidad (con una media de ~5 mSI), registrando valores crecientes (en la susceptibilidad) y decrecientes (en la radiactividad) en intervalos que presentan mediciones consistentes con la suevita y las brechas fundidas; con estos registros se revalidarían las interpretaciones que deducen que los diques de la parte baja del anillo de picos están compuestos por litologías de impacto.

¹¹⁴ El registro de rayos gamma es muy sensible al contenido de arcilla, pues los elementos radiactivos tienden a concentrarse en éstas y en las lutitas. Empero, hay que mencionar que existen otros factores que reflejan altos valores de radiación en formaciones limpias, como lo son: *cenizas volcánicas, residuos de granito, aguas con sales radiactivas en poros y fracturas, contenido de materia orgánica y presencia de illita, feldespatos alcalinos y micas.*

(c) Integración final.

La integración de los registros seleccionados del pozo determinó que la columna litoestratigráfica del Chicx–03A puede dividirse en tres unidades litológicas principales: (1) rocas sedimentarias post–impacto; (2) litologías de impacto y (3), el basamento granítico (Tabla 2).

No.	UNIDAD	PROFUNDIDAD (mbsf)	LITOLOGÍAS	UNIDADES POR REGISTRO				
				Rt _{U1}	Vp _{U1}	χ _{U1}	RG _{U1}	
1	ROCAS SEDIMENTARIAS	0 – 616.58	Margas, calizas, lutitas, arcillas	Rt _{U2}	Vp _{U2}	χ _{U2}	RG _{U2}	
2	IMPACTITAS	617.33 – 747.02	Suevita, brechas fundidas de impacto	Rt _{U3}				
3	BASAMENTO GRANÍTICO	747.2 – 1334.27	Granitoides, suevita, brechas fundidas de impacto	RxO _{U1}	Vp _{U3}	χ _{U3}	RG _{U3}	
				Rt _{U4}				
				RxO _{U2}				χ _{U4}
				Rt _{U5}				χ _{U5}
				RxO _{U3}		χ _{U6}		

Tabla 2. Unidades litológicas del pozo Chicx–03A.

La primera unidad (0 – 616.58 mbsf), está conformada por las rocas sedimentarias que recubrieron el cráter e hicieron posible su preservación (Urrutia Fucugauchi et al., 1996). Estos sedimentos están compuestos principalmente por margas, calizas, arcillas y lutitas.

La segunda unidad (617.33 – 747.02 mbsf), está formada por impactitas: suevitas y brechas fundidas. Estas rocas se caracterizan por cambios importantes en las propiedades de los registros, tales como baja densidad y alta susceptibilidad magnética. Esta segunda unidad litológica pertenece al anillo de picos del cráter, específicamente a su parte superior.

La tercera unidad (747.2 – 1334.27 mbsf), está constituida por el basamento granítico con numerosas intrusiones de diques. Las lecturas de los registros de susceptibilidad magnética, rayos gamma y velocidad de onda P indican que se trataría primordialmente de diques de brechas de impacto. Esta unidad pertenece también al anillo de picos del cráter, es su parte inferior.

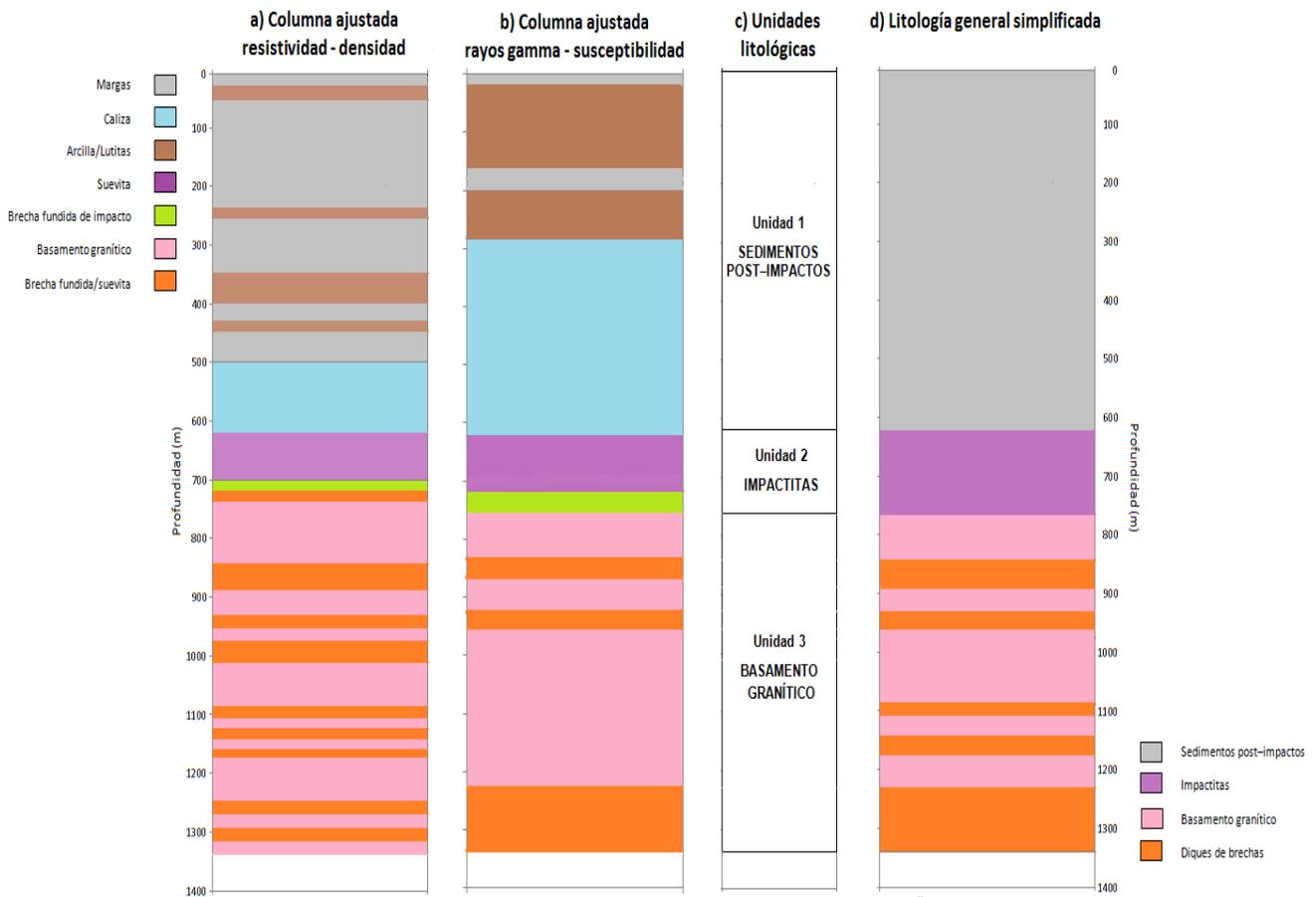


Fig. 4.13 Integración final del conjunto de los registros seleccionados: (a) columna ajustada de los registros de resistividad y velocidad de onda P; (b) columna ajustada de los registros de rayos gamma y susceptibilidad magnética; (c), unidades litológicas; y (d), litología general simplificada del pozo Chicx-03A.

En la columna *d*, se compendian las litologías detectadas por los registros geofísicos del pozo; si bien es cierto que la calidad de los datos permitió definir los tipos de rocas con base en valores establecidos y corroborados (Morgan et al., 2017), sólo mediante el estudio de muestras directas como los núcleos del pozo es posible hacer una caracterización. Así que para evitar supuestos, se realizó una generalización litológica a cuatro tipos de rocas: los sedimentos post-impacto incluyen margas, arcillas, lutitas y calizas; las impactitas refieren a la suevita y las brechas fundidas de impacto; el basamento granítico abarca a los granitoides; y la cuarta, la de los diques de brechas, hace referencia a un rasgo litológico y estructural, por eso éstos no se resumieron dentro de su litoestratigrafía dominante.

4.3 Modelo petrofísico.

Un modelo es una representación de un evento, fenómeno o sistema que tiene como propósitos analizar, describir y simular dichos casos. De las múltiples utilidades de los modelos, hay dos en ciencias de la Tierra: (1) sirven para reducir la complejidad de un caso de estudio permitiendo el análisis de características y procesos; y (2), ayudan a elaborar predicciones del origen, naturaleza y comportamiento de los eventos o fenómenos que se modelan. Existen diversos tipos de modelos, su selección está en función de múltiples factores¹¹⁵, en esta tesis se elaboró un modelo analítico que caracteriza las secuencias litológicas del pozo Chicx–03A mediante el análisis y la correlación de los registros geofísicos que se tomaron durante la perforación (Fig. 4.14). La información obtenida se integró y se interpretó en términos de las variaciones petrofísicas.

Para abordar y emplear el modelo petrofísico desarrollado (Fig. 4.14), hay que considerar dos aspectos: (1) los supuestos¹¹⁶ de este modelo son determinar cuáles, cuántas y a que profundidades se encuentran las litologías que atraviesa el pozo Chicx–03A en su incursión para localizar e investigar el anillo de picos del cráter; y (2), enfatizar que este modelo se construyó exclusivamente con el análisis de los registros geofísicos del pozo, el cual puede ser corroborado y mejorado, según sea el caso, con el estudio y observación de los núcleos recuperados. Por lo tanto, el modelo petrofísico compendia las litologías caracterizadas, cumpliendo su objetivo de generar una representación razonablemente veraz de la columna litoestratigráfica del pozo Chicx–03A.

¹¹⁵ Principalmente referidas a la cantidad y calidad de la información, y el número y tipo de variables.

¹¹⁶ Todos los modelos parten de un supuesto o de una serie de ellos, ya sea de manera implícita o explícita; estos ayudan a la simplificación y orientación de los métodos, técnicas y análisis de modelación. Dichos supuestos se establecen para la construcción y comprensión de los modelos.

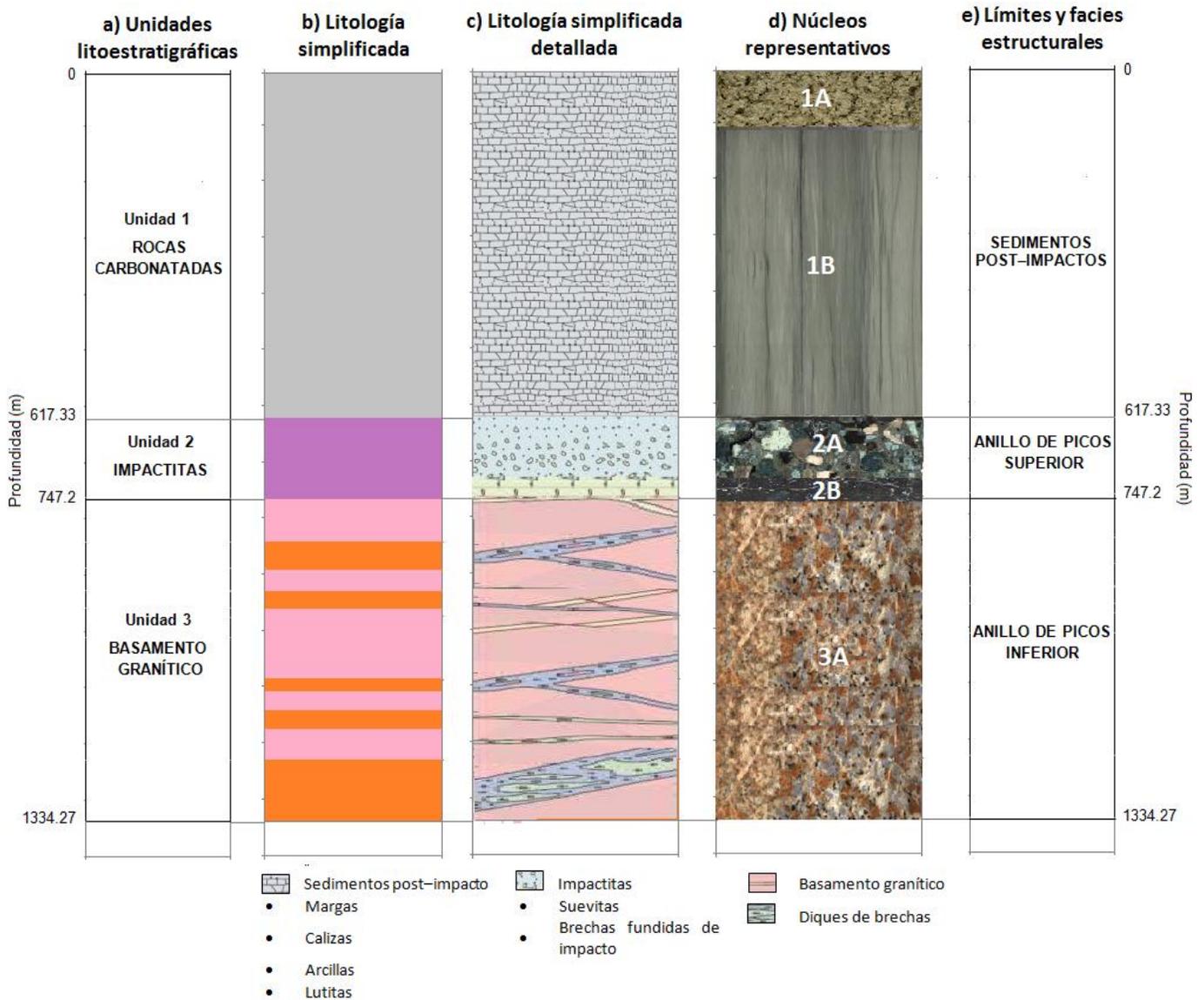


Fig. 4.14 Modelo petrofísico del pozo Chicx-03A: (a) unidades litoestratigráficas; (b) litología simplificada; (c), litología simplificada detallada¹¹⁷; (d) imágenes de núcleos representativos¹¹⁸; y (e), límites y facies estructurales.

La columna a, presenta la división general del pozo en tres unidades litoestratigráficas con sus respectivas profundidades: (1) sedimentos posteriores al impacto (0–616.58 mbsf); (2) impactitas (617.33–747.02 mbsf); y (3), basamento granítico (747.2–1334.27 mbsf).

¹¹⁷ El diseño de la litología detallada se basa en los reportes de la Expedición IODP-ICDP (Christeson et al., 2017).

¹¹⁸ Las imágenes digitalizadas de los núcleos pueden ser consultadas en la página electrónica de la IODP; en la nucleoteca del Instituto de Geofísica de la UNAM, se guardan especímenes físicos de algunas de estas muestras.

En la columna *b*, se muestra de forma simplificada la caracterización litológica resultante de la integración de los registros geofísicos del pozo. La columna *c*, presenta la misma litología pero con una simbología detallada para visualizar algunas de las características físicas de las unidades litoestratigráficas: en la primera unidad, se representó con un solo trazo la secuencia de los sedimentos post-impacto; en la segunda unidad, la de las impactitas, se utilizaron dos diseños para simbolizar las litologías detectadas en este intervalo, las suevitas y las brechas fundidas de impacto, éstas últimas se sitúan en la parte inferior de esta unidad, aproximadamente de 706.63 hasta 747.02 mbsf¹¹⁹; en la tercera unidad, es donde resultaron más útiles los detalles dibujados, pues permitieron esbozar la presencia de los diques en el basamento granítico.

En la columna *d*, se presentan imágenes de núcleos representativos de cada unidad litológica: en los sedimentos post-impactos se mostraron dos núcleos, 1A corresponde a margas recuperadas a ~15 mbsf y 1B pertenece a calizas de ~615 mbsf; en las impactitas se muestran también dos núcleos, 2A es la foto de una suevita extraída a ~688 mbsf y 2B la de una brecha fundida de impacto obtenida a ~734 mbsf; en el basamento granítico se colocó la imagen de un espécimen de granitoide fracturado recuperado a ~853 mbsf. Estas fotografías no se utilizaron para la interpretación de los registros geofísicos del pozo ni para la construcción del modelo petrofísico, se utilizaron sólo como ilustraciones representativas y de referencia para la presentación de los resultados obtenidos en este trabajo.

