



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CAMPO DEL CONOCIMIENTO:
EXPLORACIÓN, AGUAS SUBTERRÁNEAS, MODELACIÓN Y PERCEPCIÓN REMOTA

TÍTULO DE TESIS:
ANÁLISIS DE LA PERFORACIÓN EN LA SECUENCIA CRETÁCICA DEL POZO YAXCOPOIL-1

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ADÁN CÁRDENAS CÁRDENAS

TUTOR:
DR. JAIME HUMBERTO URRUTIA FUCUGAUCHI
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., FEBRERO DE 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A Dios por el camino que destinó para mí y en el cual me siento afortunado por tener a las personas que rodean mi vida.

A mis padres, Victoria y Pedro, por guiarme en la vida para ser una buena persona y a mis hermanos Omixochitl, Ruth, Juan y Raziél, por su ayuda para motivarme a tratar de ser un buen ejemplo para ellos.

A mi esposa Dulce María por ser la compañera perfecta para mí y por estar a mi lado motivándome e impulsándome a ser siempre la mejor versión de mí y a mi hijo Emiliano por llenar de alegría mi vida y por ser el motor que me hace esforzarme cada día para ser una mejor persona y un mejor papá.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual me brindó la oportunidad de desarrollar mis estudios desde la Escuela Nacional Preparatoria No. 1, después en la Facultad de Ingeniería y enseguida en el Instituto de Geofísica y a todos los docentes que me compartieron su conocimiento para adquirir mi formación profesional y con ello poder desarrollarme como lo hago actualmente.

Al Dr. Jaime Humberto Urrutia Fucugauchi por su apoyo, paciencia, tolerancia, conocimiento y sobre todo por no darse por vencido conmigo en el desarrollo del presente trabajo.

Al resto del jurado asignado, Dr. Miguel Ángel Díaz Flores, Dr. Fernando Núñez Useche, Dr. Juan Araujo Mendieta y al Dr. José Carlos Ortiz Alemán, por tomarse el tiempo para leer y retroalimentar el presente trabajo, sobre todo después de un periodo largo de tiempo.

A la Dra. Christina Siebe Grabach y al H. Comité Académico del Posgrado en Ciencias de la Tierra, por brindarme la oportunidad de concluir el proceso de obtención de grado.

A Araceli Chamán y Gloria Alba por estar al pendiente de mi proceso, así como brindarme la guía y el acompañamiento necesario en cada una de las etapas.

Al proyecto de perforación Chicxulub, al Programa Internacional de Perforaciones Científicas en Continentes y al Instituto de Investigaciones Científicas y Estudios Avanzados de Chicxulub, porque gracias a ellos y a toda la información que generaron fue posible la realización y conclusión del presente trabajo.

Y a todas las demás personas que rodean mi vida, amigos y familiares, que de algún modo me han brindado su apoyo, afecto y algunas palabras de aliento para continuar cumpliendo objetivos y seguir creciendo como persona y como profesional.

Contenido

Resumen	6
Abstract	7
Objetivos.....	8
Hipótesis.....	8
Capítulo 1. Introducción	9
Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio.....	11
2.1 Plataforma carbonatada de Yucatán	11
2.2 Características Geológicas.....	12
2.3 Estratigrafía.....	13
2.4 Sedimentología.....	14
2.5 Eventos de deformación estructural.....	16
2.6 Cráter de Chicxulub.....	17
Capítulo 3. Registros geofísicos	21
3.1 Importancia de los registros eléctricos.....	21
3.2 Toma de registros.....	22
3.3 Perforación y recuperación de núcleos	23
3.4 Registros geofísicos	24
3.5 Registros en carbonatos.....	27
Capítulo 4. Análisis de los datos	29
4.1 Generalidades del pozo.....	29
4.2 Estructura de impacto	31
4.3 Impactos en la biosfera	36
4.4 Propiedades petrofísicas de las rocas	38
4.5 Sección sísmica	42
4.6 Columna estratigráfica	45
4.7 Síntesis de la perforación	50
4.8 Registros.....	56
4.9 Lodos de perforación.....	62
4.9 Barrenas.....	63

4.10 Estado mecánico del pozo	65
Capítulo 5. Discusión	68
Conclusiones	97
Bibliografía	99
Libros	99
Artículos	99

Resumen

El pozo Yaxcopoil-1 fue perforado en el sector sur del cráter Chicxulub, en Yucatán, como parte de los proyectos de investigación del impacto Chicxulub y el límite Cretácico/Paleógeno. La perforación incluyó programas de recuperación continua de núcleos y de registros geofísicos. La perforación fue exitosa y se muestrearon la secuencia carbonatada post-impacto del Paleógeno, la secuencia de impactitas y las rocas pre-impacto del Cretácico. En este trabajo se analizan las técnicas de perforación y recuperación de núcleos, herramientas de corte de núcleos, programa de registros geofísicos de pozo y los resultados. Se realizan evaluaciones y comparaciones con otras técnicas empleadas, con el objetivo de poder contribuir a perforaciones futuras proponiendo herramientas como son la zapata perforadora que se puede usar como casing drilling, que han resultado exitosas durante la perforación. También se proponen técnicas que pueden ayudar a minimizar los costos de perforación como lo son la perforación multilateral, que es uno de los puntos más sensibles del proceso de perforación de pozos. Se generó un modelo a escala de las columnas litológicas para poder visualizar los estratos de interés, tomando en cuenta las secciones sísmicas disponibles, así como los registros eléctricos y proponiendo la toma de registros a través de zonas ya perforadas para proporcionar información después de la perforación a quienes se encargan del estudio y las secciones sísmicas, además de poder incluir la sísmica de alta resolución. Siendo una zona de secuencias carbonatadas, la perforación es similar a la que se desarrolla en la Región Marina Sureste del Golfo de México que son yacimientos naturalmente fracturados por su composición alto contenido de carbonatos y es por ello que el trabajo se apoyó en la perforación de pozos en esos campos.

Abstract

The Yaxcopoil-1 well was drilled in the southern sector of the Chicxulub crater, in Yucatán, as part of the Chicxulub impact and Cretaceous/Paleogene boundary research projects. Drilling included continuous core recovery and geophysical logging programs. Drilling was successful and the Paleogene post-impact carbonate sequence, impactite sequence and Cretaceous pre-impact rocks were sampled. This work analyzes drilling and core recovery techniques, core cutting tools, geophysical well logging program, and results. Evaluations and comparisons are made with other techniques used, with the aim of being able to contribute to future drilling by proposing tools such as the drilling shoe that can be used as casing drilling, which have been successful during drilling. Techniques that can help minimize drilling costs are also proposed, such as multilateral drilling, which is one of the most sensitive points of the well drilling process. A scale model of the lithological columns was generated to be able to visualize the strata of interest, taking into account the available seismic sections, as well as the electrical logs and proposing the taking of logs through already drilled areas to provide information after drilling. to those in charge of the study and the seismic sections, in addition to being able to include high-resolution seismic. Being an area of carbonate sequences, the drilling is similar to that carried out in the Southeastern Marine Region of the Gulf of Mexico, which are naturally fractured reservoirs due to their high carbonate content composition and that is why the work was based on the drilling of wells in those fields.

Objetivos.

El objetivo del presente trabajo es analizar la perforación del pozo Yaxcopoil-1 con base en información disponible del pozo, así como de las perforaciones previas en la zona para realizar propuestas de mejora en el proceso de perforación mediante un plan de trabajo estandarizado que concentre e integre toda la información de forma ordenada y estructurada. Se generará además un modelo en tercera dimensión para visualizar de forma clara la profundidad de las diferentes litologías que componen los pozos incluidos y con ello realizar recomendaciones de equipo y/o técnicas para la perforación de pozos futuros para lograr la optimización de costos-beneficios, alineados con los objetivos del proyecto.

Hipótesis.

El mayor reto de los científicos es conseguir financiamiento para realizar las investigaciones, es por esto que se propone emplear herramienta especializada, junto con una técnica para obtener más información proveniente de un solo pozo con menos recursos económicos.

La zapata perforadora es una herramienta que puede ser usada como “casing drilling”, puede ser exitosa durante la perforación, además de técnicas que pueden ayudar a minimizar los costos de perforación como lo es la perforación de pozos multilaterales.

La intención de reducir los tiempos de perforación con la ayuda de una zapata perforadora y una técnica de perforación de pozos multilaterales, en conjunto, reducirán los costos de la perforación ya que se puede ahorrar hasta un 40% del tiempo de perforación en las primeras etapas del pozo.

Capítulo 1. Introducción

Desde la perforación del primer pozo petrolero en 1859 por Edwin L. Drake¹ en Estados Unidos, cada día se han encontrado más aplicaciones para los pozos y con ello se han desarrollado diversos estudios y métodos para tratar de conocer la historia de nuestro planeta a través de las diferentes eras geológicas. Esto ha representado un reto para los científicos que buscan mediante investigaciones proponer hipótesis que demuestren algún suceso que haya marcado sustancialmente alguna zona, uno de ellos es el objetivo de este trabajo en el cual se abordarán aspectos de la perforación del pozo Yaxcopoil – 1, ya que dicho pozo resulta de importancia debido a que fue un pozo exploratorio y a su vez fue nucleado y es por ello que se han realizado diversos estudios sobre el mismo.

El pozo está situado en la secuencia carbonatada de Yucatán y los resultados obtenidos en el presente trabajo son producto de los múltiples análisis realizados a dicho pozo, desde la caracterización de las formaciones geológicas hasta el análisis de los registros eléctricos disponibles de dicho pozo, es importante mencionar que se incluirán en el estudio las condiciones generales de la plataforma de Yucatán en la cual está el cráter de impacto de Chicxulub, se describirá de forma breve la tectónica del Golfo de México ya que ésta originó la plataforma de Yucatán y en ella se formó el cráter de impacto en el cual se perforó y nucleó el pozo Yaxcopoil-1.

También se buscará exponer y relacionar características importantes acerca de los diversos estudios realizados al pozo, auxiliados del análisis de los núcleos y registros geofísicos disponibles para interpretar los resultados y buscar semejanzas o posibles correlaciones con la caracterización de formaciones geológicas que dan lugar a los yacimientos petroleros ubicados en la Sonda de Campeche y a los cuales

¹Drake fue un perforador nativo del condado de Greene, Nueva York y realizó el primer pozo de petróleo en el Valle de Oil Creek, este hecho detonó la mayor industria del mundo actual.

se han realizado diversos estudios geológicos como el corte de núcleos, corrida de registros eléctricos, caracterización petrofísica, sísmica, entre otros.

Se debe resaltar que el descubrimiento del cráter fue hecho por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en la década de los 70's mientras realizaban operaciones de perforación en la zona en busca de yacimientos petroleros (Penfield y Camargo, 1981)². Desde los 90's se impulsaron proyectos geofísicos para relacionar la extinción masiva del cretácico – terciario al impacto del meteorito (Álvarez *et al.*, 1980)³, la perforación del pozo Yaxcopoil-1 fue realizada con colaboración de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Programa Continental Internacional de la Perforación (ICDP)⁴ y existen núcleos de casi todo el pozo, lo que resulta de mucha ayuda ya que en la actualidad no suelen cortarse núcleos a menos que se busque obtener información adicional de los pozos, que se trate de un pozo exploratorio o con fines de investigación científica.

² Penfield, G., et al., 1981. Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity, Research Gate.

³ Álvarez, L. W., et al., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction, Science 208, p. 1095–1108.

⁴ ICDP son las siglas en inglés para el *International Continental Scientific Drilling Program*.

Capítulo 2. Descripción de la zona de estudio

2.1 Plataforma carbonatada de Yucatán

La plataforma de Yucatán se encuentra localizada en el sureste de México y pertenece a la cuenca terciaria del Golfo de México, es una unidad sedimentaria en la que se incluye al Golfo de México y a una franja continental, la estructura es aproximadamente de 200 Km de ancho y sensiblemente paralela a la costa como se observa en la Fig. 1, el centro está casi en el puerto de Chicxulub de donde toma su nombre (Venegas *et al.* 2019)⁵.

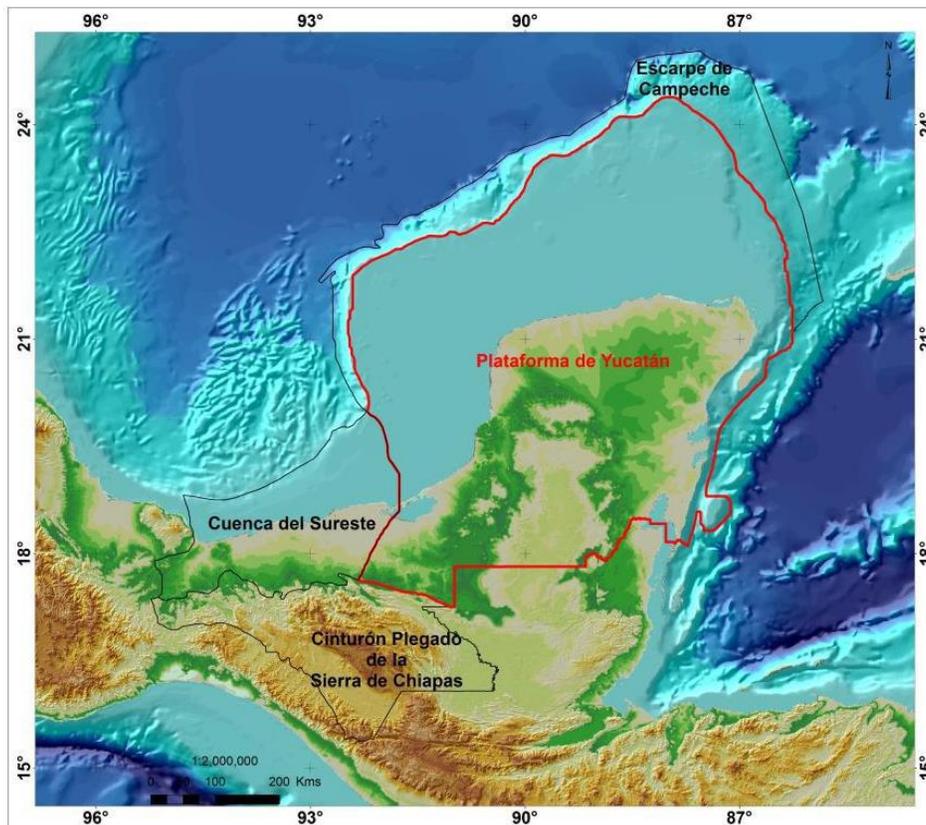


Fig. 1 Plataforma carbonatada de Yucatán (PEMEX, 2013).

⁵ Venegas, F. R., et al., 2019. Registro fotográfico continuo del pozo Yaxcopoil-1 (YAX-1), Gaceta Chicxulub V2-3, p. 6-8.

La Cuenca del Golfo se ha dividido en dos partes, la primera corresponde a la plataforma noroccidental, la otra corresponde a la plataforma occidental que contiene a la plataforma de Yucatán.

Durante el Cretácico la cuenca del Golfo presentó un predominio de sedimentos carbonatados, en el Terciario éste depósito continuó en la plataforma de Yucatán y en menor proporción en un área de sedimentos mixta, carbonatos con terrígenos conocida como la Sierra de Chiapas localizada al Sur de las cuencas del Sureste, en las cuales predominó el depósito arcilloso, ésta distribución y variación de las características fue el resultado de los efectos orogénicos a los que estuvieron sujetos, otra consecuencia fue la distribución de las línea de costa del Paleoceno al Plio-Pleistoceno las cuales van de norte a sur tomando en cuenta que las más antiguas se localizan al norte.

2.2 Características Geológicas.

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

La superficie es bastante plana, con una suave e imperceptible inclinación de sur a norte, sin elevaciones de importancia, sólo está una pequeña cadena de 100 km de largo y 5 km de ancho con 100 m de elevación máxima, que se extiende de Sahcabá y Muna a Ticul y Tul, que se le conoce con el nombre de Sierrita de Ticul, que se

encuentra en la parte sur del Estado de Yucatán, estos rasgos resultaron de un fallamiento normal y sus elevaciones máximas son de 100 a 150 metros como se observa en la Fig.2. Así mismo, la península se le pueden reconocer cuatro regiones fisiográficas (Weidie, 1985)⁶, en donde todas las rocas que afloran en la superficie son carbonatos, en las que se presenta una gran variedad de rasgos kársticos que están muy relacionados con la elevación de la región y la profundidad del nivel freático, formando así las regiones fisiográficas.