Y finalmente, en la columna *e*, se interpretan las unidades litológicas en términos de sus características estructurales¹²⁰. La primera unidad, pertenece a los sedimentos post-impacto que son parte de la Plataforma Carbonatada de Yucatán; éstos sedimentos son una mezcla de litologías dominadas por calizas, margas, arcillas y

¹¹⁹ Esta distinción dentro de las impactitas, de la suevita a la brecha fundida de impacto, fue detectada en los registros a profundidades muy similares: en el registro Vp se muestra a los 701.35 mbsf, en los de resistividad a 702.23 mbsf, y en el perfil de susceptibilidad aparece en 706.63 mbsf. Se tomó ésta última profundidad debido a que el registro de susceptibilidad magnética es una herramienta más precisa para el descubrimiento y localización de las impactitas respecto a los otros registros (Urrutia Fucugauchi et al., 2004).

¹²⁰ En geología, las *facies* son conjuntos de características generales de una unidad de roca (litoestratigráfica), que reflejan su origen y la diferencian de otras unidades adyacentes.

lutitas principalmente (Morgan y Warner, 1997; Vermeesch y Morgan, 2008; Urrutia Fucugauchi et al., 2011; Christeson et al., 2017); conocer su proporción directa y determinar su abundancia puede hacerse con un estudio más minucioso de los registros en este intervalo y con análisis de laboratorio de los núcleos recuperados. De acuerdo a las simulaciones numéricas de la formación del anillo de picos, éste está constituido por litologías de impacto y por rocas del basamento altamente fracturadas¹²¹, las primeras conformarían la parte superior de la estructura y las segundas la parte inferior, zonas clasificadas como anillo superior y anillo inferior respectivamente (Collins et al., 2002, 2008; Gulick et al., 2008; Kring et al., 2004, 2008; Morgan et al., 2000, 2002, 2011; Urrutia Fucugauchi et al., 2004, 2008). De acuerdo a estas predicciones, la segunda unidad que contiene las impactitas corresponde al intervalo superior del anillo, y la tercera unidad del basamento granítico al intervalo inferior; ambas unidades integran el anillo de picos del cráter Chicxulub.

Este modelo muestra un esbozo de la columna atravesada por el pozo Chicx–03A, y arroja resultados compatibles con las hipótesis de la naturaleza y formación del anillo de picos, en las que se conjetura que éste se constituye por rocas del basamento brechadas, elevadas (levantadas) y fracturadas; y por material fundido y fragmentado perteneciente a otras litologías (Collins et al., 2002, 2008; Gulick et al., 2008; Kring et al., 2004, 2008; Morgan et al., 2000, 2002, 2011; Urrutia Fucugauchi et al., 2004, 2008).

¹²¹ Está condición de fracturamiento por impacto explica la presencia en los megabloques graníticos que están debajo del cráter de numerosos diques de brechas, también conocidos como diques suevíticos, diques de rocas de impacto y diques policrísticos o poliméricos clásticos (Wittmann et al., 2004).

CONCLUSIONES

1. El análisis de los registros geofísicos y propiedades petrofísicas del pozo Chicxulub–03A, se llevó a cabo en diferentes etapas que posibilitaron determinar qué registros geofísicos eran útiles para la reconstrucción de la columna litológica del Chicx–03A, e identificar perfiles de correlación entre los diferentes registros para caracterizar las litoestratigrafías.
2. El método de análisis, éste posee ventajas y limitaciones. Algunas de las aportaciones son las siguientes: (a) la aplicación de un método analítico que engloba múltiples registros geofísicos de pozo; (b) identificación y delimitación de posibles unidades litológicas a partir del examen de los perfiles y posterior verificación a través de un examen estadístico de los registros; (c) desarrollo de una correlaciones entre cinco tipos de registros que miden cuatro propiedades físicas diferentes; y (d), construcción de un modelo petrofísico general que incluye la visualización de las litologías e interpretación estructural. La principal limitación de este método es, en parte, una de sus aportaciones: su desarrollo y construcción se basó únicamente en información obtenida de los registros geofísicos del pozo sin el apoyo del estudio de los núcleos. El análisis de éstos últimos reforzaría el modelo generado en este trabajo, recíprocamente el modelo facilitaría el uso de los núcleos y calibraría su profundidad.
3. El criterio para delimitar e identificar las unidades litológicas de cada registro se fundamentó en reconocer paquetes que mostraran discontinuidades en sus características cualitativas y cuantitativas. Con esta metodología, además de determinar el número y tipo de litologías encontradas, se pueden establecer perfiles de correlación entre el conjunto total de los registros, lo cual ayudará a elaborar una caracterización más exacta. Sin embargo, las unidades propuestas a partir de los registros geofísicos deben ligarse a la información que se obtenga de

los núcleos recuperados del pozo, con el propósito de mejorar o calibrar, según sea el caso, la interpretación de los registros.

4. Los perfiles de resistividad, somera (Rxo) y profunda (Rt), presentan un comportamiento casi idéntico a partir de 702.23 y hasta 1332.9 metros, lo cual podría significar que uno de los dos registros está repetido, o que una de las mediciones no se llevó a cabo y la otra se replicó para suplirla. El registro Rxo mide la resistividad de la zona lavada, también llamada *flushed zone*, es decir, es un perfil de poca penetración, que mide las resistividades de materiales muy cercanos al pozo, y los valores de resistividad no son siempre representativos de la formación al estar invadidos por los fluidos de perforación. Los valores promedio de resistividad en ambos registros en las profundidades indicadas son de $\sim 2.18 \Omega \cdot m$, es posible que estas cantidades correspondan a la influencia de la zona invadida, por lo que se sugirió que ambos registros de resistividad podrían tratarse de perfiles Rxo, situación que restaría confiabilidad a éstas mediciones para caracterizar litológicamente las rocas fuera de la zona invadida. Sin embargo, en los reportes de la expedición se especifica que los dos registros de resistividad se realizaron con herramientas independientes, la herramienta somera fue una DLL3 y la profunda una DIL.

5. Se determinaron tres unidades litológicas, de las cuales dos pertenecen al anillo de picos. Cabe resaltar que no se delimitaron subunidades dentro de los intervalos por no ser uno de los objetivos de esta tesis, eso correspondería a trabajos que incluyan la utilización de los núcleos del pozo.

Finalmente, el cráter Chicxulub, se ha convertido en una de las regiones más exploradas a nivel nacional e internacional. Ésta estructura es un laboratorio natural donde continuamente se aplican y calibran métodos geofísicos que permitan obtener información para dilucidar el origen de su formación, su naturaleza y los efectos posteriores.

Apéndices

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

• Fig. 1.1 Localización geográfica de la Plataforma de Yucatán.....	12
• Fig. 1.2 Mapa geomorfológico de la Plataforma de Yucatán.....	13
• Fig. 1.3 Reconstrucción de la dinámica de la formación de la zona del Caribe, el Golfo de México y el movimiento del Bloque de Yucatán.....	14
• Fig. 1.4 Mapa geológico de la Península de Yucatán.....	16
• Fig. 1.5 Localización del cráter Chicxulub en la plataforma carbonatada de Yucatán.....	17
• Fig. 1.6 Localización del centro del cráter con respecto al Puerto Chicxulub, del cual toma su nombre.....	17
• Fig. 1.7 Localización de las secciones del Cretácico–Terciario donde se ha documentado la anomalía de iridio.....	19
• Fig. 1.8 Etapas de formación de un cráter de impacto simple.....	21
• Fig. 1.9 Etapas de formación de un cráter de impacto complejo.....	22
• Fig. 1.10 Modelos estructurales propuestos del cráter Chicxulub.....	24
• Fig. 2.1 Síntesis de los programas de perforación en la Plataforma de Yucatán y la parte terrestre del cráter Chicxulub.....	28
• Fig. 2.2 Mapa de ubicación de los pozos propuestos para el programa de perforación marina: Chicx–03A y Chicx–04A.....	29
• Fig. 2.3 Ejemplos de registros geofísicos de pozos representando diversas propiedades petrofísicas a profundidad.....	33
• Fig. 2.4 Mapa del sitio de la Expedición 364 IODP.....	36
• Fig. 2.5 Localización del pozo Chicx–03A en un mapa de baja gravedad en el sector central marino del cráter.....	38
• Fig. 2.6 Ubicación del pozo Chicx–03A en un mapa de anomalías de Bouguer.....	38
• Fig. 3.1 Registros geofísicos del pozo Chicx–03A.....	40
• Fig. 3.2 Registros de resistividad.....	42

• Fig. 3.3 Registro de velocidad de onda P (V_p).....	43
• Fig. 3.4 Registro de conductividad eléctrica (σ).....	44
• Fig. 3.5 Registro de susceptibilidad magnética (χ).....	45
• Fig. 3.6 Registro de rayos gamma (RG).....	46
• Fig. 3.7 Registros de (g) uranio (U), (h) potasio (K) e (i) torio (Th).....	47
• Fig. 3.8 Análisis cualitativo del registro de resistividad somera (R_{xo}).....	48
• Fig. 3.9 Análisis cualitativo del registro de resistividad profunda (R_t).....	49
• Fig. 3.10 Análisis cualitativo del registro de velocidad de onda P (V_p).....	50
• Fig. 3.11 Análisis cualitativo del registro de conductividad eléctrica (σ).....	51
• Fig. 3.12 Análisis cualitativo del registro de susceptibilidad magnética (χ).....	52
• Fig. 3.13 Análisis cualitativo del registro de rayos gamma (RG).....	53
• Fig. 3.14 Análisis cualitativo del registro de uranio (U).....	54
• Fig. 3.15 Análisis cualitativo del registro de potasio (K).....	55
• Fig. 3.16 Análisis cualitativo del registro de torio (Th).....	56
• Fig. 4.1 Interpretación petrofísica del registro de resistividad somera (R_{xo}).....	58
• Fig. 4.2 Interpretación petrofísica del registro de resistividad profunda (R_t).....	60
• Fig. 4.3 Interpretación petrofísica del registro de velocidad de onda P (V_p).....	62
• Fig. 4.4 Interpretación petrofísica del registro de conductividad eléctrica (σ).....	64
• Fig. 4.5 Perfil de anti-correlación de los registros de velocidad de onda P (V_p) y conductividad eléctrica (σ).....	65
• Fig. 4.6 Interpretación petrofísica del registro de susceptibilidad magnética (χ).....	66
• Fig. 4.7 Interpretación petrofísica del registro de rayos gamma (RG).....	68

- Fig. 4.8 Interpretación petrofísica del registro de uranio (U).....70
- Fig. 4.9 Interpretación petrofísica del registro de potasio (K).....71
- Fig. 4.10 Interpretación petrofísica del registro de torio (Th).....72
- Tabla 1. Síntesis de la clasificación de los registros para integrar los datos del pozo.....73
- Fig. 4.11 Integración de los registros de resistividad (Rxo, Rt) y velocidad de onda P (Vp).....74
- Fig. 4.12 Integración de los registros de rayos gamma (RG) y susceptibilidad magnética (χ).....76
- Tabla 2. Unidades litológicas del pozo Chicx–03A.....78
- Fig. 4.13 Integración final del conjunto de los registros seleccionados.....79
- Fig. 4.14 Modelo petrofísico del pozo Chicx–03A.....81

APÉNDICE I. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE YUCATÁN

COLUMNA GEOLOGICA				PENINSULA DE YUCATAN		
ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	NOMBRES FORMACIONALES		
C E N O Z O I C O	QUATERNARIO	HOLOCENO		VERCILIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL	
		PLEISTOCENO		CALABRIANO		
	T E R C I A R I O	MIOCENO	SUPERIOR	PLAISANCIANO	BACALAR ESTERO FRANCO CARRILLO PUERTO	
				INFERIOR		ZANCLEANO
			MEDIO	SUPERIOR		MESSINIANO TORTONIANO
				MEDIO		SERRAVALIANO LONGHIENIANO
				INFERIOR		BURDIGALIANO AQUITANIANO
				INFERIOR		CHATTIANO
		OLIGOCENO	SUPERIOR	RUPELIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL	
			MEDIO			
			INFERIOR			
		EOCENO	SUPERIOR	PRIABONIANO	CHICHEN ITZA	
			MEDIO	BARTONIANO LUTETIANO		
			INFERIOR	YPRESIANO		
	PALEOCENO	SUPERIOR	THANETIANO	ICAICHE		
		MEDIO				
		INFERIOR	DANIANO			
	M E S O Z O I C O	CRETACICO	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO	COBAN	
				CAMPANIANO		
SANTONIANO CONIACIANO TURONIANO						
MEDIO			CENOMANIANO			
			ALBIANO			
INFERIOR			APTIANO			
		BARREMIANO				
		HAUTERVIANO				
		VALANGINIANO				
		BERRIASIANO				
JURASICO		SUPERIOR	TITHONIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL		
		MEDIO	KIMMERIDGIANO OXFORDIANO			
			CALLOVIANO BATHONIANO BAJUCIANO ALESIANO TOARCIANO			
INFERIOR	PLIENSCHACHIANO SINEMURIANO HELINGIANO	LECHOS ROJOS				
TRIASICO						
PALEOZ	PERMICO		BASAMENTO ?			
	CARBONIFERO					
	DEVONICO					

Fuente: PEMEX, 2013.

APÉNDICE II. ESTADÍSTICAS, HISTOGRAMAS Y GRÁFICAS DE DISPERSIÓN

II.1 Estadística descriptiva de las unidades litológicas de los registros geofísicos del pozo Chicx–03A:

Unidades del registro de resistividad somera (Rxo):

Estadística descriptiva	Rxo _{U1}	Rxo _{U2}	Rxo _{U3}
Media	3.96481203	1.98165081	2.82033549
Error típico	0.00679591	0.01072719	0.02653027
Mediana	3.91076374	1.96112979	2.62234271
Moda	1.79613996	0.851318	0.29824999
Desviación estándar	1.54076825	0.93640439	1.68754193
Varianza de la muestra	2.3739668	0.87685318	2.84779776
Curtosis	0.06867532	-0.15424198	0.54744941
Coefficiente de asimetría	0.28213935	0.37249724	0.73541955
Rango	9.99181612	4.98305441	8.20947957
Mínimo	0.00091784	0.0023806	0.0696075
Máximo	9.99273396	4.98543501	8.27908707
Suma	203799.268	15100.1792	11411.0774
Cuenta	51402	7620	4046

Unidades del registro de velocidad de onda P (Vp):

Estadística descriptiva	Vp _{U1}	Vp _{U2}	Vp _{U3}
Media	2882.93017	2916.49594	4078.23315
Error típico	4.64226754	1.6801073	1.49810408
Mediana	2759.44995	2917.08337	4095.25684
Moda	3846.1499	2956.18994	4137.14014
Desviación estándar	489.643705	151.787258	376.721796
Varianza de la muestra	239750.958	23039.3716	141919.312
Curtosis	0.75140729	-0.50923269	0.43729306
Coefficiente de asimetría	0.83119139	-0.01659997	-0.31458956
Rango	3480.20654	884.975586	2386.00171
Mínimo	1445.97754	2499.1333	2613.71997
Máximo	4926.18408	3384.10889	4999.72168
Suma	32072598.2	23804439.9	257887073
Cuenta	11125	8162	63235

Unidades del registro de rayos gamma (RG):

Estadística descriptiva	RG _{U1}	RG _{U2}	RG _{U3}
Media	89.8158194	48.1232619	216.504348
Error típico	0.19775361	0.10813247	0.17057481
Mediana	87.6175461	39.9957256	226.388275
Moda	60.687899	66.094429	287.723023
Desviación estándar	32.4659393	22.9536479	42.183051
Varianza de la muestra	1054.03721	526.869952	1779.40979
Curtosis	1.98402748	0.52142864	3.71669479
Coefficiente de asimetría	0.5712939	1.02523512	-1.63483712
Rango	263.982758	159.896351	298.628829
Mínimo	0	1.82297838	1.36726523
Máximo	263.982758	161.71933	299.996094
Suma	2420805.78	2168434.18	13240756.4
Cuenta	26953	45060	61157

Unidades del registro de contenido de uranio (U):