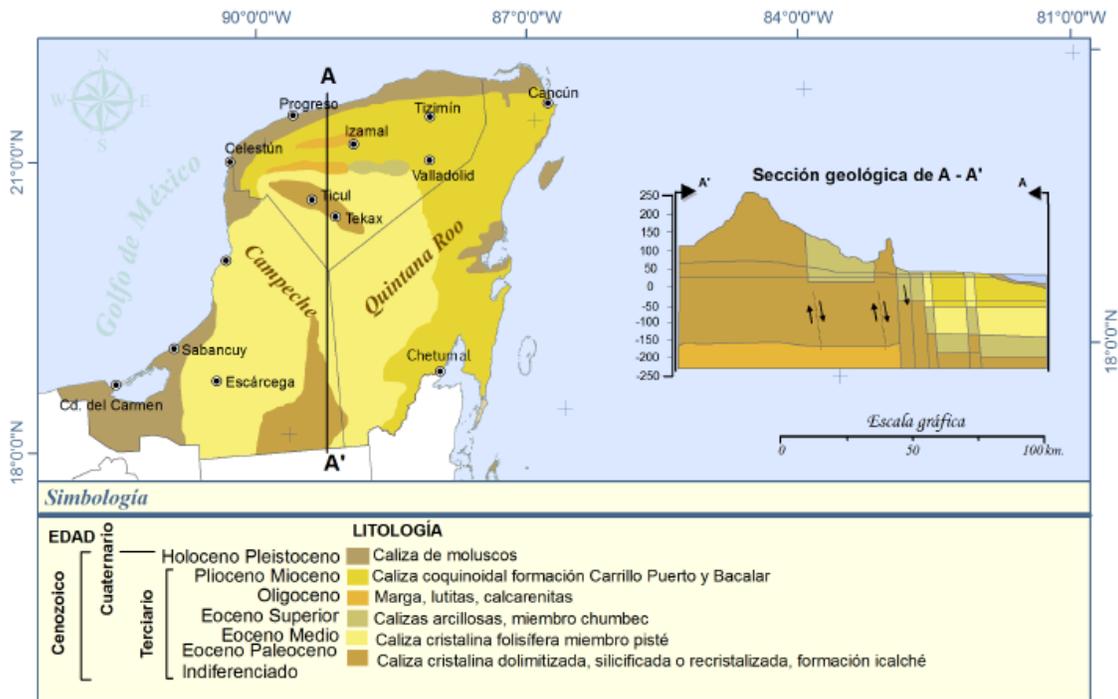


Fig. 2 Clasificación geológica de la Península de Yucatán en el Terciario (González *et al.*, 1999).

2.3 Estratigrafía.

La Plataforma de Yucatán se caracteriza por la acumulación de carbonatos con intercalación de evaporitas, es una plataforma estable con ausencia de sedimentos

⁶ 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.

Terrígenos, en donde la subsidencia ha sido menor en comparación con las partes adyacentes donde predominó la sedimentación terrígena, el espesor de carbonatos para el Terciario hasta ahora conocido es de 1000 m aproximadamente, cabe mencionar que la información estratigráfica que se tiene es escasa y en algunos casos dudosa.

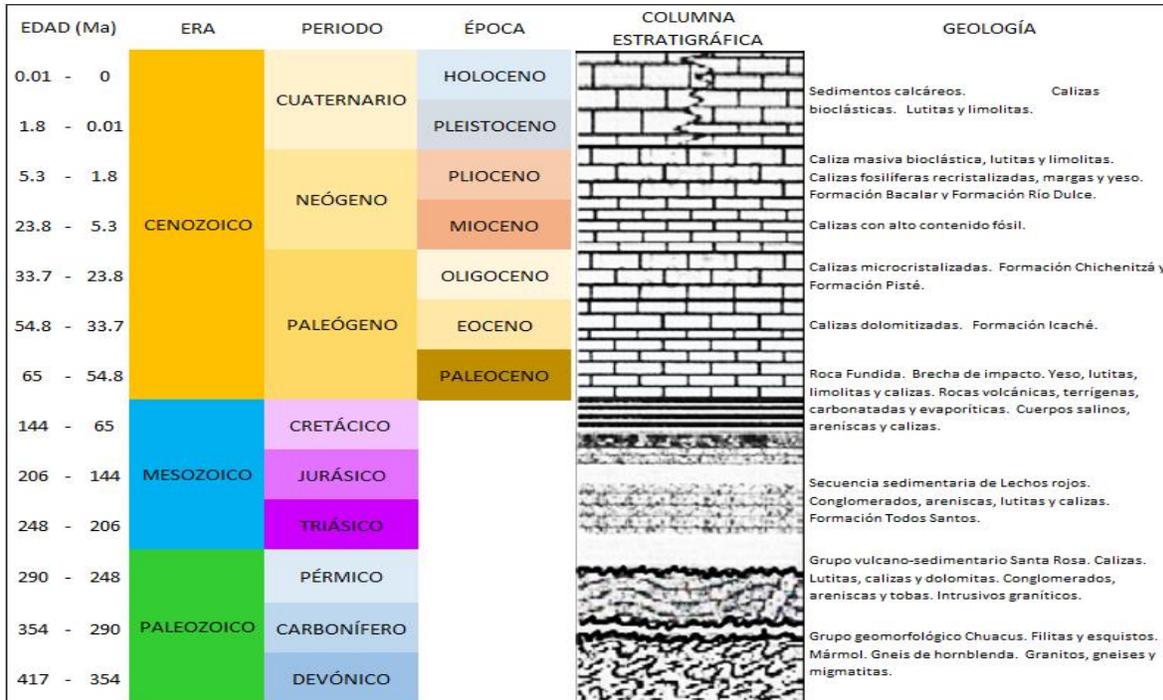


Fig. 3 Columna estratigráfica de la Península de Yucatán (López Ramos, 1975).

2.4 Sedimentología.

La Cuenca del Golfo de México recibió considerables volúmenes de sedimentos desde el Jurásico Superior hasta el Terciario, de ese elemento corresponde a la República Mexicana toda la Plataforma del Sureste que contiene paquetes de sedimentos terrígenos, constituidos principalmente por areniscas, conglomerados y lutitas que en la mayoría de los casos son ricas en fauna pelágica y bentónica. Los sedimentos de la Plataforma de Yucatán son sedimentos carbonatados y

evaporíticos depositados en una plataforma somera estable durante un periodo largo de tiempo, Jurásico Superior, Cretácico y Terciario.

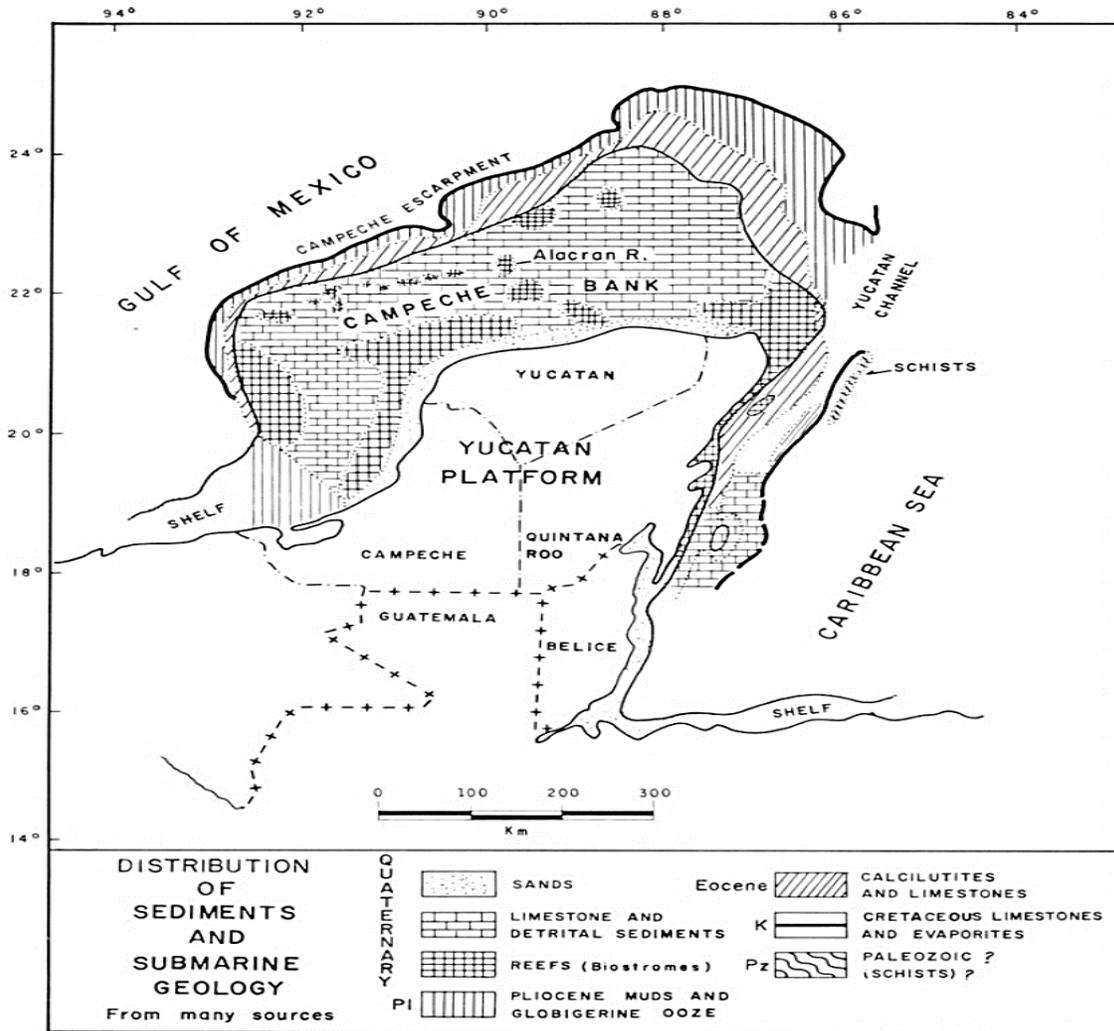


Fig. 4 Distribución de sedimentos y geología submarina (López Ramos, 1973).

En diversos estudios que fueron realizados se determinó que los sedimentos de las rocas tienen la clasificación que se muestra a continuación:

Para la secuencia del Cretácico se tiene en la cima la presencia de sedimentos que corresponden a brecha de transporte de impacto del meteorito, yeso, lutitas, limolitas y calizas.

Y para el Terciario se tiene presencia de sedimentos que corresponden a rocas calizas fosilíferas recristalizadas, calizas micro cristalinas, calizas dolomitizadas, yeso y margas, que corresponderían a la secuencia post impacto en su base.

2.5 Eventos de deformación estructural.

La evolución geológica del sureste mexicano inicia con la separación de la Pangea en el Pérmico dando lugar a Laurasia y Gondwana desde los 225 a los 150 millones de años como se muestra en la Fig. 5, en ese momento inicia la sedimentación con el depósito de lechos rojos continentales entre el Triásico Tardío y el Jurásico Temprano, enseguida se genera el ingreso de agua provenientes del Pacífico, generando un ambiente de poca circulación con un tirante de agua bajo y con una alta evaporación favoreciendo un alto depósito de sal en el centro de la cuenca.

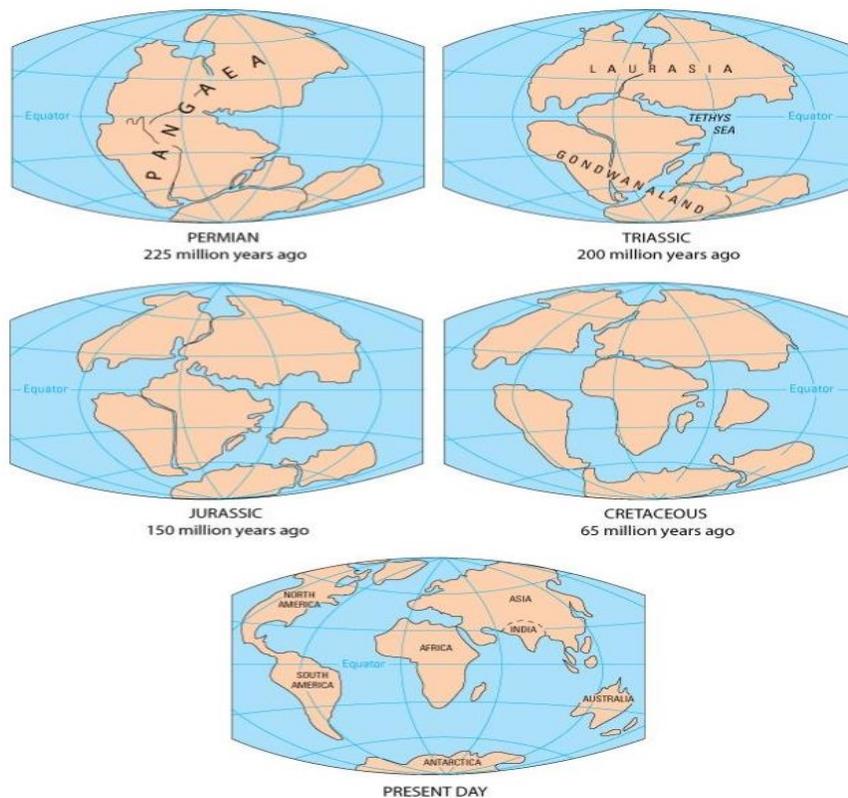


Fig. 5 Se ilustra la evolución terrestre desde la Pangea hasta la actualidad.

Se depositaron carbonatos desde el Jurásico tardío y hasta el Cretácico Tardío mismos que fueron cambiando a clásticos a principios del Paleógeno debido a la Orogenia Laramide que originó la Sierra Madre Oriental, continuando con el depósito de carbonatos debido a la plataforma somera generada.

En el Mioceno medio, la compresión derivada del movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos contra la terminación meridional de la Placa de Norteamérica, formó los pliegues y fallas de la cadena de Chiapas-Reforma-Akal sobre el nivel de la sal del Calloviano, posteriormente estas estructuras se bascularon hacia el NNW cuando la sal se movilizó hacia el norte. El cambio de posición de la masa de sal generó nuevas fallas antitéticas regionales, que limitan las Cuencas del Sureste. El Sureste mexicano se refiere a la zona comprendida al oriente del Istmo de Tehuantepec y al occidente de la Península de Yucatán, convirtiéndolo en una de las áreas más complejas de Norteamérica debido a que los movimientos de las placas tectónicas Norteamericana, del Caribe y de Cocos, convergen en esta región desde el Oligoceno Tardío (Morán-Zenteno *et al.*, 2000)⁷.

2.6 Cráter de Chicxulub.

El evento de deformación de mayor interés para la zona de estudio fue el impacto del meteorito que dio lugar al cráter de Chicxulub que en la actualidad se puede observar tanto en tierra como costa afuera y que se puede observar en la Fig. 6, tuvo lugar hace aproximadamente 65 millones de años y que coincide con el límite entre el Cretácico y el Paleógeno, surgiendo con esto la teoría de la extinción masiva de un gran número de especies que habitaban en ese momento el planeta, incluyendo a los dinosaurios, quienes dominaban casi toda la superficie terrestre (Álvarez *et al.* 1980).

⁷ Morán-Zenteno, D.J., Corona-Chávez, P., Tolson, G., 1996, Uplift and subduction erosion in southwestern Mexico since the Oligocene: pluton geobarometry constraints: *Earth and Planetary Science Letters*, 141, 51-65.



Fig. 6 Se muestra la dimensión aproximada del cráter y la parte que se encuentra en tierra.

Durante la exploración de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en busca de hidrocarburos alrededor de 1950, se descubrieron una serie de estructuras que con el tiempo y los diversos estudios en la zona, determinaron que pertenecían a la estructura del impacto de un meteorito, diversos investigadores realizaron trabajos ahí como López Ramos en 1973, 1975 y 1983, Aguayo Camargo en 1987, entre otros.

La teoría de la extinción masiva en el Cretácico – Paleógeno cobró sentido cuando se logró determinar una capa de Iridio alrededor del planeta muestreada en varios puntos y que al fecharla indicaba 65 millones de años y que se puede observar en el mapa de la Fig. 7, cabe mencionar que el Iridio es un elemento muy raro y difícil de encontrar en la superficie del planeta, pero es un elemento que suele encontrarse en los meteoritos y por la cantidad encontrada en los diferentes puntos donde fue

encontrado en el mundo y que se observan en la Fig.8, se asumió que el meteorito debería haber tenido una dimensión muy grande por lo que la teoría se afianzaba.