Estadística descriptiva	U _{U1}	U _{U2}	U _{U3}
Media	0.14975428	0.07861468	0.27029272
Error típico	0.00096168	0.0004427	0.00094302
Mediana	0.11363338	0.04723781	0.23272122
Moda	0	0	0
Desviación estándar	0.15788299	0.09397246	0.23320548
Varianza de la muestra	0.02492704	0.00883082	0.0543848
Curtosis	2.1037585	2.82433729	0.34623575
Coefficiente de asimetría	1.3232056	1.50148724	0.81271284
Rango	1.19418001	0.80749834	1.65422249
Mínimo	0	0	0
Máximo	1.19418001	0.80749834	1.65422249
Suma	4036.32702	3542.37766	16530.0217
Cuenta	26953	45060	61156

Unidades del registro de contenido de potasio (K):

Estadística descriptiva	K _{U1}	K _{U2}	K _{U3}
Media	0.52224715	0.14046583	0.55445342
Error típico	0.00221685	0.00067203	0.00121382
Mediana	0.46398333	0.11192861	0.52860934
Moda	0	0	0
Desviación estándar	0.36394822	0.14265472	0.30017544
Varianza de la muestra	0.1324583	0.02035037	0.09010529
Curtosis	1.19786363	5.99460125	1.92918826
Coefficiente de asimetría	0.97523133	1.81741445	0.84107635
Rango	2.69509912	1.25138113	2.63856578
Mínimo	0	0	0
Máximo	2.69509912	1.25138113	2.63856578
Suma	14076.1275	6329.39029	33908.1535
Cuenta	26953	45060	61156

Unidades del registro de contenido de torio (Th):

Estadística descriptiva	Th _{U1}
Media	-999.12434
Error típico	0.00256322
Mediana	-999.124329
Moda	N/A
Desviación estándar	0.0720442
Varianza de la muestra	0.00519037
Curtosis	-1.20035825
Coefficiente de asimetría	-0.00027409
Rango	0.2486573
Mínimo	-999.248901
Máximo	-999.000244
Suma	-789308.229
Cuenta	790

Unidades del registro de conductividad eléctrica (σ):

Estadística descriptiva	σ_{U1}	σ_{U2}	σ_{U3}	σ_{U4}
Media	769.831807	1163.77966	601.086397	261.197962
Error típico	1.15658485	1.21142906	1.20087376	0.47720886
Mediana	734.586456	1163.79968	620.775086	232.025482
Moda	1150.67114	1240.06958	1101.62805	7.84376001
Desviación estándar	171.440054	176.810552	210.317534	114.224504
Varianza de la muestra	29391.6922	31261.9711	44233.4651	13047.2373
Curtosis	-0.42356565	-0.39039564	-0.27259932	35.5684122
Coefficiente de asimetría	0.60140156	-0.2871388	0.05715491	3.80137159
Rango	968.001752	991.27925	1117.63318	2633.13158
Mínimo	242.3763	558.912156	175.906006	7.84376001
Máximo	1210.37805	1550.19141	1293.53919	2640.97534
Suma	16914744.5	24790834.2	18437123.1	14964814.8
Cuenta	21972	21302	30673	57293

Unidades del registro de conductividad eléctrica (σ):

Estadística descriptiva	χ_{U1}	χ_{U2}	χ_{U3}	χ_{U4}	χ_{U5}	χ_{U6}
Media	0.48871253	13.9428659	3.4410019	4.81499737	2.77624705	9.70077047
Error típico	0.00181124	0.10238215	0.02902922	0.04182938	0.0089728	0.07028495
Mediana	0.37773417	14.007432	2.96575379	3.7739749	2.54453373	7.44140863
Moda	0.32942301	24.6835136	2.63176942	24.0297279	3.52515602	24.8591213
Desviación estándar	0.47420471	6.50428883	2.89914583	4.02932207	1.49318348	7.62907396
Varianza de la muestra	0.2248701	42.3057732	8.40504654	16.2354364	2.2295969	58.2027695
Curtosis	10.9605853	-0.89697674	24.1481976	4.63873428	1.78583299	-1.25008154
Coefficiente de asimetría	3.34062072	-0.27795683	4.81041428	2.10410183	1.00080321	0.44761816
Rango	4.85142194	24.4858448	21.0426106	24.7794999	11.5717974	24.5634162
Mínimo	0.03479756	0.47513655	0.70753628	0.01751799	0.21286582	0.42527896
Máximo	4.8862195	24.9609814	21.7501469	24.7970179	11.7846632	24.9886952
Suma	33499.289	56273.4068	34320.553	44678.3606	76882.6094	114294.478
Cuenta	68546	4036	9974	9279	27693	11782

Unidades del registro de resistividad profunda (Rt):

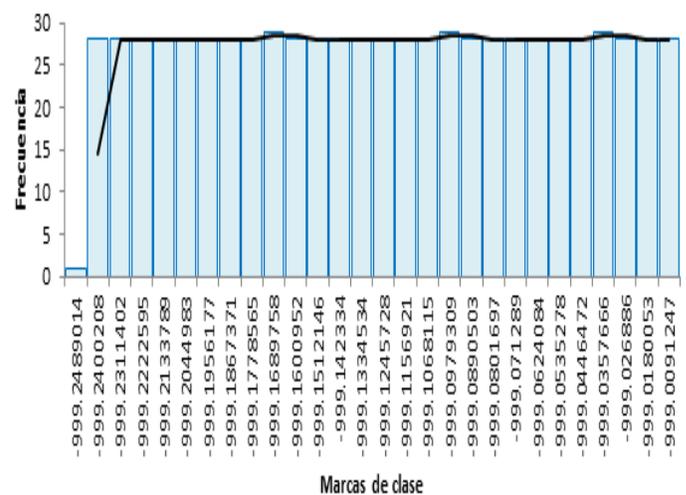
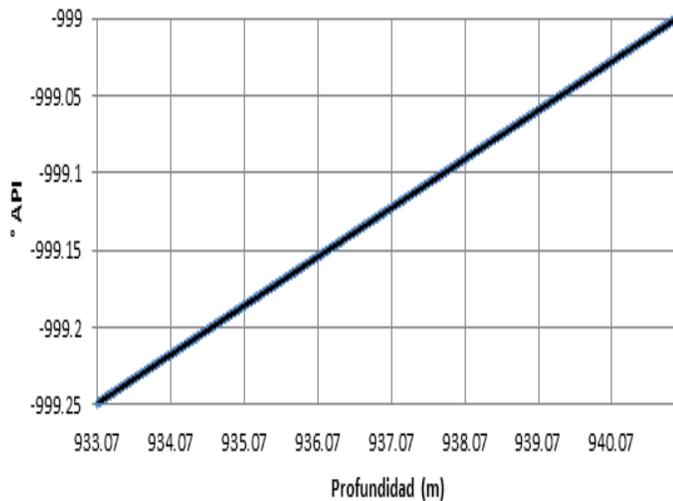
Estadística descriptiva	Rt _{U1}	Rt _{U2}	Rt _{U3}	Rt _{U4}	Rt _{U5}	Rt _{U6}
Media	0.72857833	1.83846541	0.14906708	3.98410588	2.01148727	2.81977728
Error típico	0.00606374	0.01280293	0.00064167	0.0068222	0.01064227	0.02653095
Mediana	0.49182519	1.09357908	0.14906624	3.93523121	1.99399304	2.62192917
Moda	0.367383	0.22911599	N/A	1.79613996	0.851318	0.29824999
Desviación estándar	0.88816762	1.94360188	0.08601011	1.54672914	0.92899171	1.68737693
Varianza de la muestra	0.78884171	3.77758827	0.00739774	2.39237104	0.8630256	2.84724092
Curtosis	12.8055373	2.41335885	-1.19998294	0.00824049	-0.14162493	0.5498973
Coefficiente de asimetría	3.36930252	1.64554737	1.3781E-05	0.26754332	0.32605176	0.73621742
Rango	7.12952568	9.86382549	0.29792653	9.80671915	5.07592083	8.20947957
Mínimo	0.0009744	0.00046223	0.00010292	0.1860148	0.0023806	0.0696075
Máximo	7.13050008	9.86428771	0.29802945	9.99273396	5.07830143	8.27908707
Suma	15630.9196	42369.2737	2678.28829	204791.01	15327.533	11405.9991
Cuenta	21454	23046	17967	51402	7620	4045

II.2 Histogramas y diagramas de dispersión de las unidades litológicas de los registros geofísicos del pozo Chicx-03A.

Unidad litológica del registro de contenido de torio (Th):

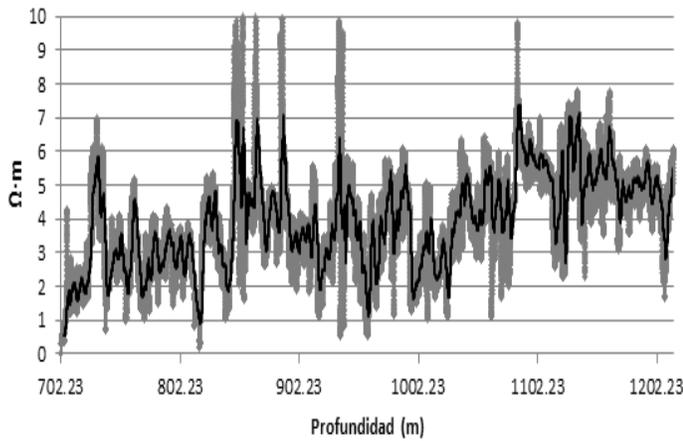
Th_{U1}

Histograma de Th_{U1}

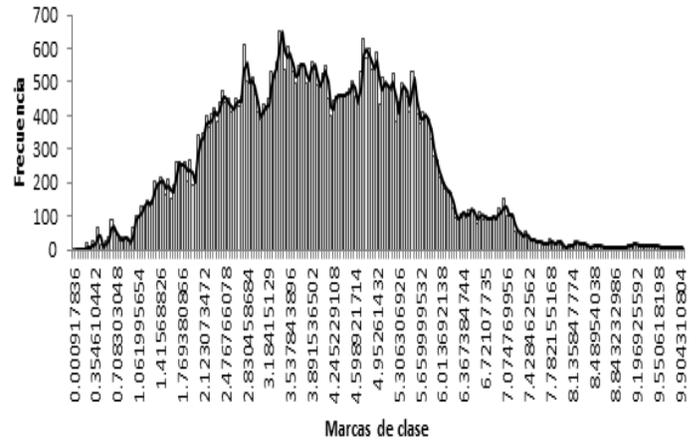


Unidades litológicas del registro de resistividad somera (Rxo):

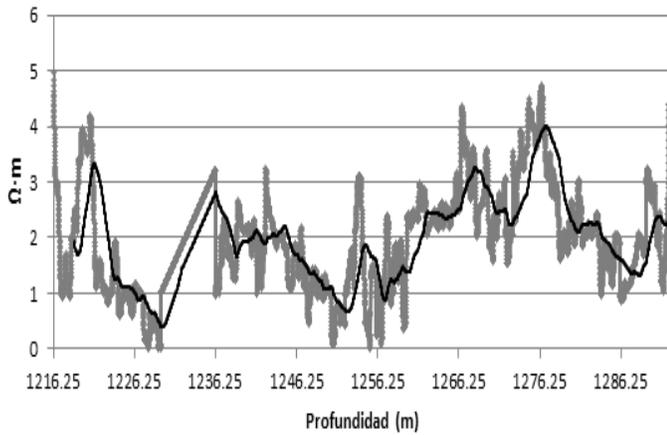
Rxou1



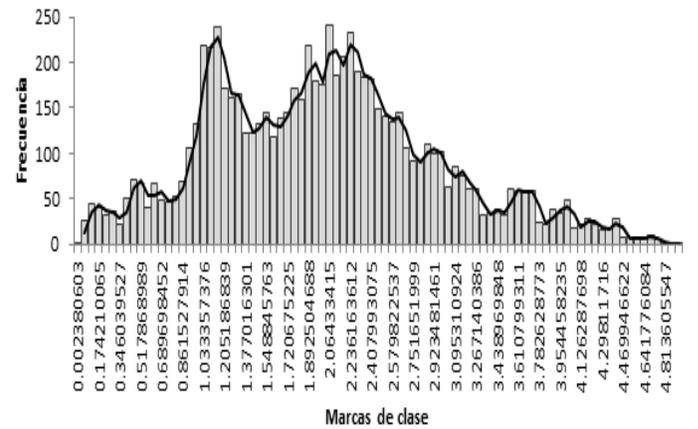
Histograma de Rxou1



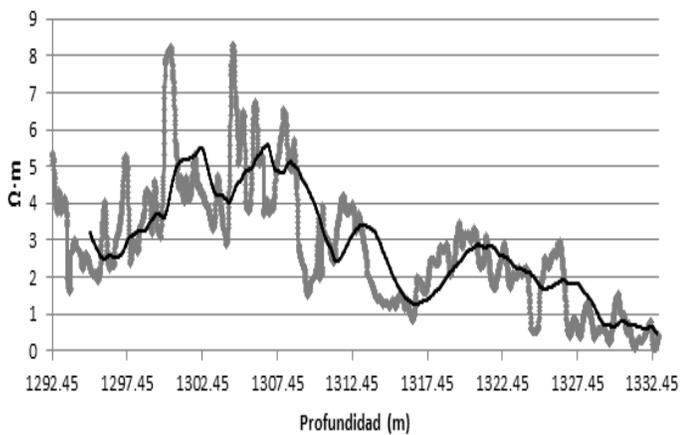
Rxou2



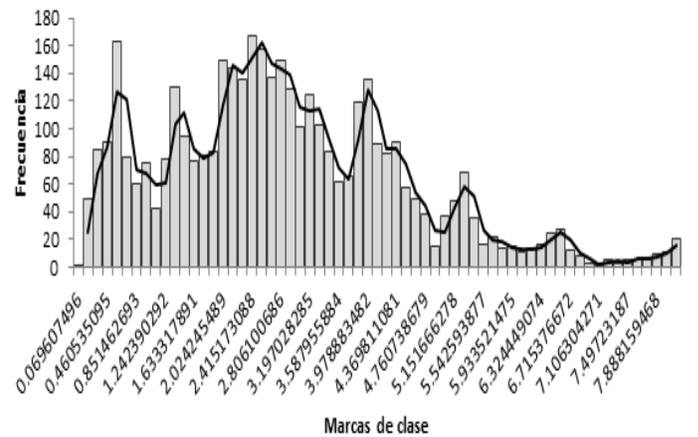
Histograma de Rxou2



Rxou3

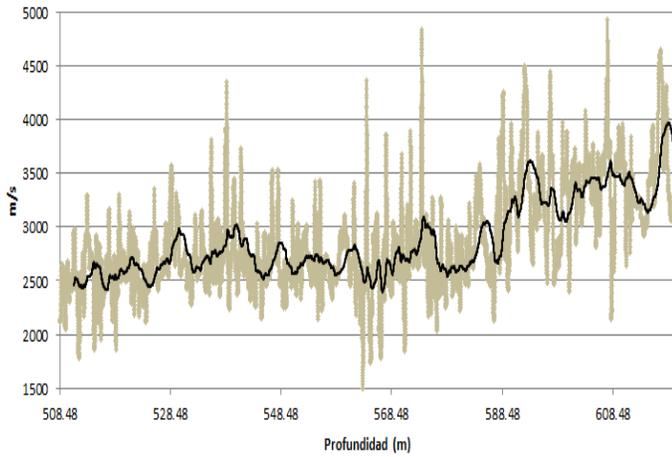


Histograma de Rxou3

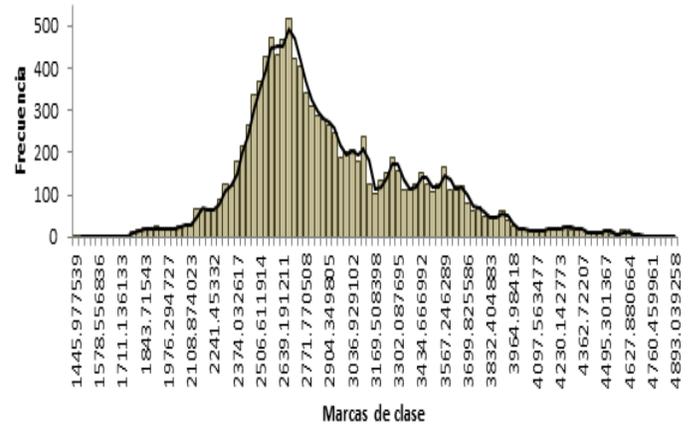


Unidades litológicas del registro de velocidad de onda P (Vp):

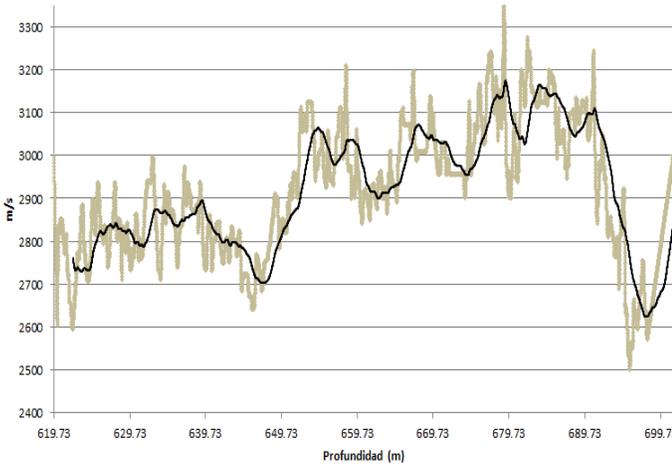
VpU1



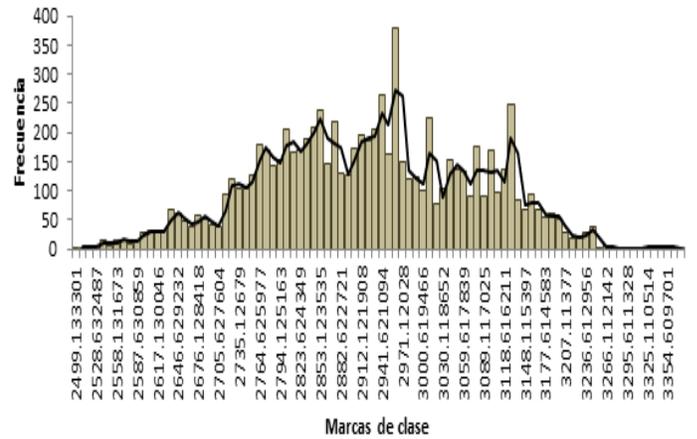
Histograma de VpU1



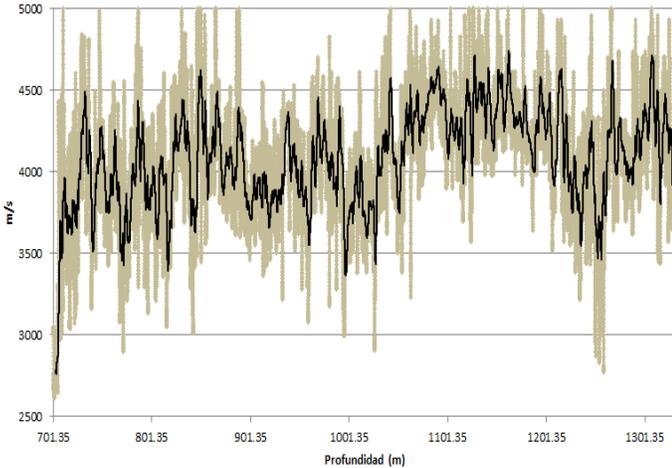
VpU2



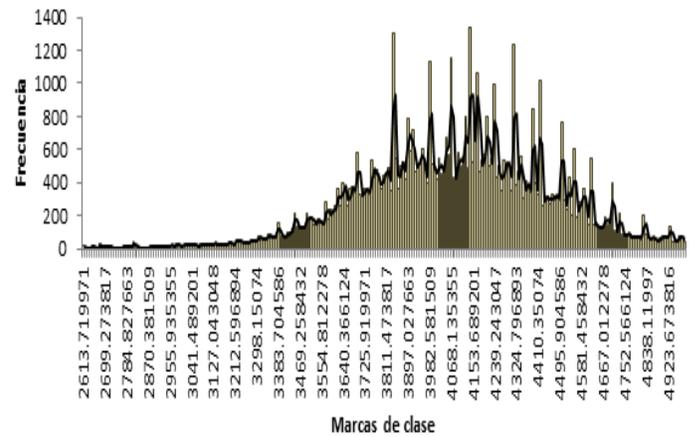
Histograma de VpU2



VpU3

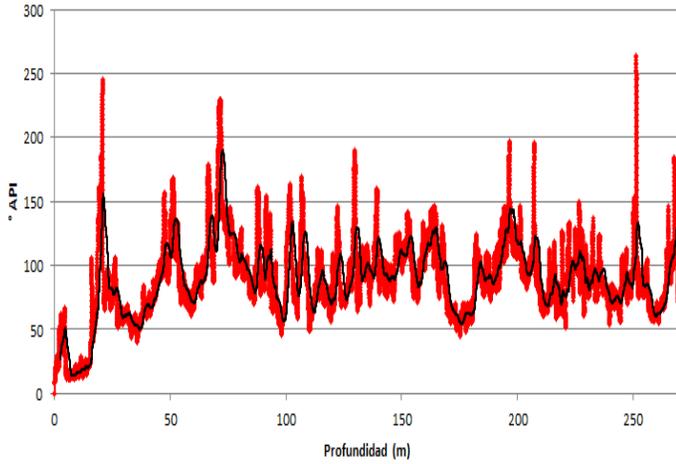


Histograma de VpU3

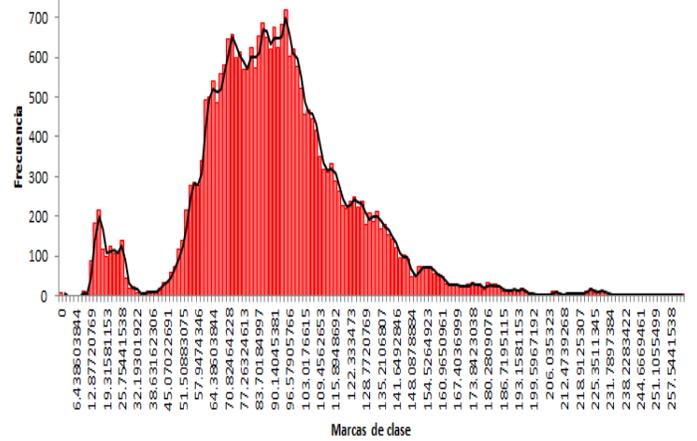


Unidades litológicas del registro de rayos gamma (RG):

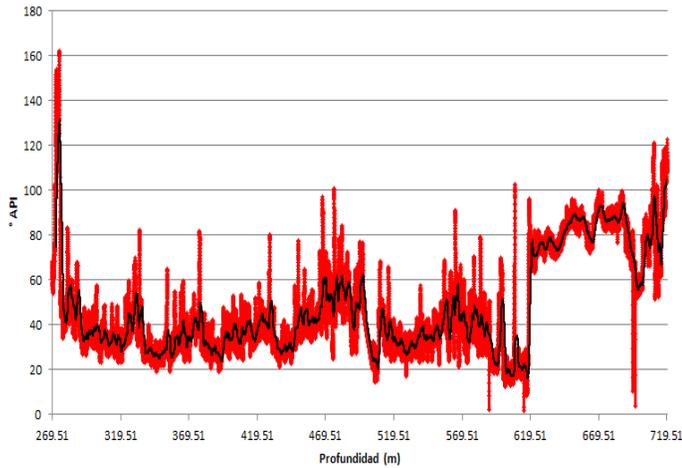
RGU1



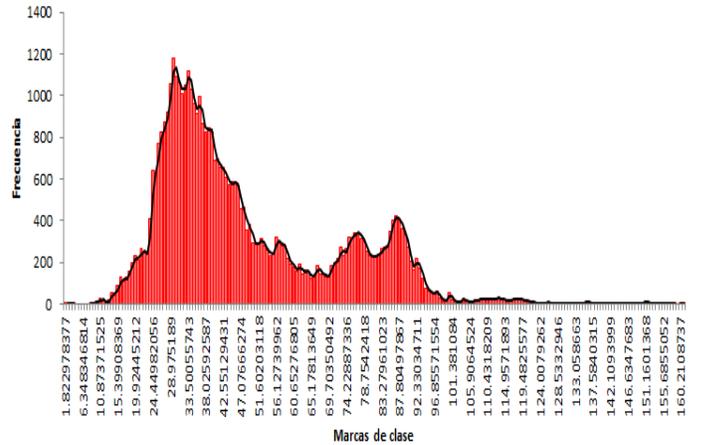
Histograma de RGU1



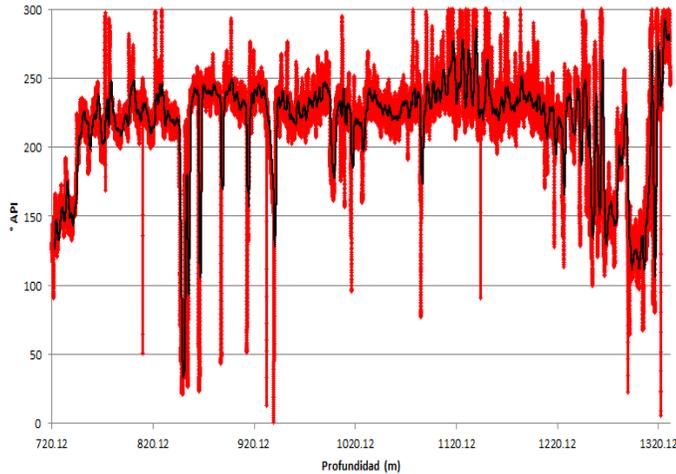
RGU2



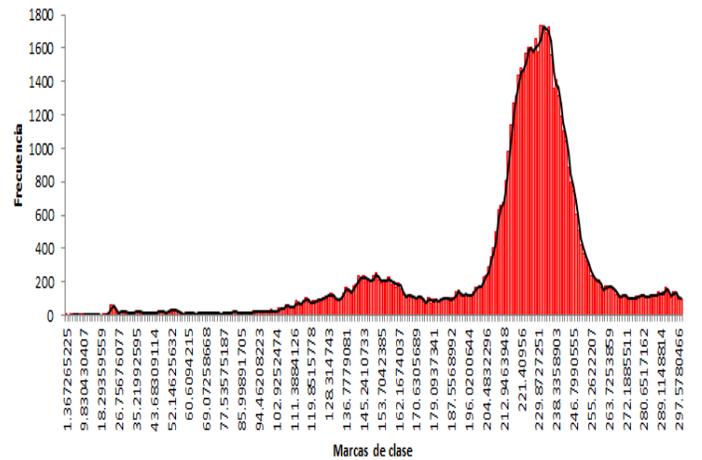
Histograma de RGU2



RGU3

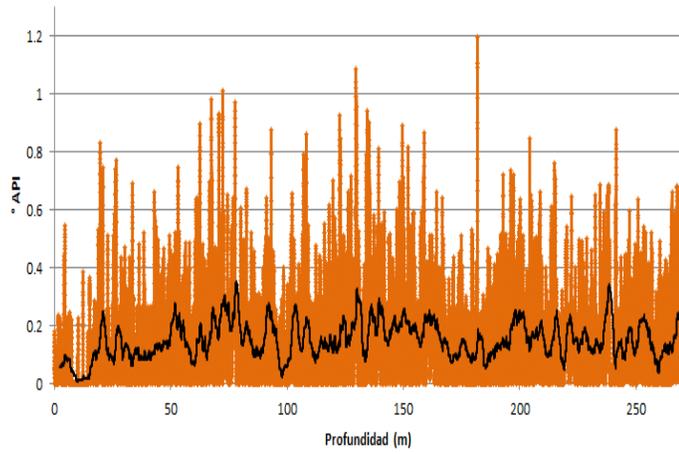


Histograma de RGU3

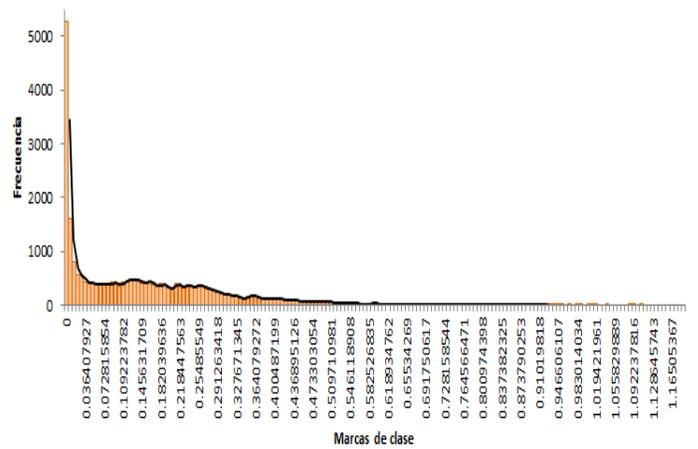


Unidades litológicas del registro de contenido de uranio (U):