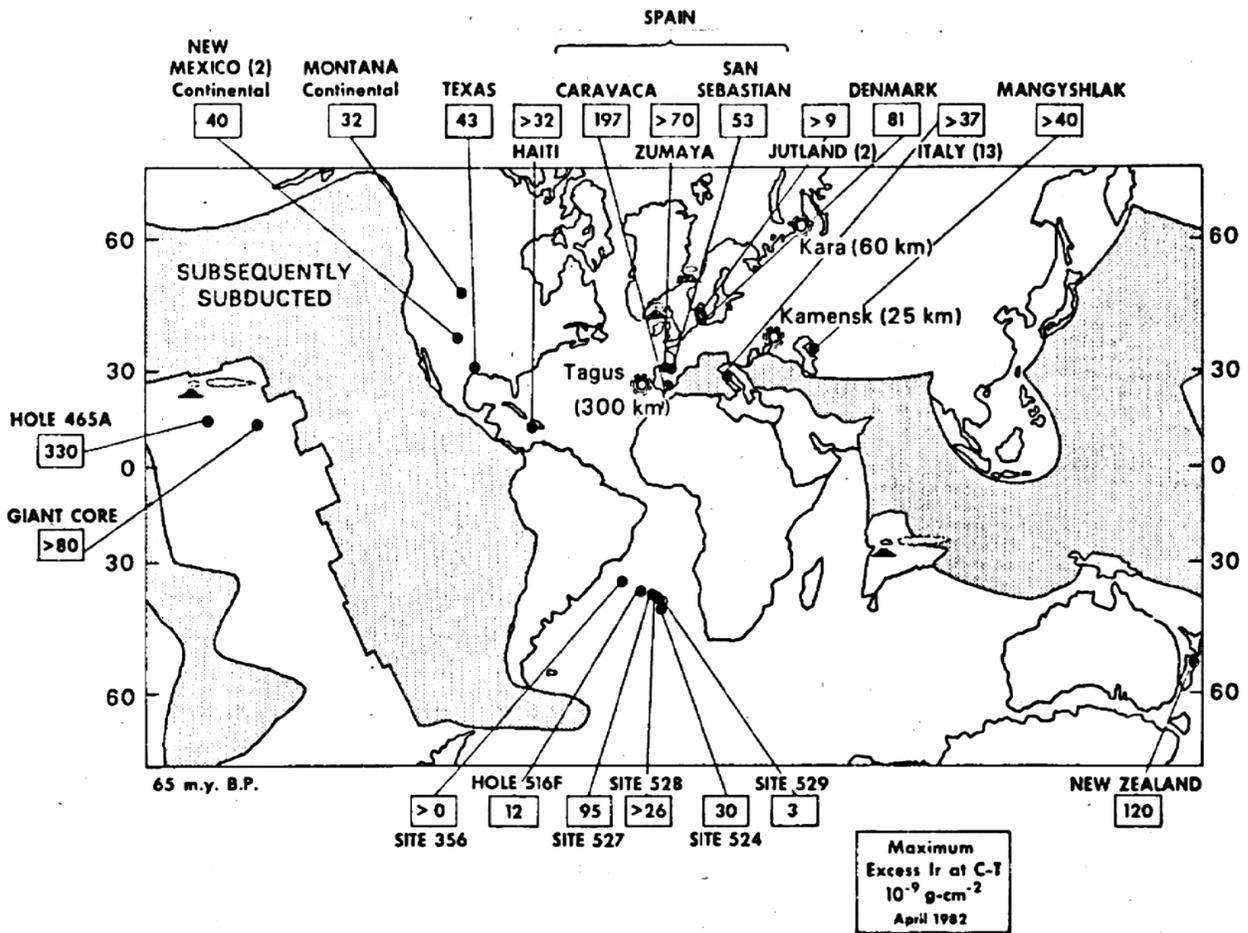


Fig. 7 Se muestra los cráteres de impacto con secciones en el Cretácico – Paleógeno con presencia de Iridio (Álvarez *et al.*, 1982).

La descripción de la formación del cráter de impacto ha sido ampliamente estudiada y fue en 1980 cuando se presentaron evidencias geoquímicas en las secuencias de carbonatos que indicaban la presencia de Iridio y de algunos otros pertenecientes al platino, esto fue tomado como evidencia de la colisión de un meteorito de grandes dimensiones que provocó la extinción masiva que marcó el límite Cretácico – Paleógeno o Terciario, como característica de dicho impacto es que se pulverizó al tener contacto con la corteza terrestre lo que pudo haber provocado la obstrucción

de la radiación solar lo que desencadenó en la extinción de muchas especies vegetales que necesitan el sol para realizar fotosíntesis, característica fundamental para la supervivencia de dichas especies, a esto se le debe sumar el descenso en la temperatura global lo que provocó que otras especies más perecieran.

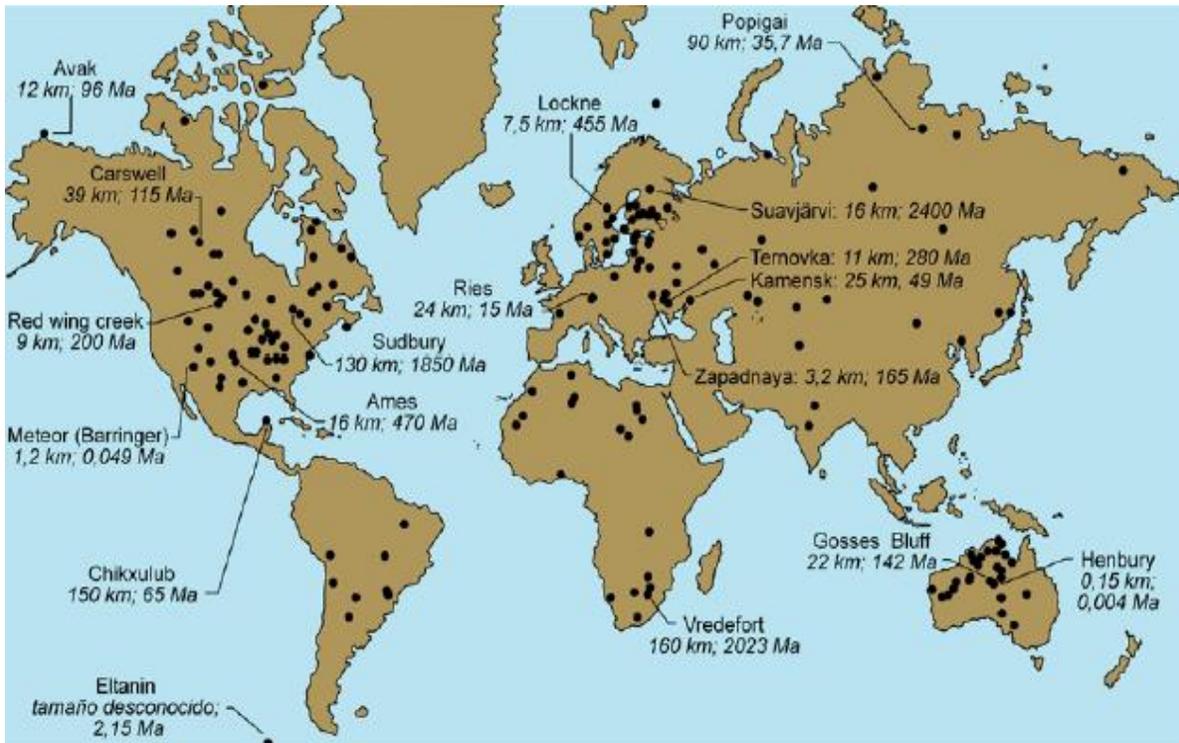


Fig. 8 Se muestra los cráteres de impacto según la Earth Impact Database de 2014⁸.

⁸ Se detalla el diámetro del cráter y edad de formación en millones de años por la Earth Impact Database (consultada en 2014) y por Gersone et al (1997).

Capítulo 3. Registros geofísicos

3.1 Importancia de los registros eléctricos

Los registros geofísicos son de gran importancia durante la perforación de pozos petroleros ya que proporcionan información valiosa acerca de las características de los estratos que se van atravesando durante la perforación, es decir, con un registro geofísico se mide la propiedad física de la roca con respecto a la profundidad a la que se encuentra.

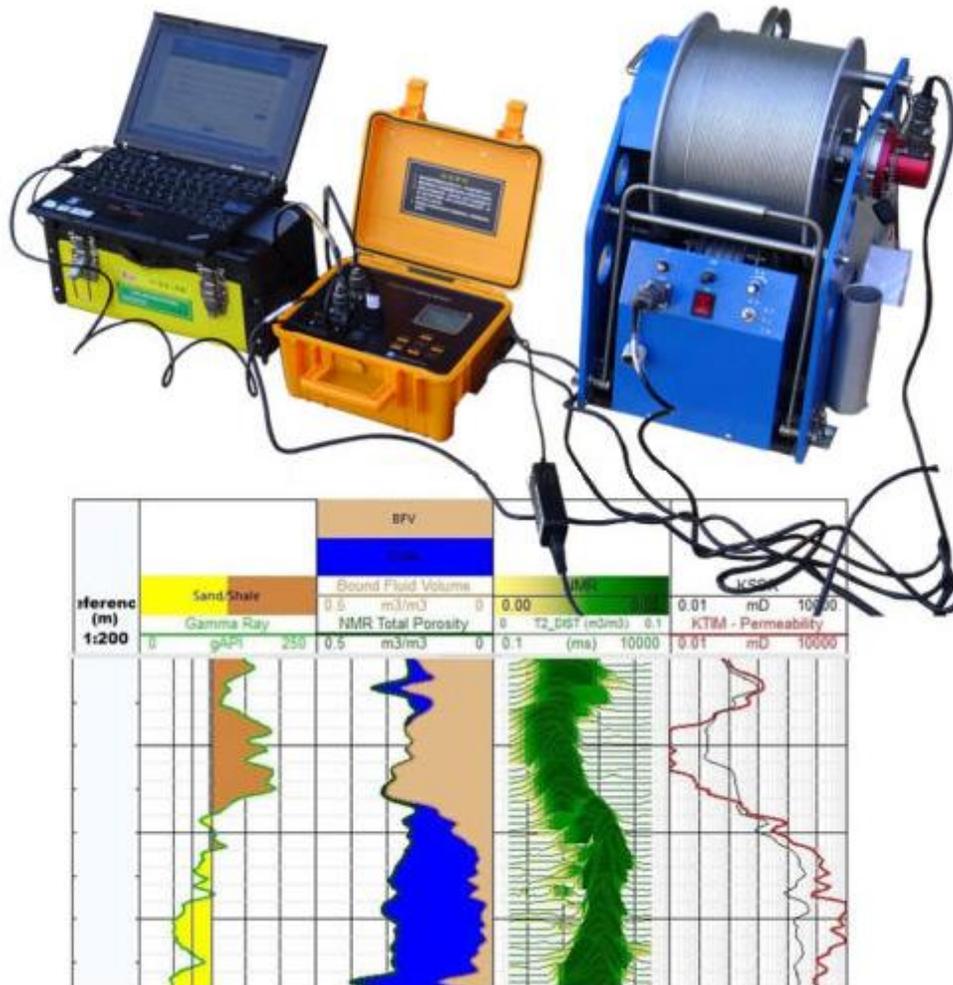


Fig. 9 Ejemplo de equipo para la toma de registros eléctricos (imagen tomada de la web).

Los registros eléctricos son mayormente usados en la industria petrolera porque indica propiedades de la roca y de los yacimientos, ayuda a la identificación de los límites de los estratos, también conocidos como cimbras y bases, determinan la porosidad y saturación de agua, gas y/o hidrocarburos, pueden indicar la densidad de la roca que se está perforando, miden el diámetro del agujero, toman imágenes sísmicas, las cuales son de gran ayuda cuando se hacen las caracterizaciones petrofísicas, entre otras características.

3.2 Toma de registros

Uno de los procesos más interesantes dentro de la caracterización de la formación es la toma de registros eléctricos, lo cual permite conocer las diferentes litologías de las que está compuesto el subsuelo, sus parámetros petrofísicos, también son de gran ayuda cuando se desea conocer si las rocas son generadoras, almacenadoras o si se comportan como roca sello.

Otro aspecto importante es conocer el ambiente de depósito el cuál puede indicar si la zona es comercialmente viable, en el caso de los yacimientos petroleros, o si las estructuras geológicas que se estudian sirven para probar una teoría o para complementar la historia de la región.

Es por ello que las técnicas para la toma y obtención de registros geofísicos cobran importancia a la hora de interpretar los datos obtenidos ya que depende de su calidad para dar certeza al estudio y así determinar de forma correcta las características petrofísicas en la zona de estudio.



Fig. 10 Se ilustra el primer equipo para la toma de registros eléctricos (Comunidad Petrolera – CPe, 2020)⁹.

3.3 Perforación y recuperación de núcleos

La perforación del pozo Yaxcopoil-1 se llevó a cabo de diciembre del 2001 a febrero del 2002 y la recuperación de los núcleos fue mediante el método de extracción continua para garantizar una perforación rápida debido a que la perforación no se detiene en ningún momento, reduciendo los costos de extracción de núcleos, en ese método los núcleos son obtenidos directamente de la tubería de perforación, los trabajos realizados para este pozo se llevaron a cabo en la Hacienda Yaxcopoil la Fig. 11 muestra la operación.

⁹ Comunidad Petrolera – CPe. (26 de enero de 2020). Primer equipo eléctrico para toma de registros geofísicos. Facebook.
<https://www.facebook.com/393135261184335/photos/a.405269926637535/779946352503222/?type=3>



Fig. 11 Se ilustra la operación de recuperación de núcleos en la Hacienda Yaxcopoil-1 (Urrutia *et al.*, 2011)

3.4 Registros geofísicos

Lo registros geofísicos de pozo nos muestran características particulares de cada zona en función de sus propiedades petrofísicas y estos pueden ser del tipo resistivo o de poro, las técnicas de los registros constituyen un método efectivo para verificar las características y evaluar su potencial.

Los tipos de registros se pueden clasificar por su forma de obtención, están los que se toman al momento de la perforación y forman parte del equipo de perforación como son el MWD (Measuring While Drilling) que se ilustra en a Fig. 12, LWD (Logging While Drilling) que se representa en la Fig. 13, los cuales miden la presión, temperatura, la trayectoria del pozo de forma tridimensional, la porosidad, la densidad de los fluidos contenidos en los estratos, entre otras características.

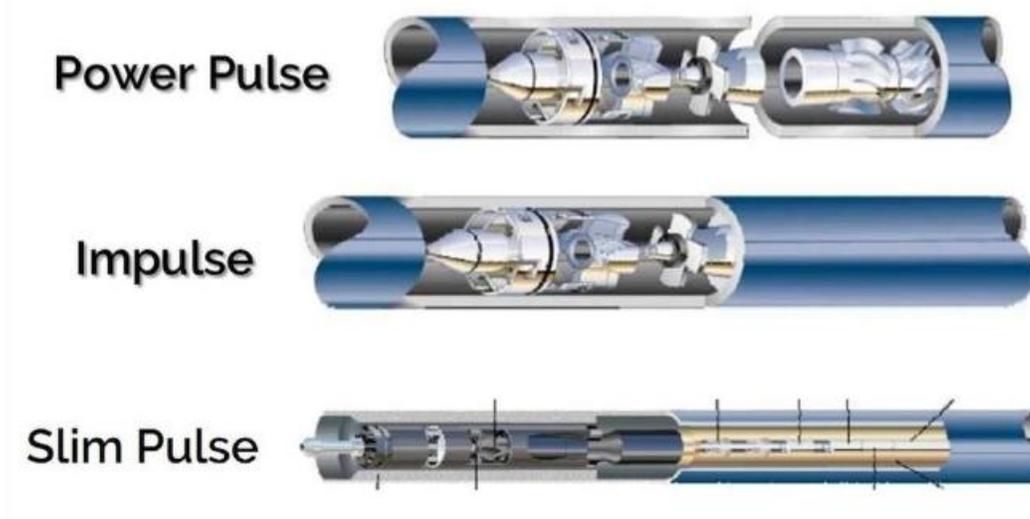


Fig. 12 Se muestra un equipo para la toma de registros eléctricos MWD (Perfoblogger, 2020)¹⁰



Fig. 13 Se muestra un equipo para la toma de registros eléctricos LWD (Perfoblogger, 2020)

¹⁰ Perfoblogger (10 de diciembre de 2020). Ejemplo de equipo MWD. wordpress.com. <https://perfoblogger.wordpress.com/2020/12/10/herramientas-mwd-lwd/>

Están también los registros que se toman a cable como los eléctricos, acústicos, radioactivos y los electromagnéticos como se observa en la Fig. 14, que también ofrecen características específicas como la evaluación de la cementación, en el caso de agujero entubado, pruebas de formación, desgaste de la tubería y en el caso de agujero descubierto se pueden tomar registros de inducción, neutrón compensado, densidad compensada, entre otros con la finalidad de conocer a detalle las características petrofísicas de la formación y las condiciones generales del pozo.

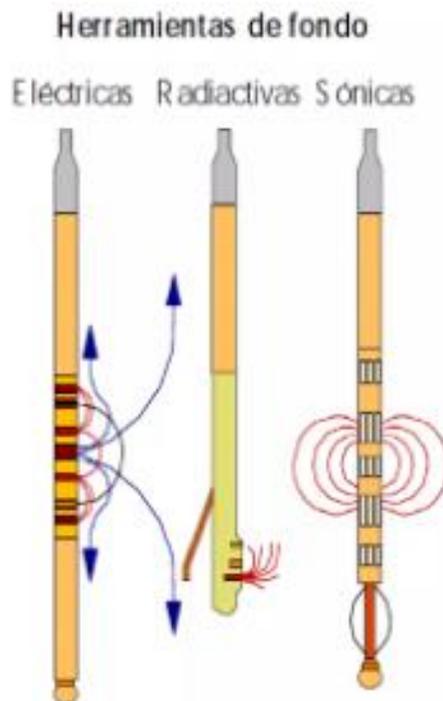


Fig. 14 Se muestra un equipo para la toma de registros a cable (PEMEX-Schlumberger, 2011)¹¹

Y también están los registros que se toman en superficie con los recortes que salen producto de la perforación, estos no son muy confiables debido ya que por la misma densidad de los recortes podrían salir con cierto atraso y no podrían mostrar de

¹¹ PEMEX-Schlumberger (2014). La sarta de perforación. Programa de entrenamiento acelerado para ingenieros supervisores de pozo.

forma clara los estratos a los que pertenecen o podrían llegar a confundir acerca de las litologías que se están perforando, pero siguen siendo de gran ayuda, sobre todo cuando los recortes tienen características específicas que se están buscando como podrían ser cimbras o bases e incluso rocas impregnadas de hidrocarburos.

Se debe tener en cuenta que los yacimientos carbonatados contienen cerca del 60% de las reservas petroleras del mundo derivado de ello se vuelve esencial analizarlos a detalle y ante la dificultad de analizar los yacimientos carbonatados debido a las heterogeneidades que presentan los yacimientos, normalmente se recurre a un planteamiento estadístico, el cual puede proporcionar información que puede aceptarse y que es obtenida mediante modelos matemáticos y las correlaciones con pozos vecinos o con similitudes en la litología.

3.5 Registros en carbonatos

Una de las rocas que presentan dificultad para interpretar los registros son las carbonatadas, en particular en el caso de los yacimientos en México también se les conoce como Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF)¹² y son formados en ambientes marinos que pueden ser planicies de marea hasta arrecifes y cuencas oceánicas profundas y son rocas sedimentarias no terrígenas más abundantes formadas por algas calcáreas o restos óseos de organismos marinos como foraminíferos y Moluscos.

Este tipo de yacimientos pueden tener una baja porosidad, pero con una alta permeabilidad o una alta porosidad con baja permeabilidad y la relación ideal para que un yacimiento sea considerado como altamente explotable es que la roca sea porosa y que tenga permeabilidad, es decir, que tenga la posibilidad de almacenar grandes cantidades de hidrocarburos y que además puedan fluir a través de la roca

¹² YNF es el nombre que se le asigna a los Yacimientos Naturalmente Fracturados compuestos principalmente por carbonatos.

los hidrocarburos, en el caso de los YNF la permeabilidad suele ser no tan alta, pero al ser fácilmente fracturados la permeabilidad se eleva y con ello la explotación se vuelve mucho más rentable.

En este tipo de yacimientos o formaciones suele presentarse el fenómeno de la pérdida total de circulación, esto se debe a que en ocasiones al perforar la misma presión que genera el peso de la sarta de perforación y el flujo del lodo de perforación provocan que se fracture la roca carbonatada y esto hace que el lodo de perforación comience a penetrar en la roca por las fracturas inducidas por la presión, en la práctica durante la perforación se busca siempre una formación específica para saber que se debe modificar la velocidad de perforación para evitar contaminar el yacimiento con el lodo y es ahí donde cobra gran importancia el uso de los registros eléctricos que están incluidos en la sarta de perforación como lo son el MWD y LWD ya que se puede monitorear en tiempo real tanto las condiciones del pozo como las formaciones que se van atravesando y con ello hacer más eficaz la perforación del pozo.

Capítulo 4. Análisis de los datos

4.1 Generalidades del pozo

El objetivo de los pozos originalmente había sido la búsqueda de hidrocarburos en la zona por parte de PEMEX, posteriormente el objetivo cambió con fines de exploración científica, *“la perforación es utilizada principalmente por la industria petrolera, pero también es una fuente muy rica de datos para los científicos”* (Urrutia-Fucugauchi 2019)¹³. Se ha logrado definir el centro del cráter y la formación del anillo de picos a causa del impacto del meteorito, también se busca entender por completo el comportamiento de las rocas durante los impactos, las modificaciones que se tiene en la biósfera tanto antes como después del impacto, el comportamiento hidrotermal, el volumen de polvo y gases producidos al momento del impacto, los efectos climáticos, la sedimentología post impacto y la determinación de las propiedades petrofísicas de las rocas antes y después de ser impactadas. Esto es posible gracias a que el Chicxulub está bien conservado debido al sepultamiento por sedimentos del Cenozoico y por ello se puede considerar único ya que conserva sus características generales, además de ser la única estructura de impacto bien preservada localizada en tierra, la cual brinda información importante para la exploración sísmica extraterrestre, además de servir como correlación en las estructuras en la luna y marte.

El pozo está ubicado al noroeste de la Plataforma carbonatada de Yucatán, en las latitudes 20°30'–21°00' N y longitudes 89°30'–90°00' W del meridiano de Greenwich como se muestra en la Fig. 15 y se encuentra a 60 km aproximadamente del centro del cráter, la localización también es de gran importancia porque también proporciona información valiosa acerca de los efectos del impacto porque *“hay una*

¹³ Urrutia, J. (2019). Programas internacionales de perforaciones en océanos y continentes. Gaceta Chicxulub, Volumen 2-3, (17-18). https://www.craterchicxulub.com.mx/wp-content/uploads/2020/04/Gaceta-Chicxulub-2.3_2019.pdf

relación muy importante entre la presencia del cráter de Chicxulub y los campos súper gigantes de petróleo” (Ortiz-Alemán 2019)¹⁴, lo cual es de vital importancia para continuar comprendiendo el comportamiento y las complejidades de los campos petroleros de México y del mundo.

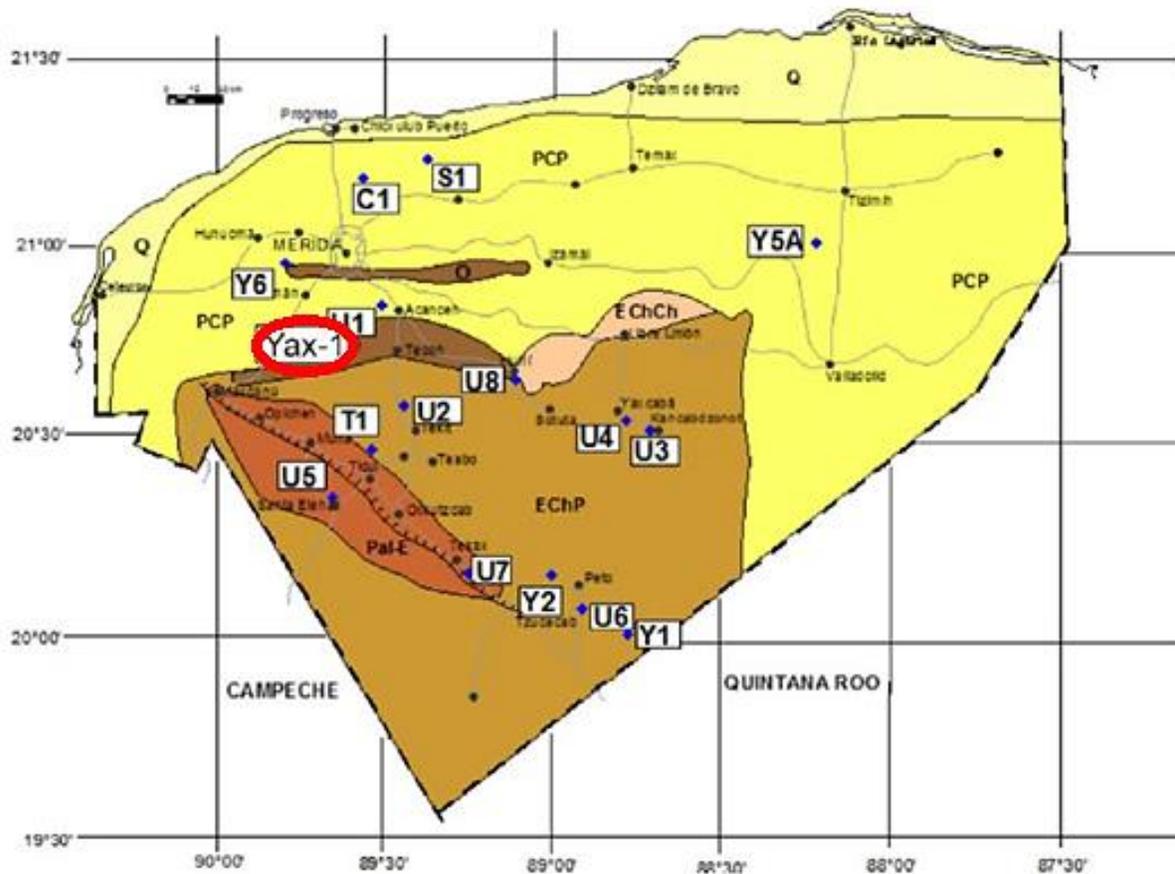


Fig. 15 Se muestra la ubicación del pozo Yaxcopoil-1 y otros pozos perforados en la zona.

La Fig. 16 cobrará importancia más adelante en el presente trabajo porque puede ayudar a correlacionar pozos futuros y con ello lograr predicciones más acertadas acerca de las litologías que pueden ser encontradas y por lo tanto perforadas.

¹⁴ Ortiz, J. (2019). Programas internacionales de perforaciones en océanos y continentes. Gaceta Chicxulub, Volumen 2-3, (17-18). https://www.craterchicxulub.com.mx/wp-content/uploads/2020/04/Gaceta-Chicxulub-2.3_2019.pdf

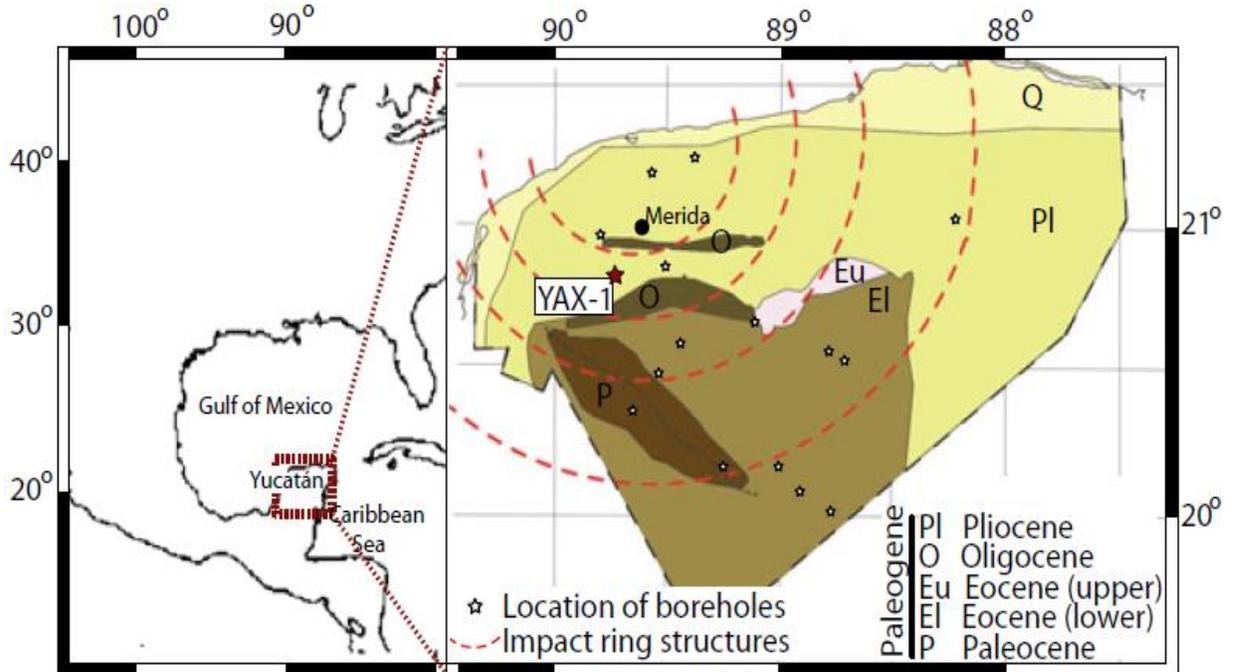


Fig. 16 Se muestra la ubicación del pozo Yaxcopoil-1 con respecto al cráter de impacto modificado después de Rebolledo-Vieyra and Urrutia Fucugauchi 2004.

4.2 Estructura de impacto

Resulta de vital importancia conocer la geometría de los cráteres de impacto producidos por los meteoritos y las consecuencias que este trae en la geología regional y sus efectos, por lo que es necesario conocer las etapas de la formación de un cráter para entender cómo se modificó la geología que rodea la zona de impacto y si además tuvo consecuencias en regiones más alejadas.

La primera etapa es el contacto y la compresión, hace referencia precisamente al contacto del meteorito con la superficie, en este caso con la superficie terrestre, y enseguida se comprime por la velocidad con la que impacta, cuando la resistencia que genera la superficie impactada desacelera el meteorito, este debió haber penetrado la superficie al menos dos veces su diámetro (Ormö *et al.* 2013), para ello el meteorito debió haber liberado casi toda su energía cinética, después se

descomprime generando una mezcla de materiales tanto del meteorito como de la superficie que fue impactada, esto genera el desplazamiento de grandes fragmentos de roca que son expulsados de la zona en forma radial.

La segunda etapa es la excavación, esta etapa dura apenas unos segundos, pero para el cráter de Chicxulub se estimó cerca de un minuto ya que el diámetro es de aproximadamente 150 km y la velocidad se calculó mayor a la del sonido, esta etapa es la que sigue después de la descompresión (Barton et al. 2010), en esta etapa la roca tiende a fundirse por la velocidad y se genera el aumento del cráter y toda la energía que tenía el meteorito fue transferida en forma de ondas de choque a la superficie la cual desplazará material de forma semiesférica o esférica si es tomado en cuenta el material que se conoce como eyecta y que viaja hacia arriba y se deposita en forma radial al impacto.

La tercera etapa es la modificación y podría considerarse que una vez que los materiales han terminado de caer termina la modificación inicial (French 1998), la modificación intermedia es cuando la superficie intenta regresar a su posición original, pero ocurre un ligero levantamiento del suelo en el lugar de impacto y posteriormente la zona impactada intentará volver abajo y es ahí donde se generan cambios laterales y eso deriva en las fallas o fracturas de la zona circundante al cráter y se debe a que, al no existir más el meteoro, la superficie buscará regresar a su posición original y a la posición impactada hasta agotar la energía producida por el impacto.

La Fig. 17 ilustra las etapas de formación de un cráter complejo, que es el tipo que se generó y justo en las fallas en donde se localiza el pozo Yaxcopoil-1 y tiene varias similitudes con los yacimientos petroleros de la Sonda de Campeche, aunque la formación de esta última no es por el mismo evento geológico sino por la apertura del Golfo de México, la cual generó efectos similares, aunque no de forma radial.