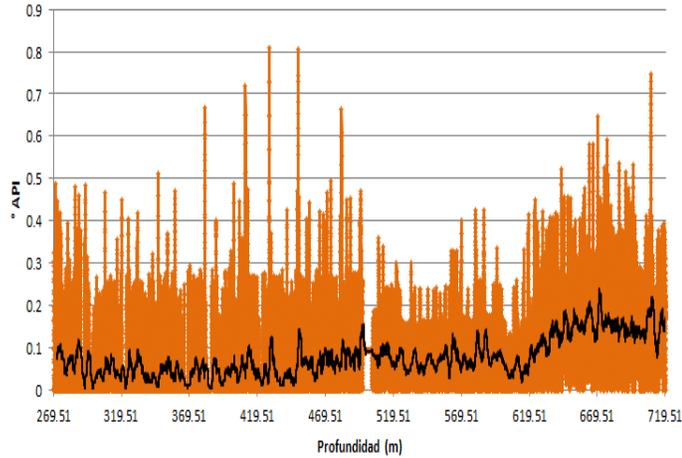
U_{U1}



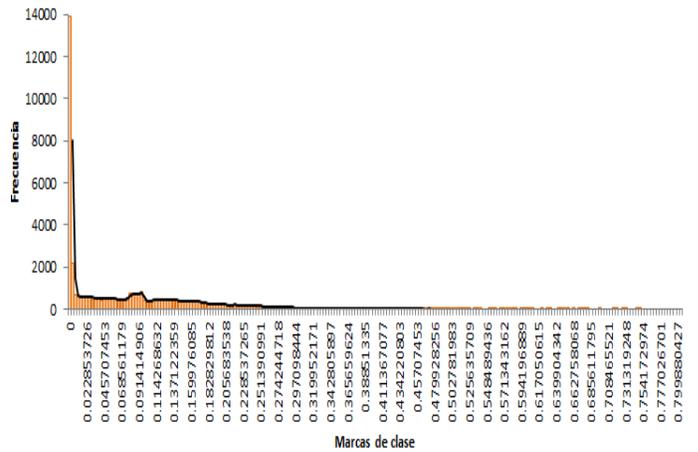
Histograma de U_{U1}



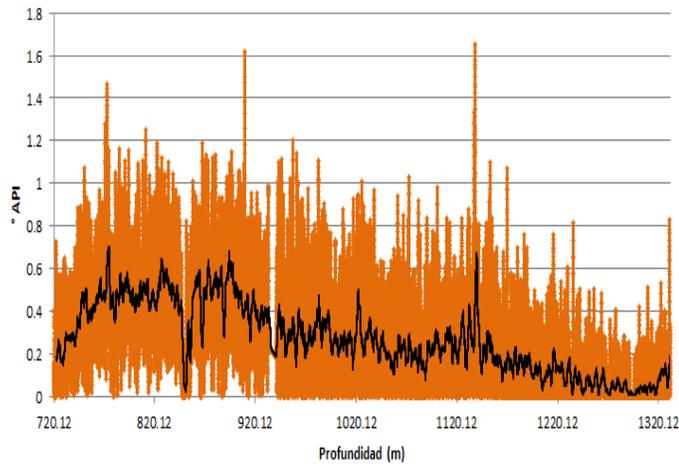
U_{U2}



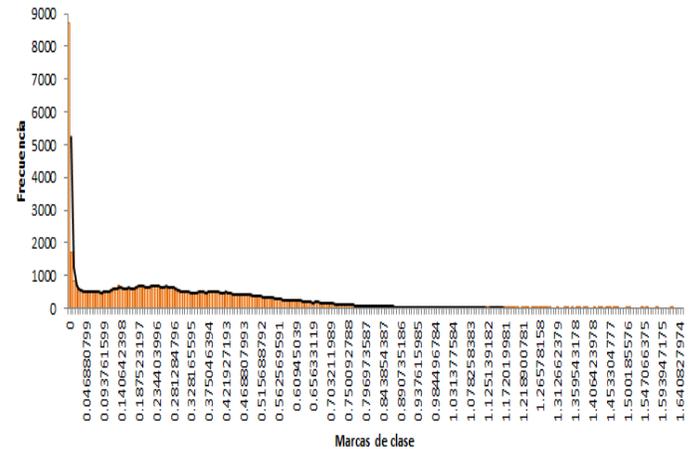
Histograma de U_{U2}



U_{U3}

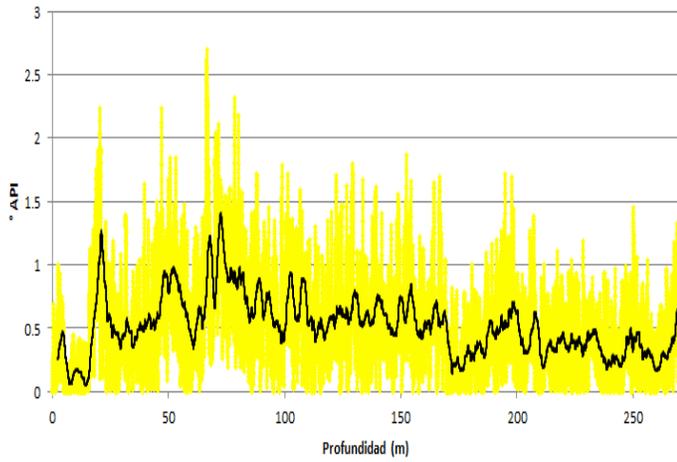


Histograma de U_{U3}

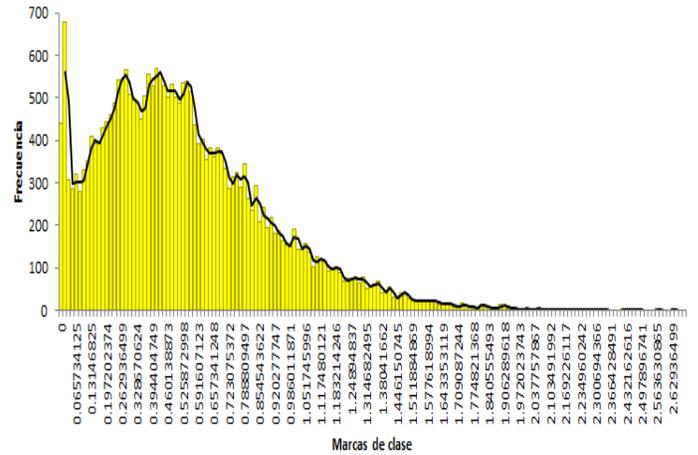


Unidades litológicas del registro de contenido de potasio (K):

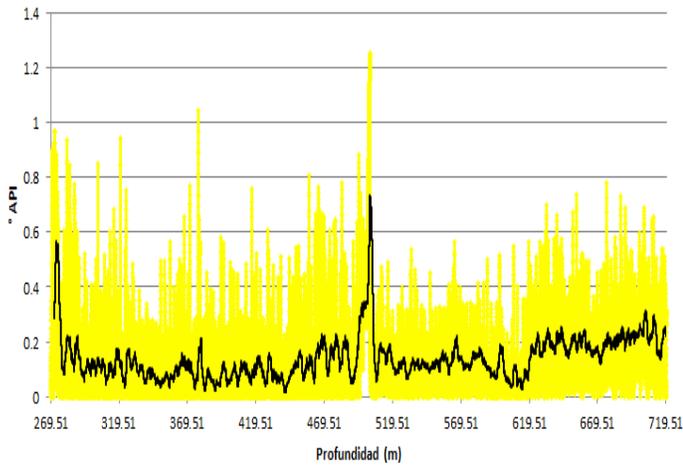
Ku1



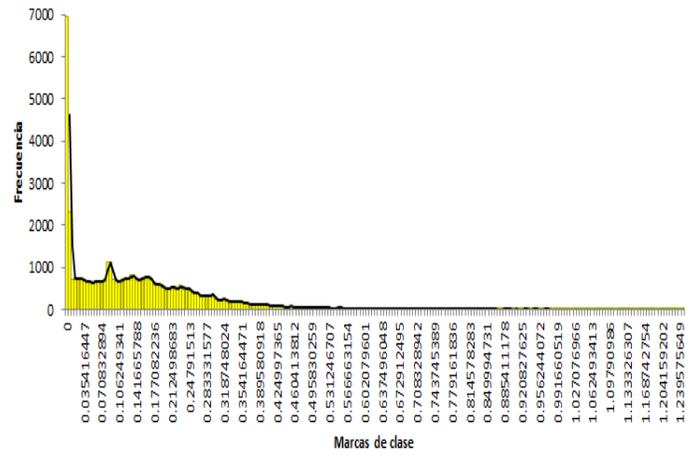
Histograma de Ku1



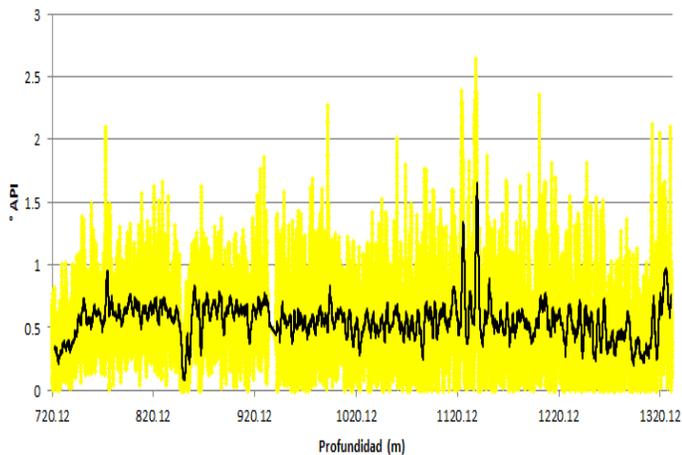
Ku2



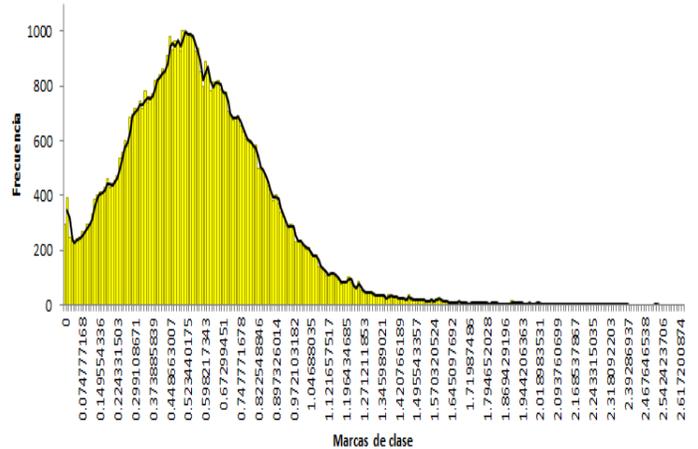
Histograma de Ku2



Ku3



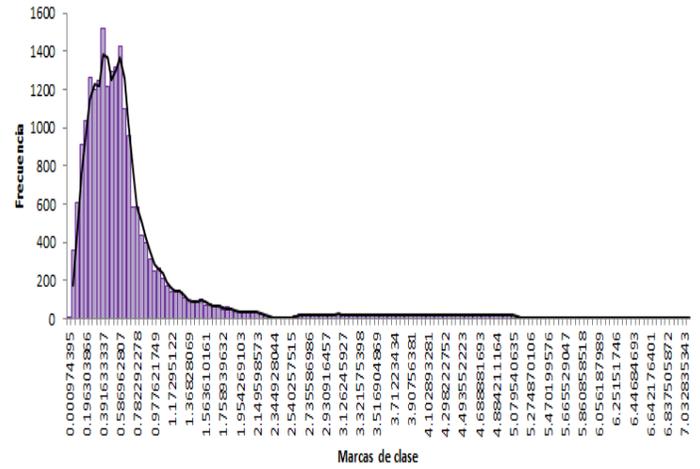
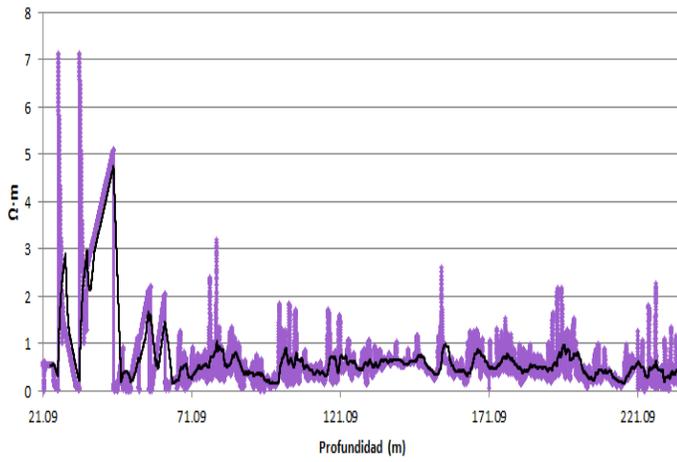
Histograma de Ku3



Unidades litológicas del registro de resistividad profunda (Rt):

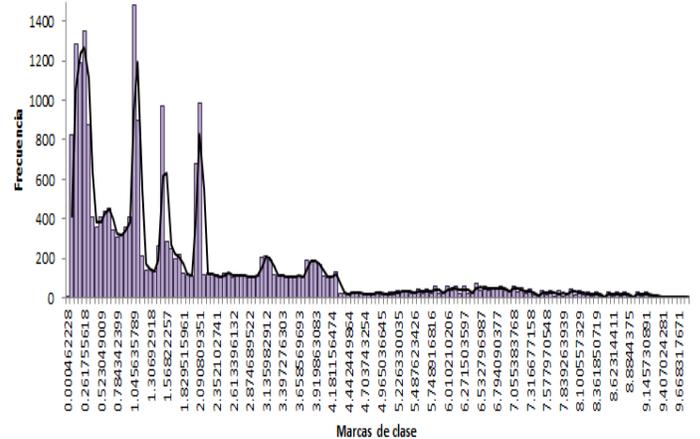
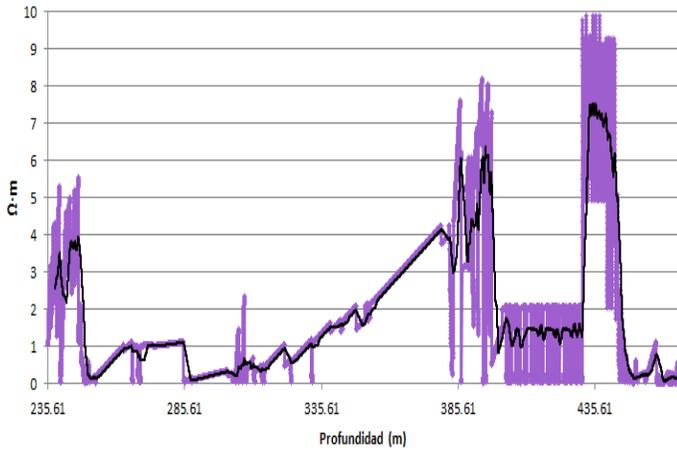
RtU1

Histograma de RtU1



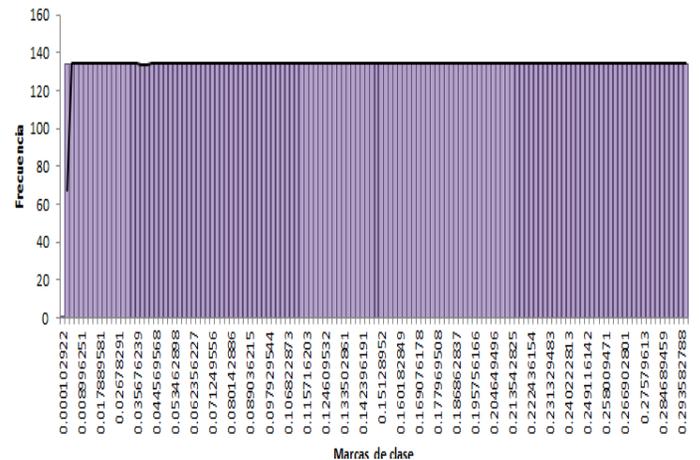
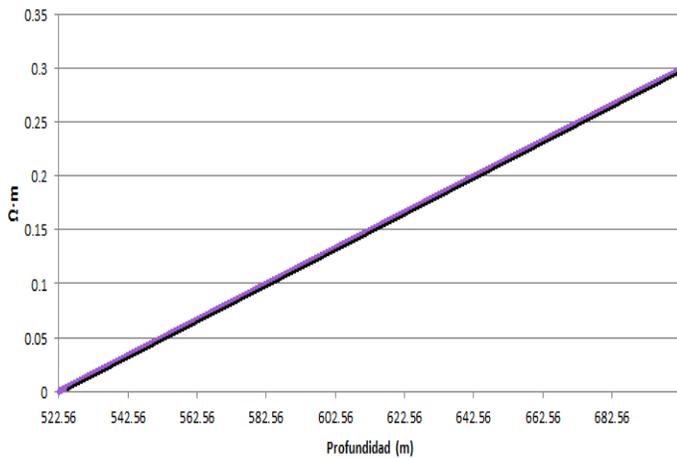
RtU2

Histograma de RtU2



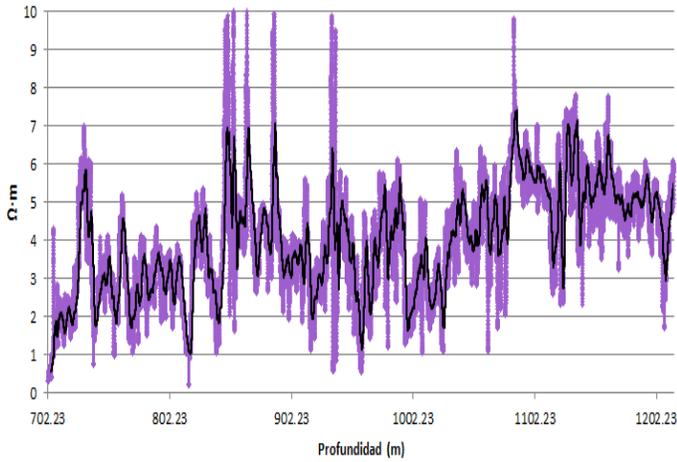
RtU3

Histograma de RtU3

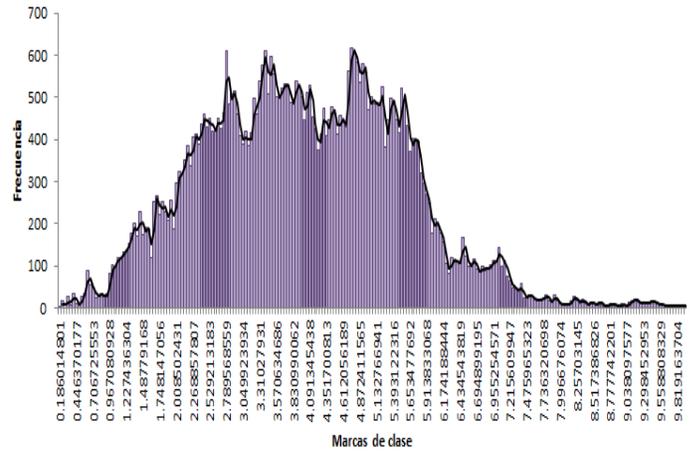


Unidades litológicas del registro de resistividad profunda (Rt):