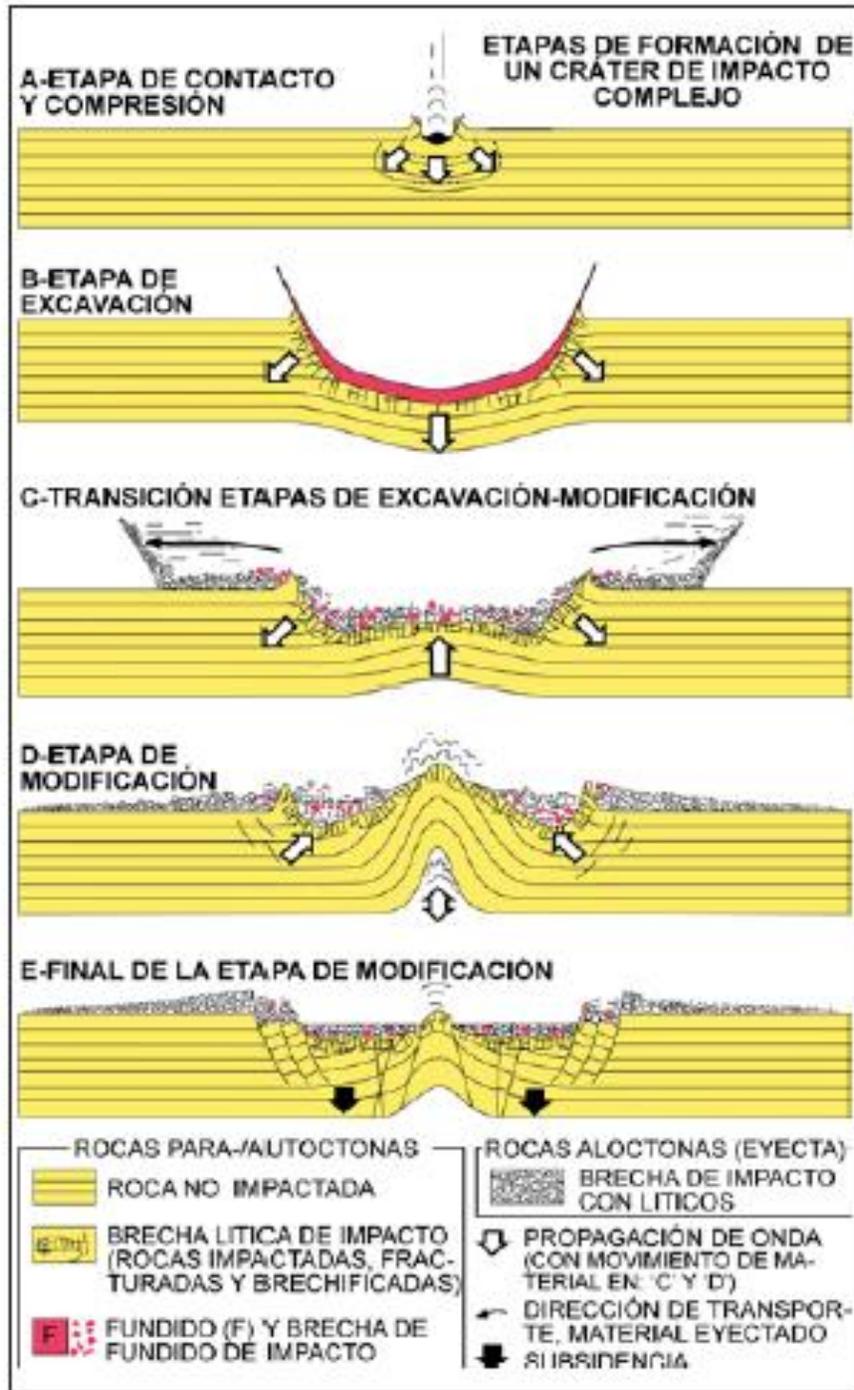


Fig. 17 Ilustra las etapas de formación de cráteres de impacto.

La Fig. 18 muestra algunos cráteres formados fuera del planeta Tierra y que gracias a los telescopios se han logrado documentar, se debe tomar en cuenta que la

mayoría de los meteoros que llegan a impactar la tierra son desintegrados casi al momento de hacer contacto con la atmósfera terrestre si estos no tienen una velocidad superior a la del sonido y en el mejor de los casos, el meteoro se fragmenta y se convierte en pequeños meteoros que no generan gran impacto en la superficie del planeta aunque pueden dar lugar a campos de meteoros, el anillo de picos se usa para describir el anillo montañoso, a menudo discontinuo, que se eleva sobre el suelo de los grandes cráteres, como los que se formaron en la luna.

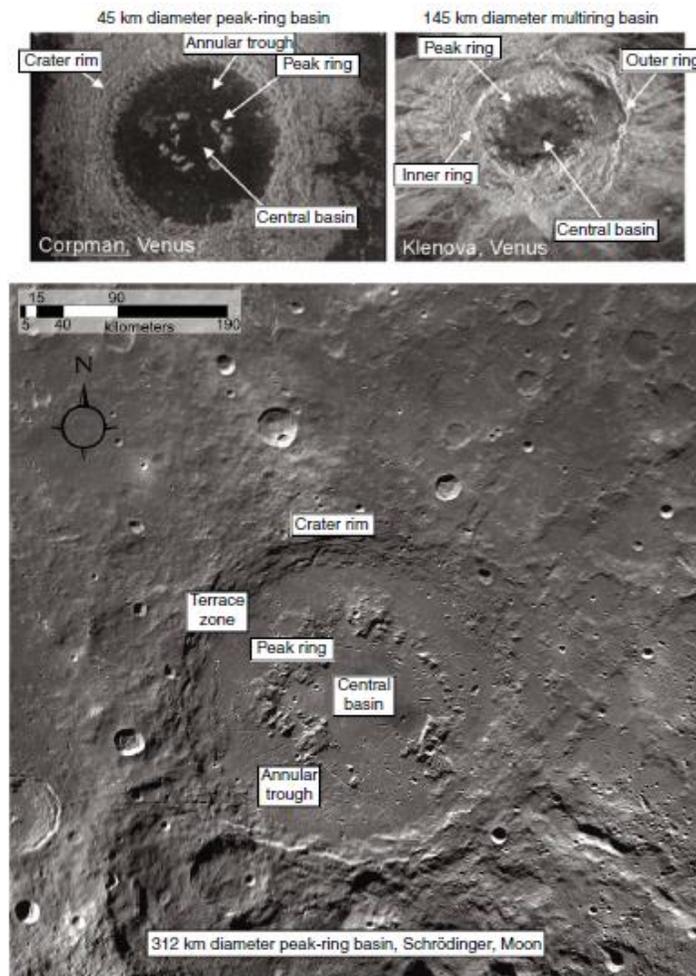


Fig. 18 Se muestran imágenes de cráteres de impacto y sus componentes, crédito a la National Aeronautics and Space Administration NASA¹⁵.

¹⁵ National Aeronautics and Space Administration (NASA), la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio es una dependencia del gobierno de los Estados Unidos de América que se encarga de estudiar y documentar acontecimientos tanto en la Tierra como en el espacio.

Los anillos de picos son internos al borde del cráter topográfico principal desde que se identificaron por primera vez en la Luna se han observado anillos de picos en grandes cráteres terrestres, los anillos máximos no parecen ocurrir en los satélites helados de Júpiter y Saturno, lo que puede indicar que la reología de la corteza influye en la formación.

El anillo de picos es una característica que sobresale a través del derretimiento del impacto y la brecha que recubre el suelo del cráter y se eleva sobre el terreno teniendo como resultado la identificación de un anillo de picos, en los cráteres más grandes de la Tierra es complicado identificarlos debido a la erosión y/o tectonismo, el cráter de Chicxulub es el mejor preservado y la mitad se encuentra en tierra y la otra mitad se encuentra bajo las aguas del Golfo de México.

El cráter de impacto está enterrado a unos cientos de metros con sedimentos del Cenozoico y la localización actual del límite Cretácico-Paleógeno (K-Pg) se profundiza a ~1 s de tiempo de viaje en ambos sentidos (~1 km), lo que indica que el diámetro es de ~145 km (Morgan y Warner, 1999) con fallas en forma de anillo que alcanzan diámetros >200 km (Gulick *et al.*, 2008).

Diversos estudios sugieren que Chicxulub es una cuenca de anillos múltiples (Morgan *et al.*, 1997; Gulick *et al.*, 2008), los datos sísmicos muestran que la profundidad del agua era más profunda y los sedimentos mesozoicos más gruesos en el cuadrante noreste del cráter (Bell *et al.*, 2004; Gulick *et al.*, 2008) y que la variación lateral podría explicar la asimetría actual del cráter (Collins *et al.*, 2008).

Dada la falta de anillos de picos intactos expuestos en la superficie de la Tierra, no hay consenso en cuanto a su naturaleza geológica, es decir, de qué material están compuestos y de qué ubicación estratigráfica se origina este material o el modo de formación de un anillo de picos, las simulaciones numéricas de la formación de grandes cráteres sugieren que se forman durante el colapso de una profunda

cavidad transitoria en forma de cuenca formada durante las etapas iniciales de formación de cráteres (Morgan *et al.*, 2000; Collins *et al.*, 2002)., durante este colapso, el levantamiento estructural del suelo del cráter produce un levantamiento central, que es demasiado elevado e inestable, el siguiente colapso hacia afuera del levantamiento central de alguna manera conduce a la formación de un anillo de picos entre el centro del cráter y el borde del cráter (Morgan *et al.*, 2000, 2011)

4.3 Impactos en la biosfera

Siempre que ocurre un impacto por un meteoro en la superficie terrestre pueden generarse efectos negativos en la biosfera porque se genera una elevación de la temperatura en el sitio, lo que puede generar la muerte de muchas especies en la zona del impacto y en las zonas aledañas, aunque también pueden generarse un aumento de la vida microbiana derivada de las fracturas que se generan por el impacto (Cockell *et al.*, 2002, 2005), por lo que es necesario realizar estudios para determinar si existen biofirmas y biomarcadores de lípidos (Cockell *et al.*, 2005; 2009; Coolen y Overmann, 2007; Coolen *et al.*, 2013), una de las técnicas usadas es la del isótopo de hierro que se emplea en rocas antiguas que sufrieron un proceso fuerte de metamorfosis o alteración (Yamaguchi *et al.*, 2005), podría atribuirse al impacto de un meteoro, la biosfera rehabilitada después del impacto puede proporcionar información valiosa acerca de la posibilidad de que tanto el anillo de picos como la brecha fueran ambientes propicios para la vida temprana en el planeta (Kring y Cohen, 2002; Bryce *et al.*, 2015).

Se relaciona de forma directa al impacto de Chicxulub con la extinción masiva generada en el límite del Cretácico y el Paleógeno (K-Pg), en la década de los 70's Walter Álvarez atribuyó al impacto la extinción masiva documentada ya que alrededor del 75% de las especies marinas y terrestres desaparecieron de manera súbita. Esto pudo ser debido a que se detuvieron los procesos de fotosíntesis de las plantas y del plancton debido a que como consecuencia del impacto del meteoro en

cual se estima que viajaba a una velocidad de 20 km por segundo, que tenía un diámetro de 10km y que creó un cráter de 100 km aproximadamente con una profundidad de 30 km casi perforando en su totalidad la corteza terrestre como se muestra en la Fig. 19 (Artemieva y Morgan 2009). Se generó una cortina de partículas, polvo y gases que dieron lugar a un efecto pantalla, impidiendo el paso de la luz solar a la superficie terrestre, se puede considerar que justo después del impacto el océano estaba probablemente estéril de forma local. Después de que enfrió el sistema hidrotermal inducido por el impacto, las condiciones necesarias para la vida mejoraron y la biota marina pudo regenerarse, aunque se ha logrado documentar que en el límite K-Pg existió un evento que marcó el fin de una era de forma abrupta y que dio paso a nuevas especies adaptadas al nuevo ambiente tanto marino como terrestre.

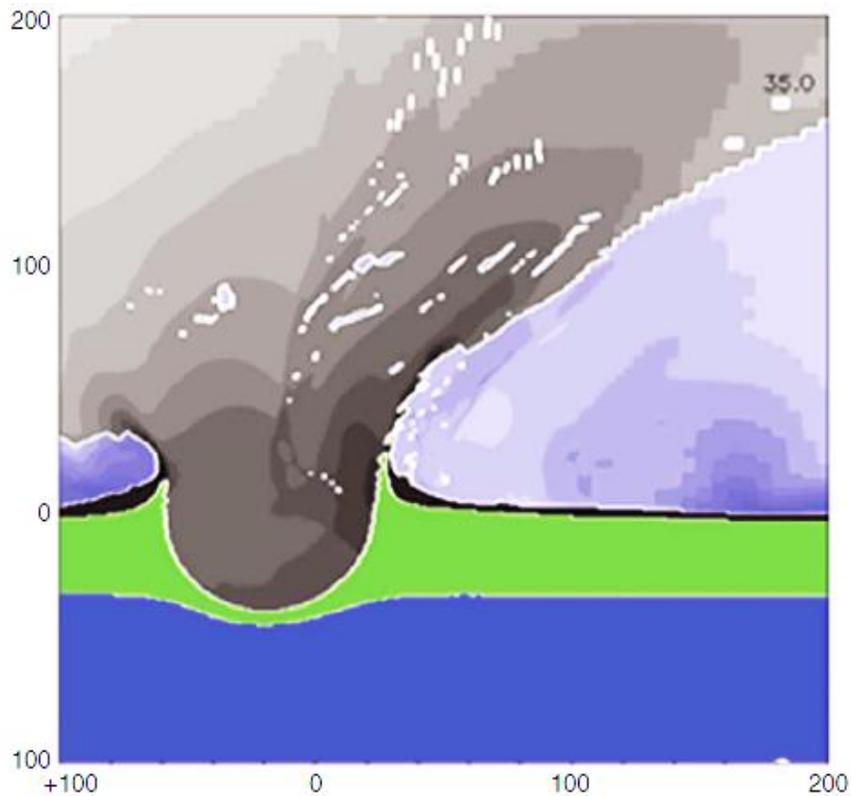


Fig. 19 Se muestra en color azul marino el manto, en color verde el basamento, en azul claro la atmósfera y en color gris proyectiles y sedimentos.

4.4 Propiedades petrofísicas de las rocas

Las propiedades iniciales de las rocas son las que se generan en un ambiente de plataforma carbonatada donde el depósito principal son los restos óseos o esqueléticos de las especies que vivían en la zona y que conforman la litología derivado de muerte natural de los microorganismos y su depósito en la zona. Esto genera un tipo de rocas sedimentarias carbonatadas que tiene como componente principal al carbonato de calcio (CaCO_3) producto de los esqueletos de los microorganismos que murieron en el lugar, este tipo de roca representa alrededor del 30% de los registros sedimentarios en el planeta y pueden clasificarse como calizas, dolomías y margas.

Se pueden identificar por ser reactivas con el ácido clorhídrico (HCl) por sus propiedades químicas, se puede entender la reacción como:



Carbonato de calcio + Ácido clorhídrico \rightarrow Cloruro de calcio + Agua + Bióxido de carbono

Es debido a esta reacción que cuando se suministra el ácido clorhídrico ¹⁶ sobre las muestras obtenidas de la perforación, se observa el desprendimiento de burbujas de gas a través de un líquido y esto es debido a que, al combinarse los dos reactivos, el carbonato de calcio contenido en las rocas y el ácido clorhídrico se genera como producto cloruro de calcio, agua en estado líquido y bióxido de carbono en estado gaseoso y es por eso que se observa su reacción química generando burbujas.

Es importante tener en cuenta que los efectos específicos del impacto de un meteorito en las propiedades petrofísicas de una roca pudieron surgir de varios factores, como el tamaño y la velocidad del meteorito, la composición mineralógica

¹⁶ En los trabajos de campo es una práctica común para poder identificar a rocas sedimentarias de origen calcáreo, debido a la reacción descrita

de la roca afectada y las condiciones ambientales en el momento del impacto, además la extensión de los cambios en las propiedades petrofísicas también puede variar dependiendo de la distancia desde el punto de impacto y la profundidad que alcanza la excavación y estudiar estas rocas puede brindar información valiosa sobre los efectos de los impactos de meteoritos y proporcionar conocimientos sobre la evolución geológica de la Tierra y otros cuerpos celestes.

La litología que se generó después del impacto está compuesta por un conjunto de rocas sedimentarias como arcillas, lutitas negras, margas oscuras, limolitas y calizas que a su vez se dividen en wackestone, packstone y grainstone según la clasificación de Dunham, 1962 que se ilustra en la Fig.20, la mayoría de las litologías son de grano fino, del tamaño de la arcilla al limo, texturas laminadas planas a onduladas.

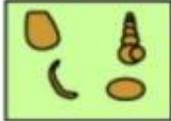
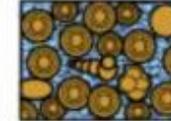
Componentes originales no unidos durante la sedimentación				Componentes originales unidos durante el desarrollo de una bioconstrucción
Con barro micrítico		Sin barro micrítico		
Matriz-soportado		Grano-soportado		
< 10% granos	> 10% granos			
MUDSTONE	WACKESTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE
				

Fig. 20 Se muestra la clasificación según Dunham, 1962¹⁷.

¹⁷ La clasificación presentada ha sido modificada a través del tiempo para tener una mejor clasificación de texturas depositacionales, las modificaciones se han llevado a cabo por Hallsworth & Knox (1999), y Embry & Klovan (1971).

Después del impacto las rocas tuvieron un efecto significativo en sus propiedades petrofísicas, el meteorito que impactó la superficie de la Tierra a velocidad extremadamente alta generó enormes fuerzas y temperaturas en el lugar del impacto, el evento provocó cambios en la estructura y composición mineralógica de la superficie afectada, creando una brecha con los restos del impacto que poco a poco se fueron depositando, las propiedades que se vieron afectadas fueron:

La porosidad (\emptyset): de forma natural es el volumen que existe entre los granos de las rocas se muestra un ejemplo en la Fig.21, que se estima en porcentaje o fracción decimal, puede ser porosidad primaria, la que se forma de manera natural por deposición de los granos, porosidad secundaria que pudo formarse por fracturas o por la disolución de una parte de los granos, el cemento, los cristales o incluso las especies depositadas en los ambientes carbonatados. Existe también la porosidad efectiva la cual permite el flujo de fluidos y la porosidad no efectiva no permite el flujo de fluidos.

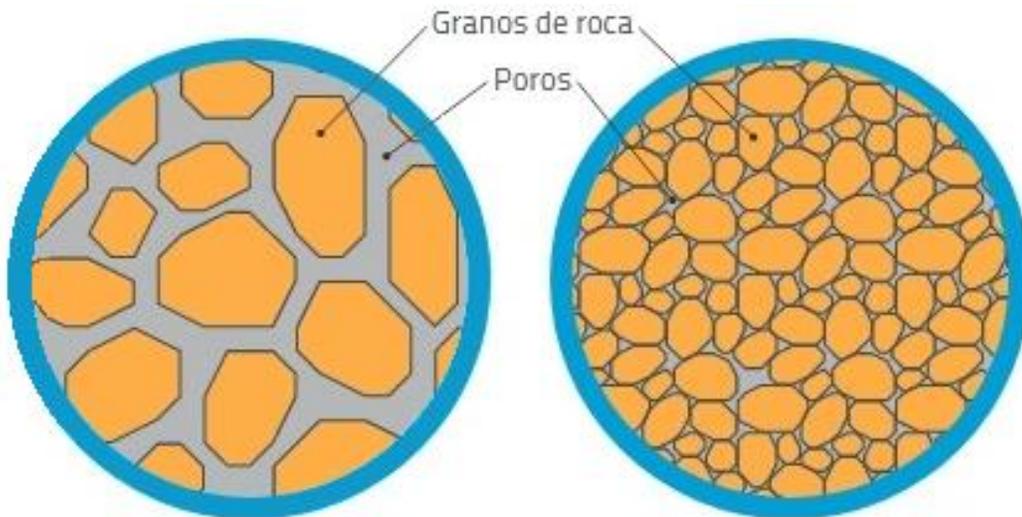


Fig. 21 Se muestra un esquema de los granos de las rocas y los poros que se encuentran entre ellos.

El impacto del meteorito puede fracturar la roca y crear nuevos poros, o incluso aumentar la porosidad que ya existía, esto pudo haber permitido la entrada y almacenamiento de fluidos en la roca que antes no estaban presentes.

La permeabilidad: es la capacidad de una roca para permitir el flujo de fluidos a través de ella, esta propiedad pudo incrementarse al generarse fracturas o fisuras por el impacto, la Fig. 21 muestra del lado izquierdo una roca que además de ser porosa es permeable, la del lado derecho muestra una roca que posee una baja porosidad y una baja permeabilidad. Debe recordarse que por lo menos para un sistema petrolero es como se muestra en la Fig. 22, la permeabilidad pudo haberse mejorado al impactarse el meteorito ya que la energía que se liberó fue demasiada y pudo generar fracturas o canales con lo que esta propiedad se modificó, lo que significa que los fluidos podrían fluir más fácilmente a través de ella.

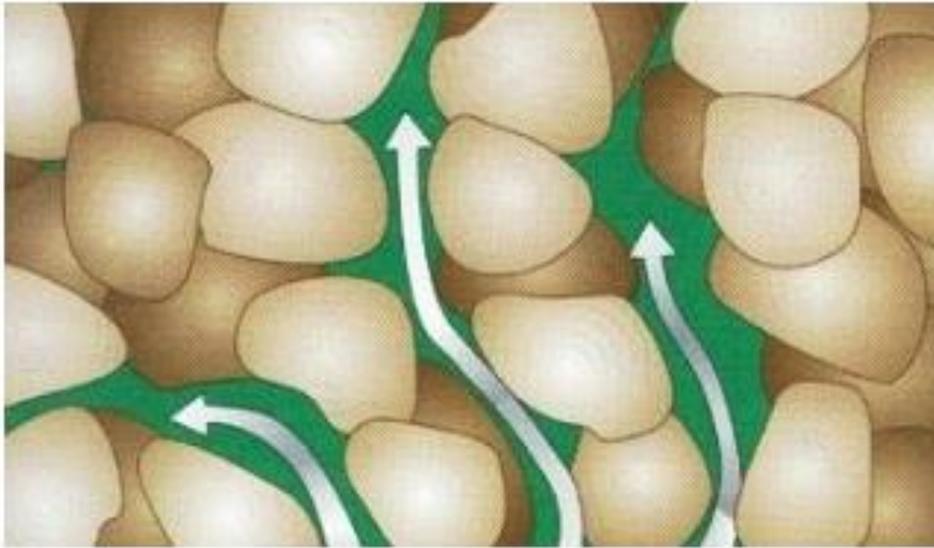


Fig. 22 Se muestra un esquema de los granos de las rocas, los poros y se ilustra la permeabilidad.

La resistividad eléctrica: la composición mineralógica de la roca alterada podría afectar la resistividad eléctrica de la roca, lo que tiene limitaciones en la detección y caracterización de fluidos mediante técnicas de registro eléctrico en pozos.

Velocidad de onda sísmica: los cambios en la estructura interna de la roca debido al impacto pueden alterar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, lo que afectaría las interpretaciones sísmicas.

4.5 Sección sísmica

Una sección sísmica es una representación gráfica de los datos sísmicos recopilados a lo largo de una línea en el subsuelo, estos datos son obtenidos mediante técnicas de prospección sísmica, que implican la generación de ondas sísmicas artificiales y la detección de las ondas reflejadas y refractadas que atraviesan las diferentes capas geológicas.

El proceso de obtención de una sección sísmica comienza con la emisión de una fuente de energía sísmica, estas ondas sísmicas se propagan a través de las diferentes formaciones geológicas del subsuelo y al encontrar capas con diferentes propiedades, una parte de la energía se refleja hacia la superficie, mientras que otra parte se refracta y sigue propagándose, estas ondas reflejadas y refractadas son recogidas por sensores llamados geófonos o hidrófonos para el caso de los empleados en el mar, que están colocadas en una línea conocida como perfil sísmico un ejemplo se observa en la Fig. 23.

El tiempo que tarda cada onda en regresar a la superficie después de su emisión se registra y se procesa para convertirlo en una representación gráfica, la sección sísmica, en esta sección, el eje vertical muestra la profundidad a la que se encuentran los estratos identificados y el eje horizontal representa la distancia a lo largo del perfil sísmico.

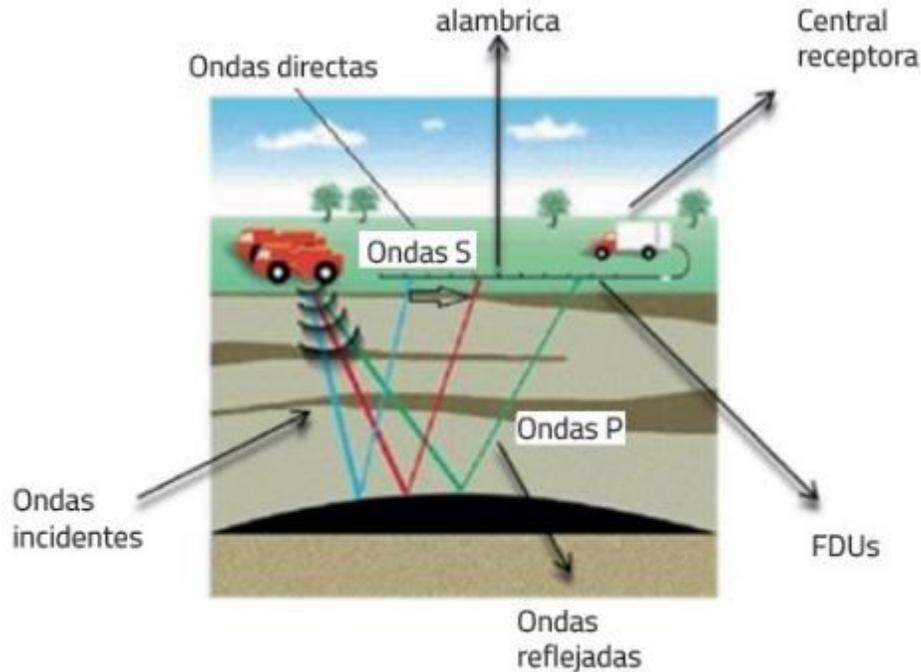


Fig. 23 Se muestra un esquema para la toma de secciones sísmica (Paz-Penangos *et al.* 2016)¹⁸

La sección sísmica proporciona una visión en profundidad de la estructura geológica del subsuelo y es ampliamente utilizada en la industria del petróleo y gas, la minería, la geología, la ingeniería geotécnica y en otros campos para identificar estructuras geológicas, evaluar la presencia de recursos naturales, localizar yacimientos de hidrocarburos, caracterizar acuíferos, estudiar fallas tectónicas, realizar evaluaciones de riesgo sísmico, conocer formaciones de interés científico, entre otros usos. La interpretación de una sección sísmica requiere habilidades y experiencia especializada en geofísica y geología para obtener conclusiones y tomar decisiones informadas.

Cuando se trata de conocer la zona que se va a perforar los datos de reflexión sísmica ofrecen información valiosa ya que permite obtener un panorama, si no exacto, por lo menos aproximado de los tipos de formaciones a atravesar, en el caso

¹⁸ Paz-Penangos, H. (2016). DESARROLLO Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE RADIO TELEMETRÍA PARA ADQUISICIÓN SÍSMICA. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 27, núm. 1, pp. 111-130, 2017. Universidad Militar Nueva Granada. <https://www.redalyc.org/journal/911/91149521007/html/>

del cráter de Chicxulub resulta importante conocer la zona a perforar debido a que se busca caracterizar la estructura de impacto, como se observa en la Fig. 24. La estratigrafía anterior al impacto, se observa relativamente imperturbada y plana, se desplaza abruptamente verticalmente en 400–500 m (anillo exterior), las fallas del anillo exterior se observan a distancias radiales de 90 a 120 km, lo que da un diámetro de cráter de ~195 a 210 km (Morgan *et al.*, 1997; Gulick *et al.*, 2008).

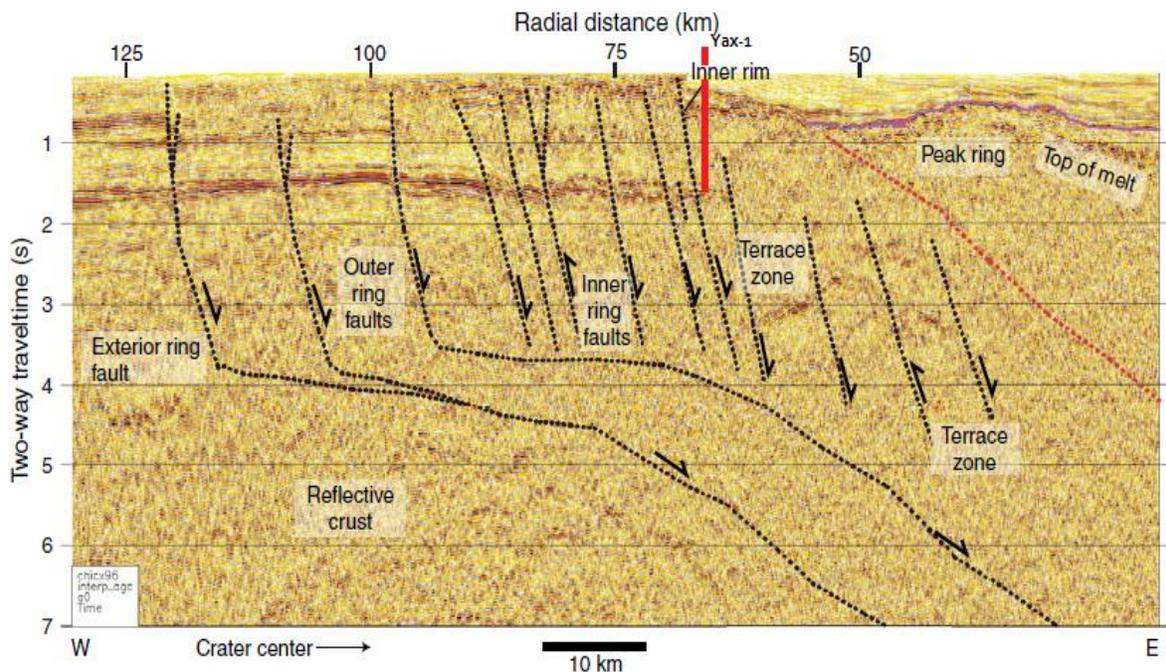


Fig. 24 Se muestra los datos de reflexión sísmica a lo largo de Chicx-A, ubicado entre 20 y 30 km del centro del cráter, modificado de (Gulick, S. *et al.*, 2008)¹⁹ de Nature Geoscience.

Al ubicar el pozo Yaxcopoil-1 en la sección sísmica a 60 km aproximadamente de distancia del centro de cráter se puede ubicar sobre el borde interior, justo afuera del anillo de picos, se debe recordar que el cráter tiene aproximadamente forma circular, por lo que se puede asumir que si se tiene una sección sísmica que se ha tomado desde el centro y hasta la parte lejana del cráter, entonces se puede

¹⁹ Gulick, S. (2017). Chicxulub: drilling the K-Pg impact crater. International Ocean Discovery Program Expedition 364 Preliminary Report, 2017.

suponer que la posición que ocupa es la que se indica en la sección aunque para tener certeza de la sección sísmica se debe tomar en el pozo en estudio.

4.6 Columna estratigráfica

Una columna geológica es una representación estratigráfica vertical de las diversas capas de rocas que conforman una secuencia geológica en un área específica, estas capas, también conocidas como estratos, se forman a lo largo del tiempo debido a la acumulación de sedimentos, rocas ígneas o metamórficas y eventos geológicos en la historia de la Tierra un ejemplo se observa en la Fig.25. Una columna geológica típica muestra las unidades geológicas más antiguas en la base y las más jóvenes en la parte superior, lo cual es conocido como cimbras y bases, cada estrato representa un período de tiempo geológico específico y suele contener características distintivas que permiten a los geólogos correlacionarlos con otras áreas o con unidades geológicas conocidas en la escala global.

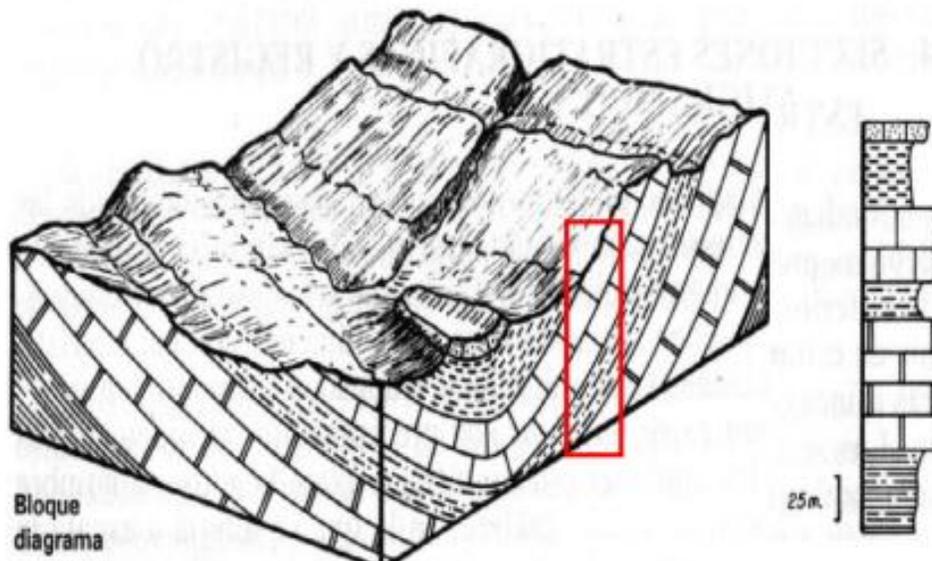


Fig. 25 Se muestra el esquema de una formación y la sección estratigráfica²⁰

²⁰ Como se puede observar, la columna geológica no muestra la posición real de los estratos, solo muestra las litologías que se atravesaron.

Las unidades se suelen etiquetar con nombres que indican su edad y composición, lo que ayuda a identificar y describir diferentes formaciones y sucesos geológicos en el área de estudio, se pueden incluir símbolos y representaciones gráficas para indicar la presencia de fósiles, minerales importantes u otros datos de interés geológico.

Cuando hay espacios más reducidos o afloramientos locales, la sucesión de estratos real y parcial allí existente, recibe el nombre de sección estratigráfica y es una porción de la columna geológica completa.

Las columnas geológicas son herramientas fundamentales para la interpretación de la historia geológica de una región específica y para comprender cómo ha evolucionado el paisaje y los ambientes a lo largo del tiempo, estas representaciones también son valiosas para la prospección de recursos naturales, como petróleo, gas, agua subterránea y minerales, ya que permiten identificar las formaciones geológicas que podrían contener estos recursos, pueden presentarse en diferentes formas, como gráficos verticales o perfiles sísmicos, dependiendo del propósito y la escala del estudio geológico.