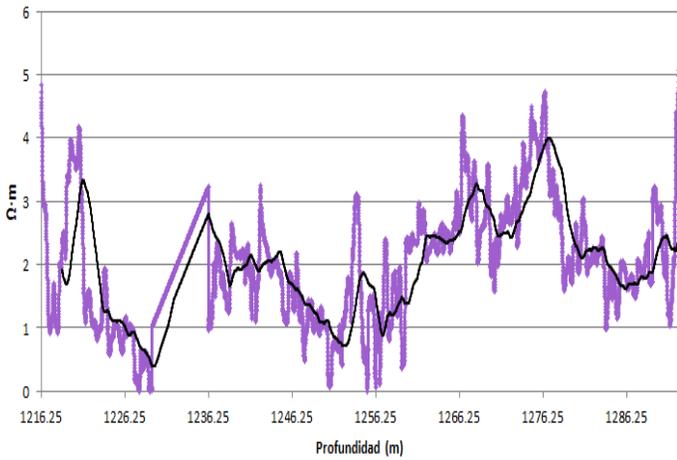
RtU4



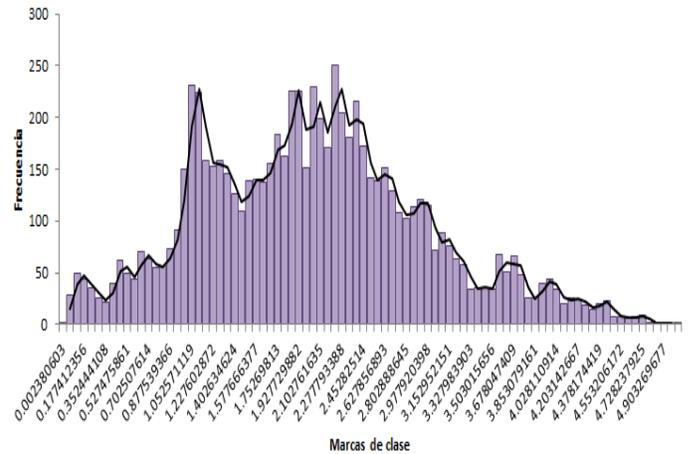
Histograma de RtU4



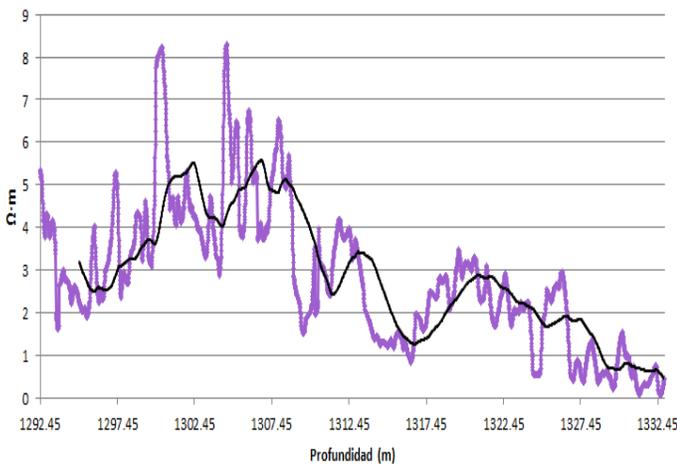
RtU5



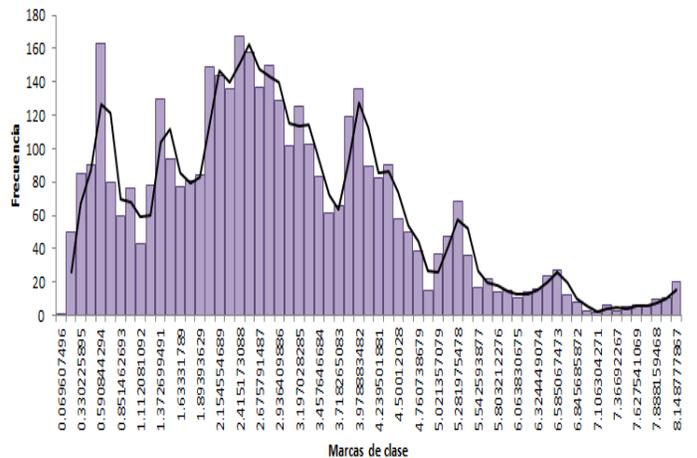
Histograma de RtU5



RtU6



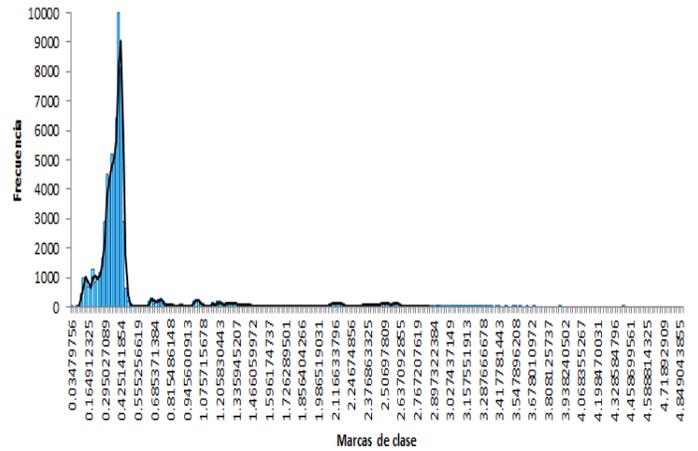
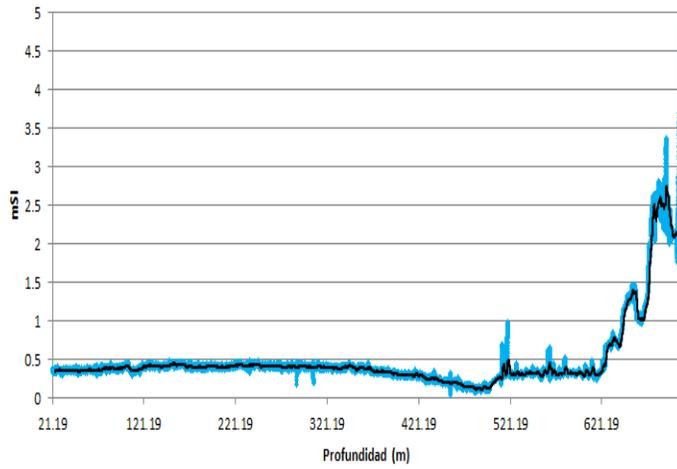
Histograma de RtU6



Unidades litológicas del registro de susceptibilidad magnética (χ):

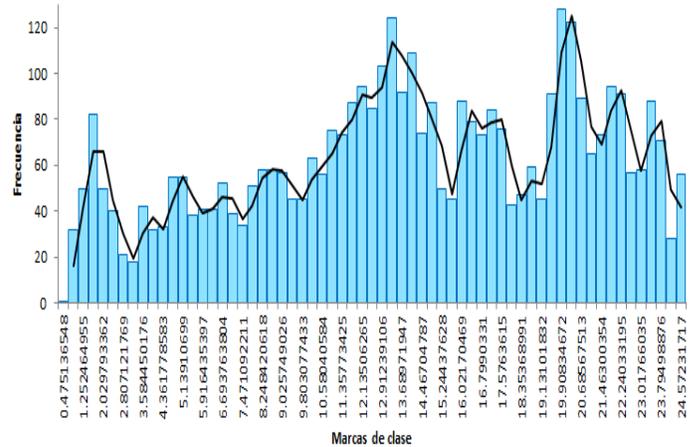
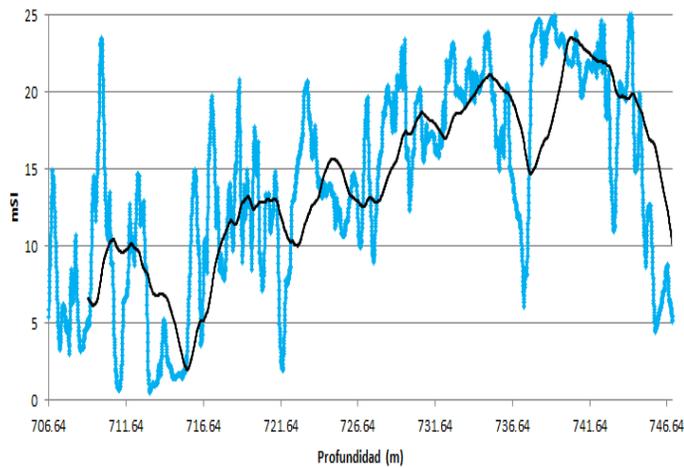
χ_{U1}

Histograma de χ_{U1}



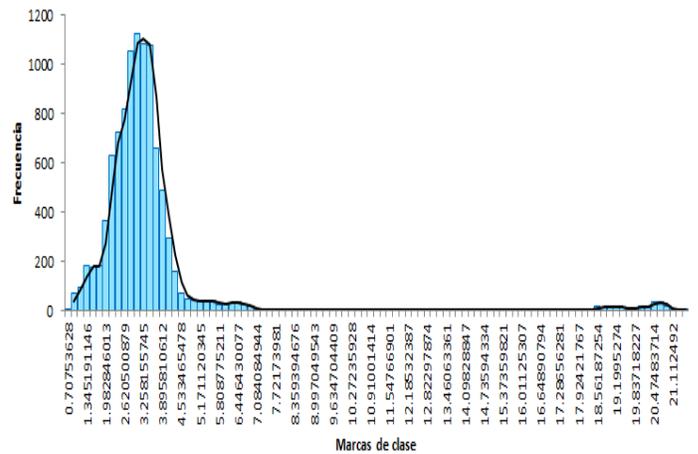
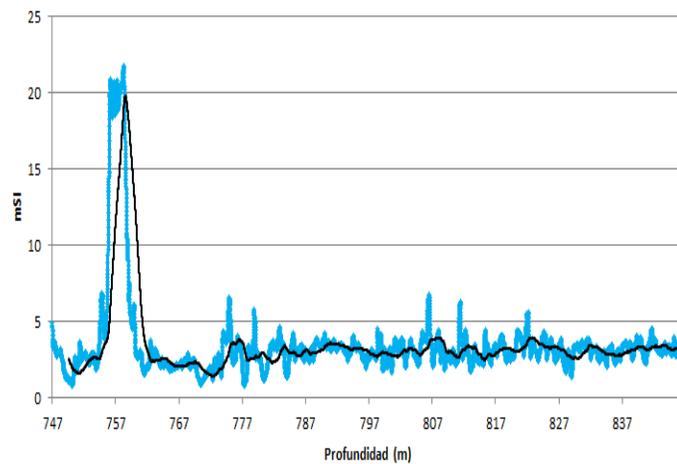
χ_{U2}

Histograma de χ_{U2}



χ_{U3}

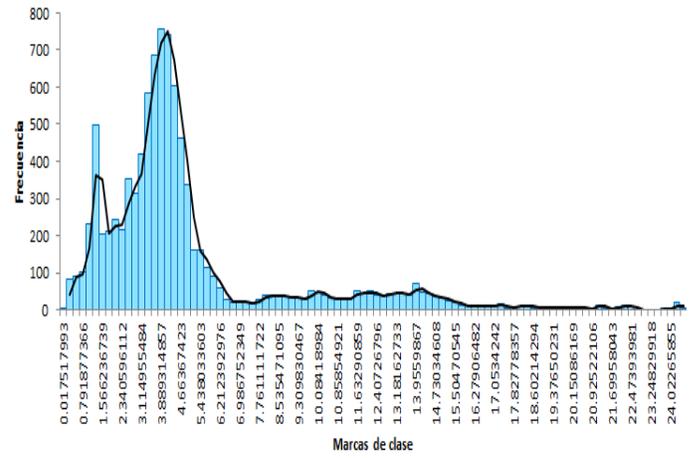
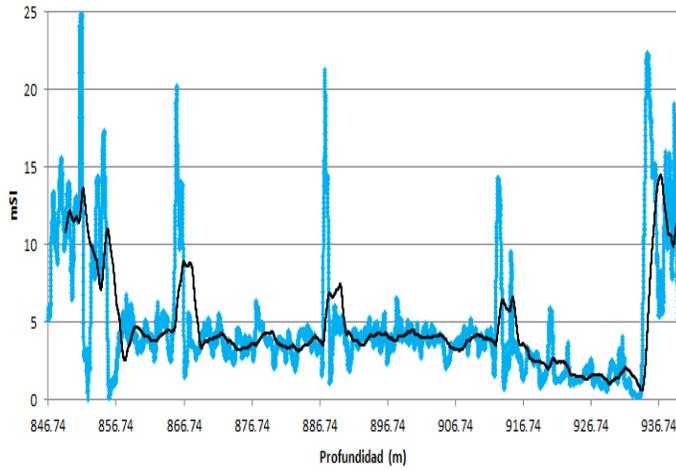
Histograma de χ_{U3}



Unidades litológicas del registro de susceptibilidad magnética (χ):

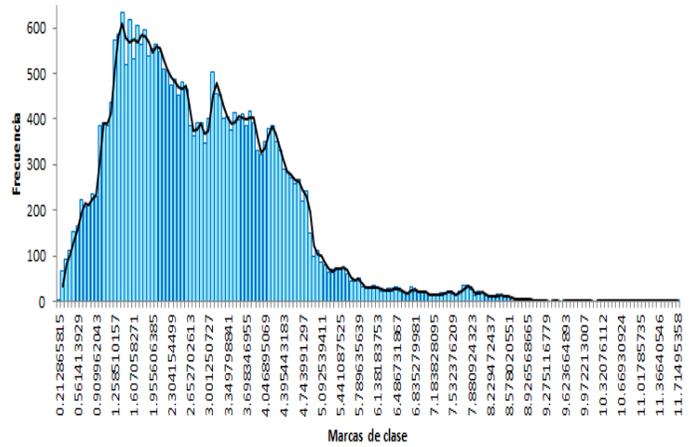
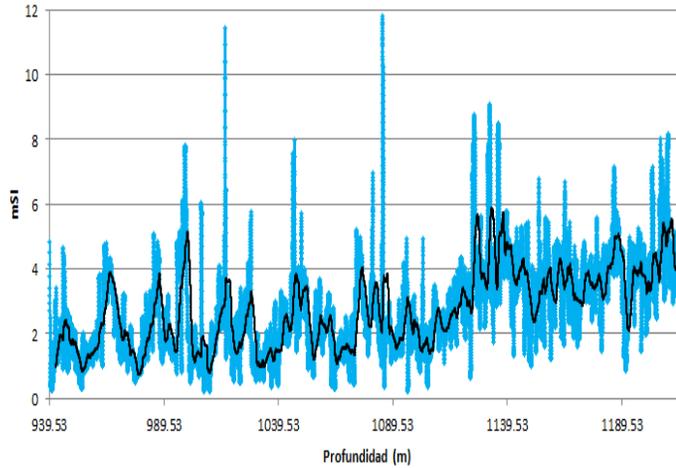
χ_{U4}

Histograma de χ_{U4}



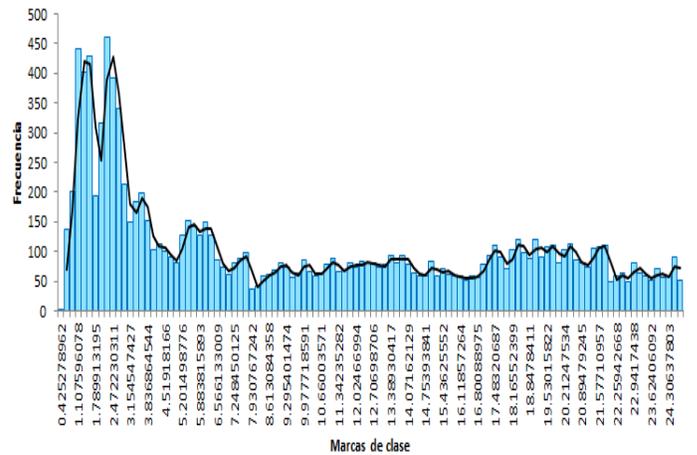
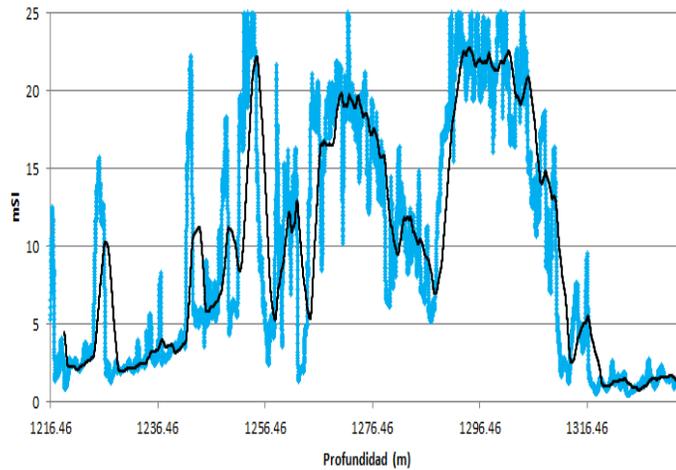
χ_{U5}