Resulta importante conocer a detalle las columnas geológicas de la zona para poder describir de manera adecuada las estructuras y poder inclusive realizar correlaciones y poder generar modelos más acertados y precisos para con ello generar mejores prácticas antes, durante y después de la perforación de pozos futuros en la zona para el estudio. Los pozos de los cuales se ha obtenido información y que se muestran en la Fig.26, para poder realizar modelos tridimensionales que puedan ofrecer datos precisos acerca de las posibles litologías que se encuentran en la zona y poder de esa forma construir un programa de perforación donde se puedan incluso desarrollar pozos que sean direccionales para poder obtener la mayor cantidad de información incluso de las inclinaciones de los anillos de picos que fueron generados durante el impacto del meteoro.

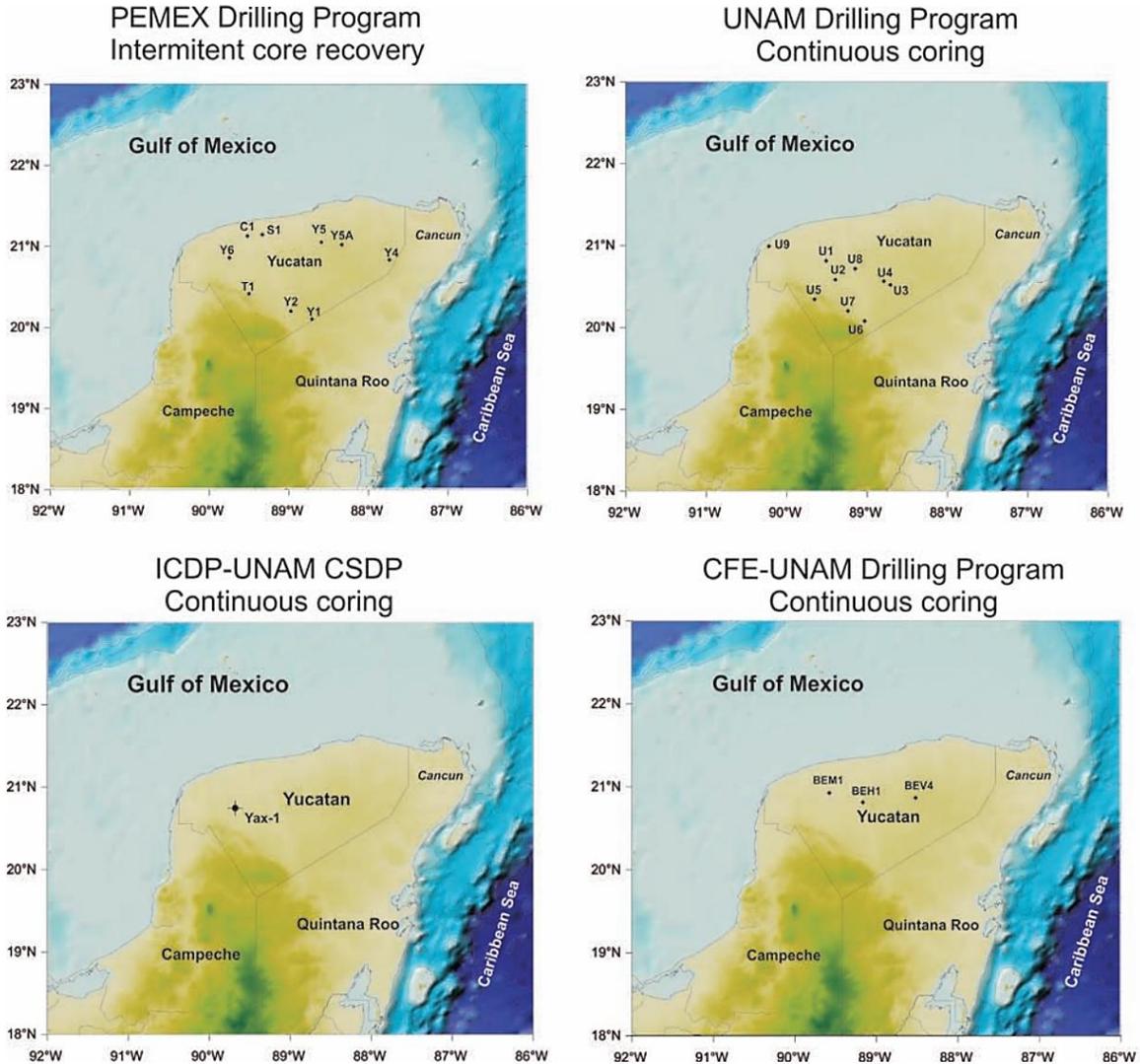


Fig. 26 Se muestran las ubicaciones de los pozos perforados en la parte terrestre de la Plataforma de Yucatán (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996, 2008). , se pueden observar en la parte superior izquierda los nueve pozos perforados por PEMEX²¹, en la parte superior derecha se muestran los ocho pozos perforados por la UNAM²², en la parte inferior izquierda se muestra el pozo perforado por la ICDP²³ y en la parte inferior derecha se observan los tres pozos perforados por la CFE²⁴ y la UNAM.

²¹ PEMEX son las siglas de Petróleos Mexicanos donde la recuperación de núcleos fue intermitente.

²² UNAM son las siglas de Universidad Nacional Autónoma de México y en ese programa de perforación se tuvo una recuperación continua de núcleos.

²³ ICDP son las siglas de International Continental Scientific Drilling Program, que es el Programa Internacional Continental de Perforación Científica y en esa perforación también se tuvo una recuperación continua de núcleos.

²⁴ CFE son las siglas de la Comisión Federal de Electricidad y en ese programa de perforación también se tuvo una recuperación continua de núcleos.

Para simplificar la información que se tiene de las columnas geológicas de los pozos existentes y que se muestran en las Fig. 27 y Fig.28, se generará una tabla donde se concentren las profundidades de las columnas y otra donde se muestren las ubicaciones de los pozos y su distancia respecto al centro del cráter para poder obtener sus coordenadas geográficas y con ello generar una vista 3D.

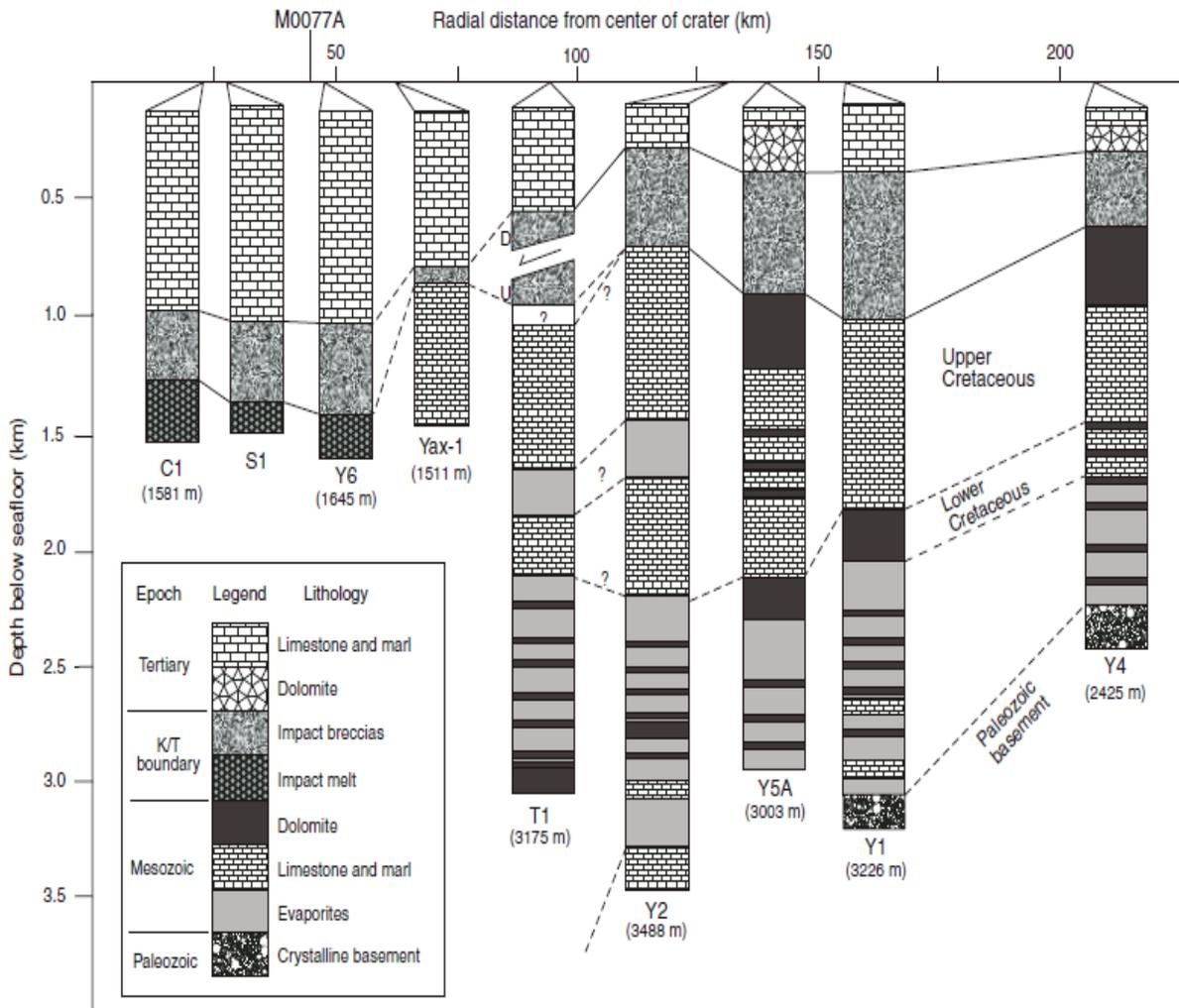


Fig. 27 Se muestran las columnas litológicas y la estratigrafía de los pozos perforados²⁵ por PEMEX y el pozo Yaxcopoil-1 perforado por la ICDP (modificado de López Ramos, 1975; Ward *et al.*, 1995; Rebolledo-Vieyra and Urrutia-Fucugauchi, 2004).

²⁵ Urrutia, J. et al, (2010). The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Edición 2011, (99-127).

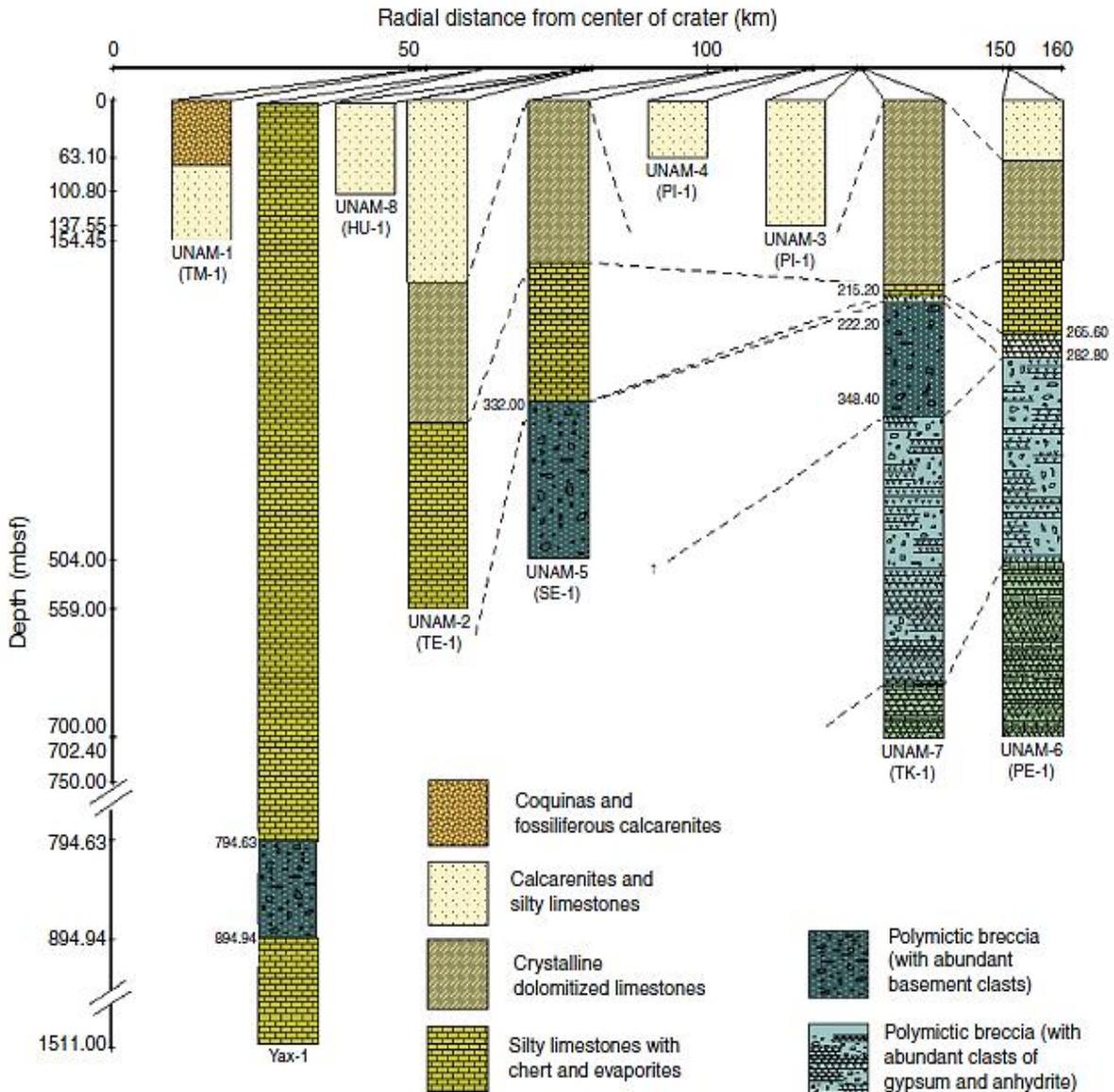


Fig. 28 Se muestran las columnas litológicas y la estratigrafía de los pozos perforados²⁶ por la UNAM y el pozo Yaxcopoil-1 perforado por la ICDP (modificado de López Ramos, 1975; Ward *et al.*, 1995; Rebolledo-Vieyra and Urrutia-Fucugauchi, 2004) .

Se generará otra tabla donde se mostrarán los pozos realizados por PEMEX y después los pozos perforados por la UNAM en el orden de las Fig. 27 y Fig. 28 con las profundidades y con las coordenadas aproximadas se podrá construir una vista

²⁶ Urrutia, J. et al, (2010). The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Edición 2011, (99-127).

de las formaciones en un modelo tridimensional para poder hacer las inferencias acerca de las posibles perforaciones futuras, para tener la información con una característica adicional se generará otra tabla que mostrará los pozos ordenados por la cercanía al cráter y con ello poder realizar observaciones adicionales.

4.7 Síntesis de la perforación

Durante la perforación de pozos petroleros, pueden surgir una variedad de problemas que representan desafíos técnicos y operativos como las presiones anormales altas o bajas lo que puede llevar al colapso del pozo o al fracturamiento de la formación y con ello generar inestabilidad en el pozo lo que constituye un riesgo en las operaciones de perforación y que puede generar que se tenga que programar una reparación menor o mayor.

El atrapamiento de la barrena producto de la inestabilidad del pozo y por posibles derrumbes dentro de el, esto puede ser generado por un mal trazado del ángulo de perforación, en el caso de los pozos direccionales.

El “dog leg” es otro problema que se puede presentar y puede ser producido por varios factores, uno que la presión de la formación ceda en alguno de los estratos que se perforan, otro es la mala planeación del programa y generar fracturamiento hidráulico, otro es que en el diseño del pozo no se respete la inclinación máxima de 3° cada 100 ft como se muestra en la Fig. 29, entre otros.

La pérdida de circulación que también puede deberse a varios factores, el más común es debido a una gran porosidad de la roca perforada o a las fracturas de la formación, ya sean naturales o inducidas por el mismo proceso de perforación.

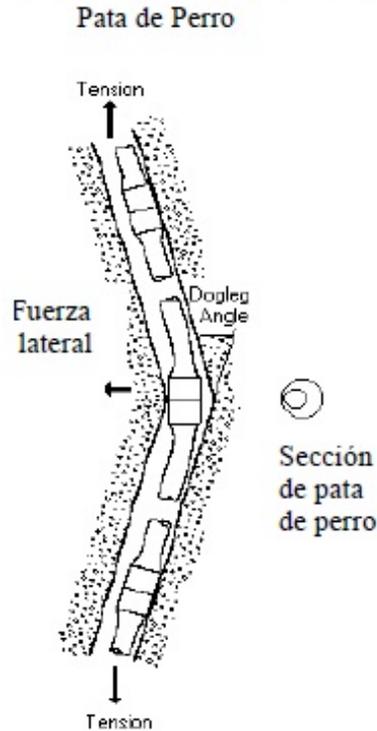


Fig. 29 Se muestra un esquema del "dog leg" que puede presentarse en la perforación direccional.