Histograma de χ_{U5}



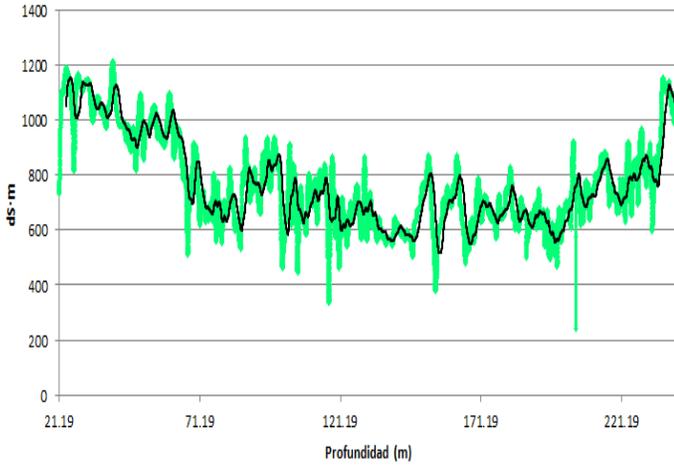
χ_{U6}

Histograma de χ_{U6}

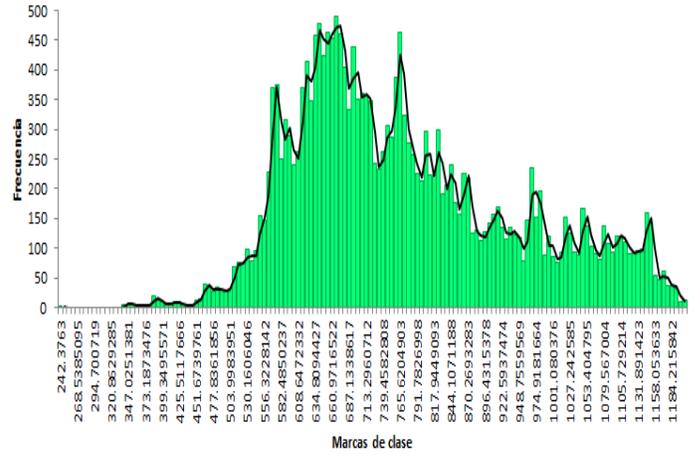


Unidades litológicas del registro de conductividad eléctrica (σ):

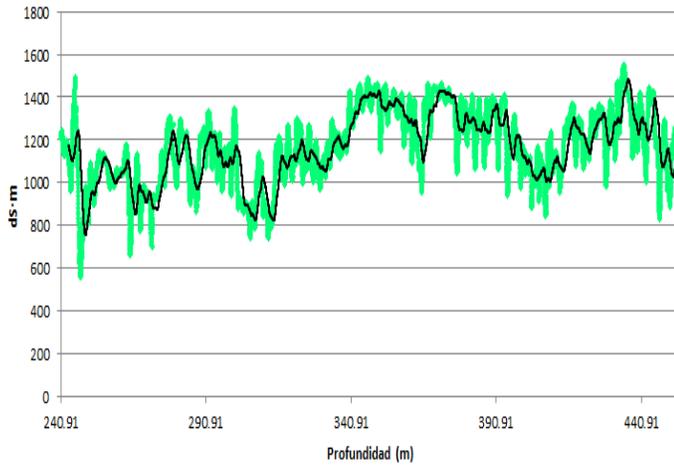
σ_{U1}



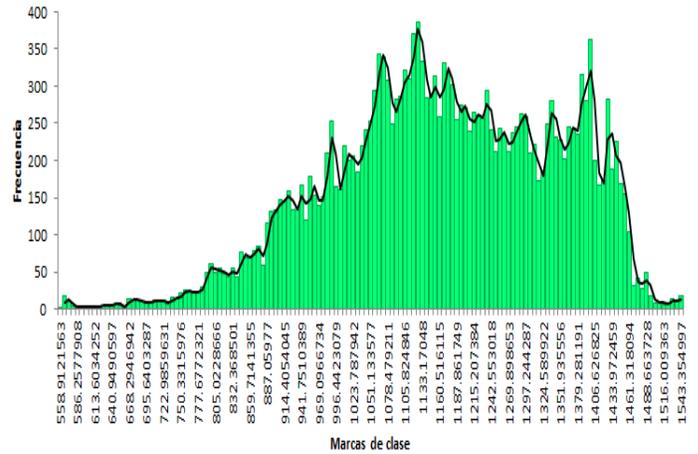
Histograma de σ_{U1}



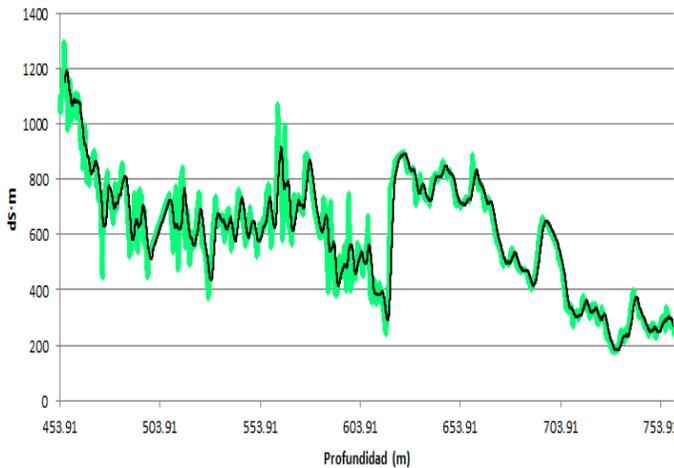
σ_{U2}



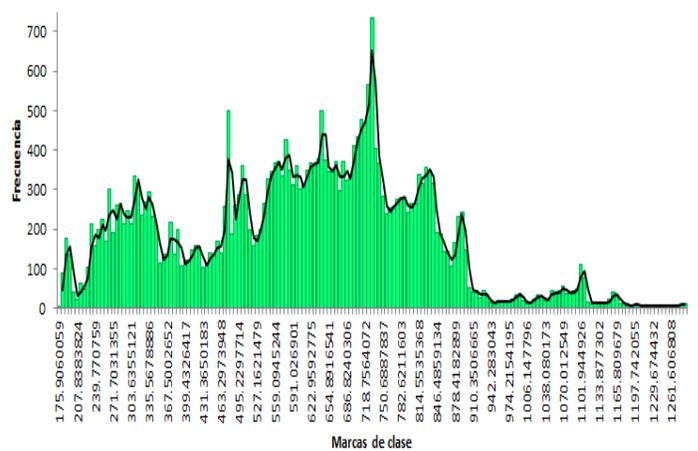
Histograma de σ_{U2}



σ_{U3}



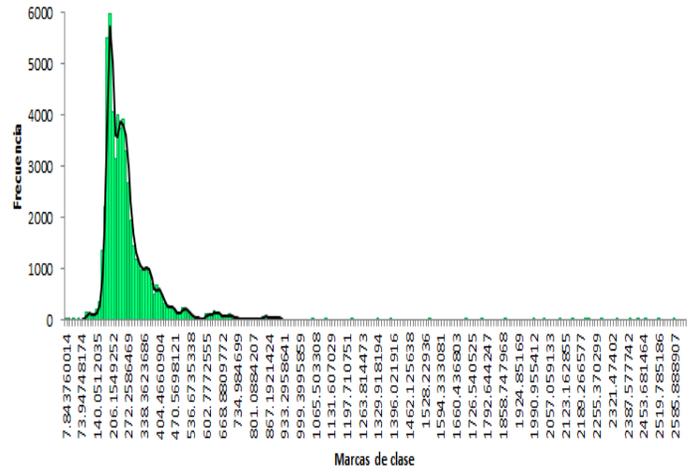
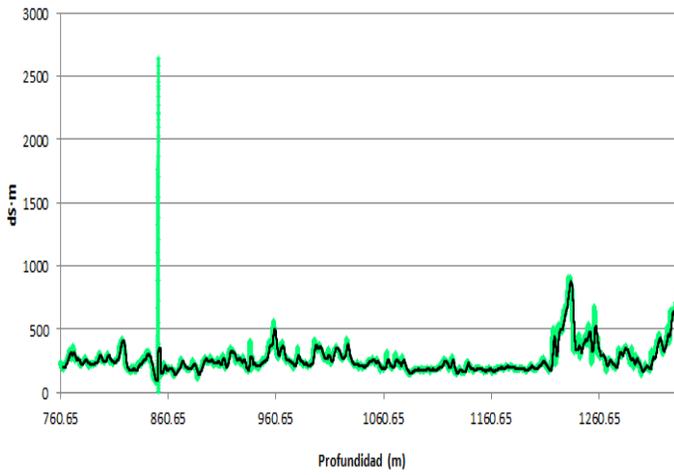
Histograma de σ_{U3}



Unidades litológicas del registro de conductividad eléctrica (σ):

σ_{U4}

Histograma de σ_{U4}



BIBLIOGRAFÍA

LIBROS.

- Alvarez, Walter, 1997. T-Rex and the Crater of Doom: Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 236 p.
- Bath, March, 1998. Introduction to Well Testing: Schlumberger Wireline & Testing, Phi Solutions, 309 p.
- Buryakovsky, L.; Chilingar, G.; Rieke, H.; 2012. Fundamentals of the petrophysics of oil and gas reservoirs: Scrivener Publishing, Wiley, 400 p.
- Darling, Toby, 2005. Well logging and formation evaluation: Elsevier Science, Oxford University Press, 335 p.
- Ellis, Darwin V.; Singer, Julian M., 2008. Well logging for earth scientists: Springer, N.Y., second edition, 697 p.
- Frankel, Charles, 1999. The end of the dinosaurs: Chicxulub crater and mass extinctions: Cambridge University Press, 223 p.
- Melosh, H. J., 1989. Impact cratering: A geologic process: N.Y., Oxford University Press, 245 p.
- Poveda, Arcadio, 2011. El cráter de Chicxulub y la extinción de los dinosaurios hace sesenta y cinco millones de años: Colegio Nacional, segunda edición, 200 p.

ARTÍCULOS.

- Aguayo Camargo, J. E., Marín Córdova, S., 1987. Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos postcretácicos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 48, n. 2, p. 15–39.
- Álvarez, L. W., Álvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V., 1982. Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction. Geol. Soc. Am., Special paper 190, 305–315.
- Álvarez, L. W., Álvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction. Science, 208, 1095–1108.
- Bahlburg, Heinrich, Weiss, Robert, Wünnemann, Kai, 2010. Low energy deposition in the Chicxulub crater during the impact to post-impact transition. Earth and Planetary Science Letters 295.1, p. 170–176.
- Barlow, N., Sharpton, V. y Kuzmin, R.O. 2007. Impact structures on Earth and Mars. M.G. Chapman (Ed.). The Geology of Mars. Evidence from Earth–Based Analogs. USA, Cambridge University Press, pp. 47–49, 57–60.

- Caballero Miranda, Cecilia, 2011. La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes y dinámicas de flujo. Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, v. 16, p. 64.
- Camargo–Zanoguera, A., G. Suárez–Reynoso, 1994. Evidencia sísmica del cráter de impacto Chicxulub. Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, v. 34, p. 1–28.
- Campos–Enríquez, J.O., Espinosa–Cardeña, J. M., 2016. Heat flow at the Chicxulub impact crater, northern Yucatan, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 311, doi: 10.1016/j.volgeores.2015.12.013.
- Campos–Enríquez, J.O., Chávez–García, F.J., Cruz, H., Acosta–Chang, J. G., Matsui, T., Arzate, J., Unsworth, M.J., Ramos–López, J., 2004. Shallow crustal structure of Chicxulub impact imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift, *Geophysical Journal International*, 157(2), 515-525.
- Campos–Enríquez, J.O., Delgado–Rodríguez, O., Urrutia–Fucugauchi, J., Arzate, J.A., 2001. Occam and Bostick 1-D inversion of magnetotelluric soundings in the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico. *Geofísica Internacional*, v. 40, p. 271–283.
- Campos–Enríquez, J.O., Morales-Rodríguez, H.F., Domínguez–Méndez, F., Birch, F.S., 1998. Gauss’s theorem, mass deficiency at Chicxulub crater (Yucatan, Mexico), and the extinction of the dinosaurs, *Geophysics*, 63(5).
- Christeson G. L., Gulick S.P.S., Morgan J.V., Gebhardt C., Kring D.A., Ber E. Le., Loti J., Nixon Poelchau C., P., Rae, A.S.P., Rebolledo Vieya M., Riller U., Schmitt D.R., Wittmann A., Bralower T. J., Chenot E., Claeys P., Cockell C.S., Coolen M.J.L., Ferriere L., Green S., Goto K., Jones H., Lowery C.M., Mellett C., Ocampo–Torres R., Perez–Cruz L., Pickersgill A.E., Rasmussen C., Sato H., Smit J., Tikoo S.M., Urrutia–Fucugauchi J., Whalen M.T., Xiao L., Yamaguchi K.E. 2018. Extraordinary rocks from the peak ring of the Chicxulub impact crater: P–wave velocity, density, and porosity measurements from IODP/ICDP Expedition 364. *Earth and Planetary Science Letters*, no. 495, p. 1–11.
- Christeson, G.L., Collins, G.S., Morgan, J.V., Gulick, S.P.S., Barton, P.J., Warner, M.R., 2009. Mantle deformation beneath the Chicxulub impact crater, *Earth and Planetary Science Letters* 284 (1–2), p. 249–257.
- Christeson, G., Y. Nakamura, R. T. Buffler, J. Morgan, and M. Warner, 2001. Deep crustal structure of the Chicxulub impact crater, *J. Geophys. Res.*, 106, 21751–21769.
- Collins S. Gareth, Morgan Joanna, Barton Penny, Christenson Gail L., Gulick Sean, Urrutia Jaime, Warner Michael, Wünnemann Kai, 2008. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters* 270, p. 221–230.
- Collins S. Gareth, Melosh, J. H., Morgan V. J., Warner, R. Mike. 2002. Hydrocode Simulations of Chicxulub Crater Collapse and Peak–Ring Formation. *Icarus* 157, p. 24–33.

- Dressler, B. O., Sharpton, V.L., Morgan, J.V., Buffler, R., Moran, D., Smit, J., Stöffler, D., Urrutia, J., 2003, Investigating a 65 Ma–Old Smoking Gun: Deep Drilling of the Chicxulub Impact Structure. EOS, Transactions, American Geophysical Union, v. 84, no. 14, p. 125.
- Espíndola, J. M., Mena, M., De la Fuente, M., Campos–Enríquez, J. O., 1995. A model of the Chicxulub impact structure (Yucatán, México) based on its gravity and magnetic signatures, *Physics of the earth and planetary Interiors*, v. 92, p. 271–278.
- Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Grieve, R., Morgan, J., Urrutia Fucugauchi, J., 2013. Geophysical characterization of Chicxulub crater. *Reviews of Geophysics*, v. 51, p. 31–52 paper 2012RG000413 doi: 8755-209/13/10.1002/rog.20007
- 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.
- Henkel, H., 1992. Geophysical aspects of meteorite impact in eroded shield environment, with special emphasis on electric Resistivity, *Tectonophysics*, v. 216, p. 63–90.
- Hildebrand, A. et al., 1998. Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic data. In: *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*, Grady, R. et al. (Eds.), *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 140, p. 155–176.
- Hildebrand, A. R., Connors, M., Pilkington, M., Ortiz–Aleman, C., Chávez, R. E., 1995. Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes, *Nature*, v. 376, p. 415–417.
- Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, D. A. Kring, M. Pilkington, A. Camargo–Zanoguera, S. B. Jacobsen, W. V. Boynton, 1991. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867–871.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Rebolledo–Vieyra, M., Urrutia–Fucugauchi, J., Kramar, U. & Stüben, D. 2004. Chicxulub impact predates the K–T boundary mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 101, no. 11, p. 3753–3758.
- Kring, D.A., Hörz, F., Zurcher, L. & Urrutia–Fucugauchi, J., 2004. Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: Initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico. *Meteoritics and Planetary Science*, v. 39, p. 879–898.
- López–Ramos, E., 1993, Contribución a la historia de la Geología en México: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. 43, No. 1, p. 42–53.
- López–Ramos, E., 1973. Estudio geológico de la Península de Yucatán: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geología Petrolera*, vol. 25, No. 13, p. 23–76.
- Marin, L., Sharpton, V.L., Urrutia–Fucugauchi, J., Smit, J., Sikora, P., Carney, C. & Rebolledo–Vieyra, M. 2001. Stratigraphy at ground zero: a contemporary evaluation of well data in the Chicxulub impact basin. *International Geology Review*, 43, p. 1145–1149.

- Mayr, S. I., A. Wittmann, H. Burkhardt, Y. Popov, R. Romushkevich, I. Bayuk, P. Heidinger, and H. Wilhelm., 2008. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure), *J. Geophys. Res.*, 113, B07201, doi: 10.1029/2007JB005420, 2008.
- Marin, L.E., Urrutia Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Soler-Arechalde, A.M. & Sharpton, V., 2000. The Chicxulub Scientific Drilling Project: Strategy. *ICDP Newsletter*, v. 2, p.7–8.
- Morgan, J., Christeson, G., Gulick, S., Grieve, R., Urrutia, J., Barton, P., Rebolledo, M., Melosh, J., 2007. Joint IODP/ICDP Scientific Drilling of the Chicxulub Impact Crater, *Scientific Drilling*, no. 4 p. 42–44.
- Morgan, J., Warner, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Rebolledo-Vieyra, M., and Melosh, J., 2005. Chicxulub crater seismic survey prepares way for future drilling. *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 86:325 – 328, ISSN: 0096 – 3941.
- Morgan, J., Buffler, R., Urrutia Fucugauchi, J. & Grieve, R., 2002. Chicxulub: Drilling the K–T Impact Crater. *Publ. Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico*, no. 4, p. 39.
- Morgan, J., y Wagner, M., 1999. Chicxulub: The third dimension of a multi-ring impact basin. *Geology*, v. 27, no. 5, p. 407–410.
- Morgan, J., Warner, M., the Chicxulub Working Group, 1997, Size and morphology of the Chicxulub impact crater: *Nature*, 390, 472–476.
- O’Keefe, J.D., Ahrens, T.J., 1999, Complex craters: Relationship of Stratigraphy and rings to impact conditions: *Journal of Geophysical Research*, 104, 27,091–27,104.
- Ortiz, C., Urrutia Fucugauchi, J., Rebolledo, M., Soler, A., Delgado, O., 2002. Investigaciones geofísicas sobre cráteres de impacto y el cráter de Chicxulub. *Cuadernos Instituto de Geofísica, UNAM*, no. 13, 46 p.
- Padilla-Sánchez, Ricardo, 2007. Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 59, no. 1, p. 19–42
- Pilkington, M., Grieve, R.A.F., 1992. The geophysical signature of terrestrial impact craters: *Reviews of Geophysics*, 30, 161–181.
- Pilkington, M., Hildebrand, A., 2000, Three-dimensional magnetic imaging of the Chicxulub Crater: *Journal of Geophysical Research*, 105: 23,479–23,491.
- Pilkington, M., Hildebrand, A.R., Ortiz-Aleman, C., 1994, Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub crater, Mexico: *Journal of Geophysical Research*, 99, 13,147–13,162.
- Pindell J. L., 1985, Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and proto Caribbean, *Tectonics*, v. 4, no. 1, p.1–39.
- Pope, K., Ocampo, A., Kinsland G., Smith R., 1996, Surface expression of the Chicxulub Crater, *Geology*, v. 6, no. 24, p. 527–530.

- Popov Y., Romushkevich R.I., Bayuk I., Korobkov D., Mayr S., Burkhardt H. y Wilhelm H. 2004. Physical properties of rocks from the upper part of the Yaxcopoil-1 drill-hole, Chicxulub crater. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 39, no. 6, p. 799–812.
- Quezada–Muñetón, J. M., Marín, L.E., Sharpton, V.L., Ryder, G. and Schuraytz, B.C. 1992. The Chicxulub impact structure: shock deformation and target composition. *Lunar and Planetary Science Conference, XXIII*: 1121–1122.
- Rebolledo Vieyra, M. & Urrutia Fucugauchi, J., 2004. Magnetostratigraphy of the impact breccias and post-impact carbonates from borehole Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico. *Meteoritics and Planetary Sciences*, v. 39, p. 821–830.
- Rebolledo–Vieyra, M., J. Urrutia–Fucugauchi, I. Marín, A. Trejo–García, V.L. Sharpton and A.M. Soler–Arechalde, 2000. UNAM scientific shallow drilling program of the Chicxulub impact crater. *Int. Geol. Rev.*, 42:10, 928–940.
- Schulte, P., Alegret, L., Arz, J., Morgan, J., Urrutia Fucugauchi, J., Willumsen, P., 2010. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous–Paleogene boundary. *Science*, v. 328, p. 1214–1218
- Sharpton, V.L. et al., 1993. Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis. *Science*, 261, 1564–1567.
- Sharpton, V.L., G. Dalrymple, L. Marin, G. Ryder, B. Schuraytz, J. Urrutia–Fucugauchi, 1992. New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 359, 819–821.
- Stöffler, D., Grieve, R.A.F., 2007. Impactites. In: Fettes, D., Desmons, J. (Eds.), *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.82–92.
- Stöffler, D., Artemieva, N.A., Ivanov, B.A., Hecht, L., Kenkmann, T., Schmitt, R.T., Tagle, R.A., Wittmann, A., 2004. Origin and emplacement of the impact formation at Chicxulub, Mexico, as revealed by the ICDP deep drilling at Yaxcopoil-1 and by numerical modeling. *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1035–1067.
- Unsworth, M.J., Campos–Enríquez, J.O., Belmonte, S, Arzate, J., Bedrosian, P., 2002, Crustal structure of the Chicxulub impact crater imaged with magnetotelluric exploration, *Geophysical Research Letters*, 29 (16).
- Urrutia–Fucugauchi J., Camargo Zanoquera A., Pérez Cruz L., Pérez Cruz G., 2011. The Chicxulub multiring impact crater, Yucatan carbonate platform, Mexico. *Geofis. Int.*, 50, p. 99–127.
- Urrutia–Fucugauchi J., Camargo Zanoquera A., Pérez Cruz L., Pérez Cruz G., 2011. Discovery and focused study of the Chicxulub impact crater, *Eos Trans, American Geophysical Union*, vol. 92, no. 25, p. 209–216.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Perez Cruz, L., 2009. Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces. *International Geology Review*, v. 51, p. 1079–1102.

- Urrutia–Fucugauchi, J., Perez-Cruz, L., Morales, P., Escobar, E., 2008. Stratigraphy of the basal Paleocene carbonate sequence and the impact breccia–carbonate contact in the Chicxulub Crater: Stable isotope study of the Santa Elena borehole rocks. *International Geology Review*, v. 50, p. 75–83.
- Urrutia–Fucugauchi, J. Perez Cruz, L., 2008. Post-impact carbonate deposition in the Chicxulub impact crater region, Yucatan platform, Mexico. *Current Science*, v. 95, p. 241–252.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Chávez, J.M., Perez Cruz, L., de la Rosa, J.L., 2008. Impact ejecta and carbonate sequence in the Eastern Sector of Chicxulub Crater. *Comptes Rendus Geosciences*, v. 341, p. 801-810 doi:10.1016 /j.crte.2008.09.001
- Urrutia–Fucugauchi, J., Soler–Arechalde, A.M., Rebolledo–Vieyra, M. & Vera–Sánchez, P., 2004. Paleomagnetic and rock magnetic study of the Yaxcopoil-1 impact breccia sequence, Chicxulub impact crater, Mexico. *Meteoritics and Planetary Science*, v. 39, p. 843–856.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Morgan, J., Stoeffler, D. Claeys, P., 2004. The Chicxulub scientific drilling project (CSDP). *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, p. 787–790.
- Urrutia–Fucugauchi, J. et al., 2001. The Chicxulub Scientific Drilling Project. *Publ. Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico*, no. 3, 55 p.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Marin, L.E., Rebolledo–Vieyra, M., Soler–Arechalde, A.M. & Sharpton, V., 2000. Chicxulub Scientific Drilling Project: Geophysics and Well-Logging. *ICDP Newsletter*, v.2, p. 9–12.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo, A., 1996. UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure–Evidence for a 300 kilometer crater diameter. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1565–1568.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Marín, L., Trejo–García, A. 1996. Initial results of the UNAM scientific drilling program on the Chicxulub impact structure: Rock magnetic properties of UNAM–7 Tekax borehole. *Geofísica Internacional*, 35, 125–133.
- Veermesch, P.M., Morgan, J., 2008, Structural uplift beneath the Chicxulub impact structure: *Journal of Geophysical Research*, 113 (B7), B07 103.
- Vermeesch, P.M., Morgan, J., 2004. Chicxulub central crater structure: initial results from physical property measurements and combined velocity and gravity modeling. *Meteorit. Planet. Sci.* 39, 1019–1034.
- Ward, W.C., Keller, G., Stinnesbeck, W. and Adatte, T., 1995. Yucatán subsurface stratigraphy: Implications and constraints for the Chicxulub impact, *Geology*, v. 10, p. 873–876.
- Weidie, A. E., 1985, *Geology of the Yucatan Platform, Part I*, in Ward, W. C., Weidie, A.E., Back, W. (eds.), *Geology and hydrology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula*: New Orleans, Louisiana, New Orleans Geological Society, p. 1–19.
- Wittmann, A., T. Kenkmann, R. T. Schmitt, L. Hecht, and D. Stöfler, 2004. Impact–related dike breccia lithologies in the ICDP drill core Yaxcopoil-1, Chicxulub impact structure, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science* 39, no. 6, p. 931–954.

COMENTARIOS.

- Gulick, S., Morgan, J., Christeson, G., 2017. High-resolution imaging of the Chicxulub impact basin, Lunar and Planetary Science, Conf., XLVIII, 2 p.
- Hildebrand, A. R., Stansberry, J. A., 1992. K/T boundary ejecta distribution predicts size and location of Chicxulub crater: abstract, Lunar Planet. Sci. Conf., XXIII, p. 537–538.
- Hildebrand, A. R., Pilkington, M., Grieve, R. A. F., Robertson, P. B., Penfield, G. T., 1992. Recent studies of the Chicxulub crater, Mexico: abstract, Lunar Planet. Sci. Conf., XXIII, p. 539–540.
- Morgan, J., Gulick, S., 2017. IODP–ICDP Expedition 364: Drilling the peak ring of the Chicxulub impact structure, Lunar and Planetary Science, XLVIII, 2 p.
- Penfield G. T., Camargo–Zanoguera A., 1981. Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity, in: Technical Program, abstracts and bibliographies, 51st Annual Meeting, p. 37, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Stinnesbeck, W., G. Keller, T. Adatte, 2001. Chicxulub impact: the origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields: comment, *Geology* 29, 94–95.
- Urrutia–Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Tikoo, S., Zylberman, W., 2017. Paleomagnetism of peak ring units within Chicxulub crater: abstract, Lunar and Planetary Science, XLVIII, 2 p.

REPORTES.

- Gulick, S., Morgan, J., Mellett, C., and the Expedition 364 Scientists, 2017. Expedition 364 Preliminary Report: Chicxulub: Drilling the K–Pg Impact Crater. International Ocean Discovery Program, [dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.364.2017](https://doi.org/10.14379/iodp.pr.364.2017)
- Morgan, J., Christeson, G., Urrutia-Fucugauchi, J., Barton, P., Rebolledo-Vieyra, M., and Melosh, J., 2007. Joint IODP/ICDP Scientific drilling of the Chicxulub impact crater. Scientific Drilling No. 4, [doi:10.2204/iodp.sd.4.11.2007](https://doi.org/10.2204/iodp.sd.4.11.2007)
- Pemex, 2013. Provincia petrolera Plataforma de Yucatán, Pemex Exploración y Producción, 18 p.
- Pérez–Cruz L., Keller, A., Kirtland Turner S., Choumiline, K., 2017. Paleocene–Eocene climatic events in the IODP–ICDP Expedition 364, Chicxulub impact crater: geochemical preliminary results: abstract, Lunar and Planetary Science, XLVIII, 2 p.
- Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999. High-resolution magnetic susceptibility record of the impact lithologies of the Chicxulub impact crater: American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, California: EOS, Transactions, 80(46), F595.
- 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 Chicxulub Crater. *Comptes Rendus Geosciences*, 341, 801-810 [doi:10.1016/j.crte.2008.09.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.09.001)

TESIS.

- Almaraz Espejo, M. Mariana, 2014. Interpretación de registros geofísicos de pozos para la inyección de dióxido de carbono en la zona norte de la República Mexicana. [Tesis de Licenciatura]: UNAM, 67 p.
- Álvarez Elizalde, D. Josué, 2017. Caracterización petrofísica mediante cubos de propiedades petrofísicas del campo Schaben en el Estado de Kansas, USA. [Tesis de Maestría]: UNAM, 123 p.
- Araujo Mendieta, Juan, 2004. Evolución tectono–sedimentaria reciente y su relación con las secuencias estratigráficas del Neógeno en el suroeste del Golfo de México. [Tesis Doctoral]: UNAM, 315 p.
- Escobar Sánchez, J. Elia, 2018. Cuenca de impacto Chicxulub, plataforma de Yucatán: secuencia carbonatada paleógena, pozo Yaxcopoil–1. [Tesis Doctoral]: UNAM, 186 p.
- Escobar Sánchez, J. Elia, 2005. Caracterización petrológica y geoquímica de la secuencia carbonatada sobreyacente a la brecha de impacto en el pozo UNAM–5, cráter Chicxulub. [Tesis de Maestría]: UNAM, 136 p.
- Guillot Merchand, Guillermo, 2010. Manual básico para la interpretación de registros geofísicos de pozo. [Tesis de Licenciatura]: UNAM, 164 p.
- López Pérez, Shontat, 2014. Caracterización petrofísica de yacimientos carbonatados basada en tipos de roca. [Tesis de Licenciatura]: UNAM, 171 p.
- Mendoza Torres, Francisco, 2011. Análisis y modelado geofísico de la estructura del cráter Chicxulub. [Tesis de Maestría]: UNAM, 130 p.
- Salguero, Eduardo, 2008. Atributos sísmicos y caracterización de propiedades petrofísicas en la secuencia carbonatada de Chicxulub. [Tesis Doctoral]: México, UNAM, 88 p.
- Sánchez Nicolás, Ubaldo, 2003. Los registros geofísicos de propiedades magnéticas en el pozo Yaxcopoil–1. [Tesis de Licenciatura]: México, UNAM, 164 p.
- Vázquez Heredia, Jesús A, 2016. Métodos rápidos de interpretación de registros geofísicos para identificar capas con hidrocarburos. [Tesis de Licenciatura]: México, UNAM, 125 p.
- Velasco Villareal, Miriam, 2019. Propiedades magnéticas y anisotropía de susceptibilidad magnética de las brechas de impacto del cráter Chicxulub, pozos Yaxcopoil–1, UNAM–5 (Santa Elena) y UNAM–6 (Peto). [Tesis Doctoral]: México, UNAM, 290 p.

PÁGINAS DE INTERNET.

- S. Gulick, J. Morgan and others. IODP Publications 2017. Site M0077A: Upper Peak Ring. Recuperado de <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.364.106.2017>