Es por esto que el perforar pozos direccionales se convierte en un reto para la industria ya que si ocurre un error mínimo puede desencadenar una serie de operaciones que retrasan el proceso o en el caso más grave, la pérdida de la barrena por atascamiento lo que llevaría a emplear el "Tubing punch" que es el último recurso para liberar la mayor cantidad de tubería posible y volver a intentar perforar hasta el objetivo trazado.

En la perforación del pozo Yaxcopoil-1 se tenía un presupuesto limitado por lo que no eran convenientes las operaciones de contingencia y se debía nuclear a partir de los 400 m (terciario) y hasta la profundidad total (PT)²⁷, se emplearon los aparejos de perforación IDECO y el sistema híbrido DOSECC, ambos sistemas permiten la recuperación continua de núcleos mientras que la sonda de registros permanece en la perforación para evitar pérdida de tiempo en viajar de la profundidad final hasta

²⁷ (PT) Profundidad total, es un término usado para indicar la profundidad final de un pozo.

la superficie y de regreso, con eso minimizar los NPT's²⁸ que pueden acrecentar el costo del proyecto.

Las operaciones se llevaron a cabo conforme a lo planeado hasta los 392 m, es decir, se perforó sin ningún problema operativo aparente y a partir de ahí se realizó el proceso de nucleado para la recuperación continua, se empleó un sistema de cable metálico HQ de 96 mm con columna de sondeo incluida y hasta la profundidad de 980 m, la siguiente fase fue nucleada hasta la PT de 1510.9 m con un sistema más pequeño NQ de 76 mm, con estos procedimientos se lograron recuperar el 98% de los núcleos lo que representa una enorme fuente de información científica, cabe mencionar que incluso en las zonas inestables del pozo se lograron recuperar los núcleos.



Fig. 30 Se muestra la placa en el sitio de la perforación del pozo Yaxcopoil-1.

²⁸ (NPT's) Not Productive Times, se nombra así a los tiempos no productivos en las operaciones de perforación y pueden llegar a representar hasta un 20% del costo total de un proyecto de perforación.



Fig. 31 Se muestra la torre de perforación antes de ser levantada a la posición de perforación.



Fig. 32 Se muestra la torre de perforación en la posición adecuada para la perforación.



Fig. 33 Se muestra otra vista de la torre de perforación en la posición adecuada para la perforación.



Fig. 34 Se muestra el equipo para la perforación con corte de núcleos.

Aunque la mayor parte de las operaciones en la perforación, el corte de núcleos, la colocación de las tuberías de revestimiento y la cementación, se llevaron a cabo sin ningún problema y conforme al planteamiento, se presentó un problema de pérdida de circulación del lodo de perforación en las zonas más someras esto se debió principalmente a que se llegó a una zona de rocas carbonatadas.

Justo a los 992 m la secuencia de base del cable metálico HQ se pegó y según las medidas indicadas por el registro, se debió principalmente a desbloques de la perforación en la sección superior de los estratos del impacto, la secuencia HQ que quitaba el núcleo tuvo que permanecer en la perforación y sirvió como revestimiento mientras se realizaba operación y fue perseguido usando el principio telescópico, una secuencia de cable metálico NQ fue empleada a través de la cubierta HQ y hasta la profundidad total.

Las operaciones de perforación fueron llevadas a cabo del 9 de diciembre de 2001 y hasta el 26 de febrero de 2002 con un total de 77 días y la parte de la movilización requirió 21 días, las grúas 25 días, las operaciones de cortes de núcleos 19 días, la cementación 6 días y, los cambios de barrenas, registros de la perforación y la preparación del sitio, 2 días por cada operación, por lo que resulta importante poder hacer algún tipo de ahorro de tiempo que puede generar la perforación de más metros y con ello obtener una mayor cantidad de núcleos que representa una mayor cantidad de información.

Las medidas geofísicas se llevaron a cabo con el sistema *Slimhole* de ICDP dividido en dos secuencias, la primera desde los 393 m y hasta alcanzar los 980 m durante el ajuste de la cubierta y el otro de los 980 m y hasta alcanzar la PT de 1510.9 m, se describe una tabla con los registros tomados en la Fig. 35, la sonda soporta hasta 150°C de temperatura y hasta 80MPa de presión y trabaja en diámetros pequeños.

Sonda	Parámetros	Rango de registro
DIP, TS	Agujero desviado, campo magnético, GR	0 - 85
SGR, MSDH, TS	K, U, Th, susceptibilidad magnética, GR	0 - 85
DLL, TS	Resistividad eléctrica profunda y poco profunda, GR	0 - 85
BCS	Velocidad acústica	0 - 85
DIP, TS	Agujero desviado, campo magnético, GR	58 - 401
SGR, DLL, TS	K, U, Th, resistividad eléctrica profunda y poco profunda, GR	89 - 399
MSDH, TS	Susceptibilidad magnética, GR	87 - 398
DIP, TS	Agujero desviado, azimut, calibrador, campo magnético, GR	960 - 1511
FAC40	Imágenes de pared	960 - 1505
DLL, SGR, TS	Resistividad eléctrica profunda y poco profunda, GR	390 - 1505
MSDH, TS	Susceptibilidad magnética, GR	976 - 1507
BCS	Velocidad acústica	400 - 1505

Fig. 35 Se muestra la lista de registros tomados por el sistema *Slimhole*.

4.8 Registros

Los registros geofísicos disponibles para el pozo Yaxcopoil-1 han sido ampliamente estudiados por muchos científicos con el fin de obtener la mayor cantidad posible de información y con ello lograr conocer el comportamiento de la Tierra tras el impacto de un meteorito en la superficie, la Fig. 36 muestra los registros disponibles de la secuencia terciaria y la Fig. 37 muestra los registros correspondientes a la secuencia cretácica, la Fig. 38 muestra los registros proporcionados por la ICDP y Kenkmann *et al.* 2004.

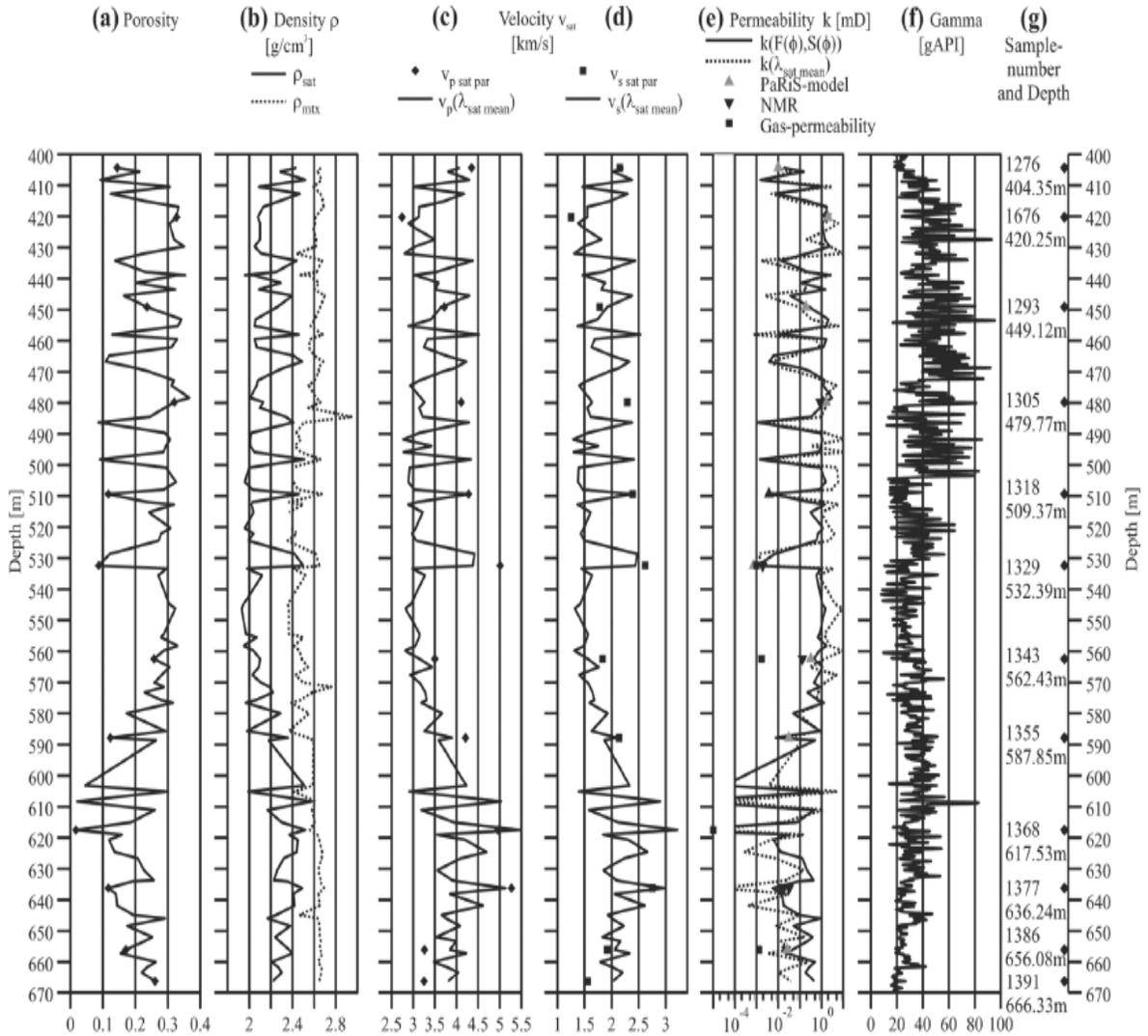


Fig. 36 Se muestran los registros geofísicos de la secuencia terciaria del pozo Yaxcopoil-1 (Popov *et al.*, 2004) donde se muestra: (a) porosidad, (b) densidad de rocas saturadas y de la matriz, (c) y (d) muestran velocidades de onda P y S, (e) permeabilidad, (f) rayos gamma y (g) número de muestras y su profundidad en metros.

Se puede observar que hay una relación fuerte entre la porosidad (a) y la permeabilidad (e), aunque las porosidades son muy altas de hasta 0.35, las permeabilidades son inferiores a 10 mD, esto es porque las calizas terciarias tienen poros grandes y una baja interconexión entre ellos, es decir, existe una alta porosidad con una baja permeabilidad. Las permeabilidades pequeñas pueden estar dominadas por factores kársticos macroscópicos según (Wilhelm *et al.* 2004).

Los valores de la densidad (ρ) no alcanzan los 2.7 g/cm^3 , tomando en cuenta que la composición de las calizas es de 95%, esto indica que no existen poros interconectados lo cual es típico de las rocas carbonatadas.

Los registros de velocidad se calcularon a partir de una interpolación de perfiles de medición de conductividad térmica, por los efectos de las variaciones en la porosidad, las velocidades oscilan entre 2.7 km/s y 5.3 km/s para V_p y de 1.3 km/s a 3.2 km/s para V_s con pequeñas variaciones en la composición mineralógica (Assefa *et al.* 2003).

Los registros de velocidad mostraron un comportamiento adicional en aproximadamente 600 m, donde se observa un ligero incremento de 3 km/s a 4 km/s para V_p y de 1.5 km/s a 2 km/s para V_s .

Los registros de rayos gamma y los registros de uranio, potasio y torio son herramientas geofísicas utilizadas en la industria petrolera y en la geología para obtener información sobre las propiedades de las formaciones rocosas en un pozo o en la superficie, estos registros son parte de las técnicas de registro de pozos, que involucran la medición de diversas propiedades físicas de las rocas y fluidos en el subsuelo, el registros de Rayos Gamma (GR) miden la cantidad de radiación gamma natural que emite una formación rocosa, los minerales que contienen radioisótopos emiten rayos gamma, y estas emisiones son detectadas por el registro de rayos gamma, la intensidad de la radiación gamma proporciona información sobre la composición mineralógica de las rocas y puede ayudar a identificar formaciones específicas, también se puede utilizar para correlacionar las formaciones entre diferentes pozos.

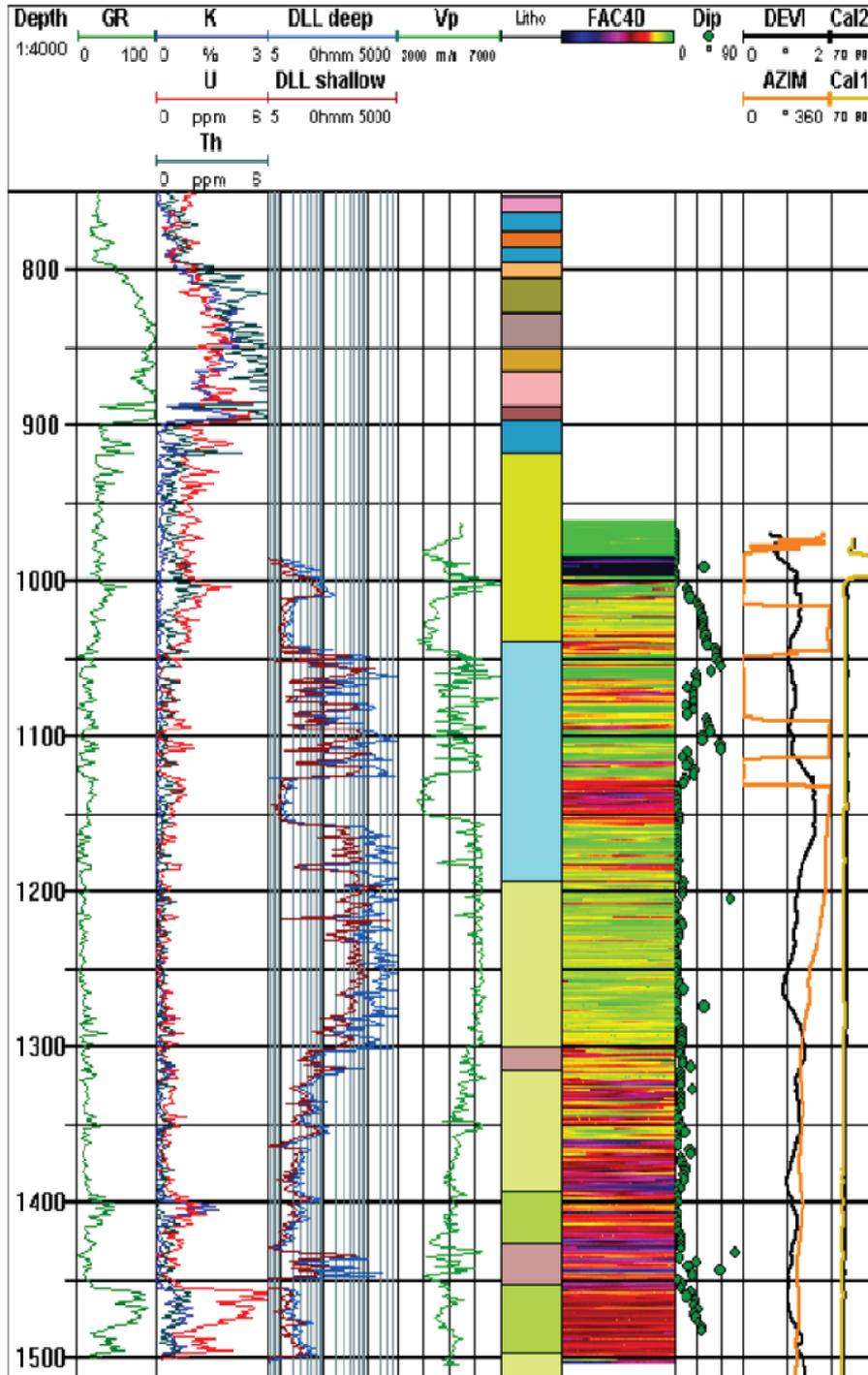


Fig. 37 Se muestran los registros geofísicos de la secuencia cretácica del pozo Yaxcopoil-1 donde se muestran de izquierda a derecha: el registro de rayos gamma (GR, API, K, U, Th), doble lateral o doble laterolog (DLL), velocidad de onda sísmica (Vp), litodensidad compensada (Litho), imagen acústica de la pared del pozo (FAC40), inmersión (Dip), desviación de la perforación medida en grados (AZIMUT) y calibración del agujero (Cal1 y Cal2).

El registro de Uranio (U) mide la concentración de uranio en las formaciones rocosas, el uranio es un elemento radiactivo y su concentración puede variar en diferentes tipos de rocas, la medición de la radiación gamma emitida por el uranio permite estimar su contenido en la formación, el registro de Potasio (K) mide la concentración de potasio en las rocas, el potasio es un elemento que emite radiación gamma debido a su contenido radiactivo natural, la variación en la concentración de potasio puede ser indicativa de diferentes tipos de rocas sedimentarias, el registro de torio (Th) es similar al registro de uranio, el registro de torio mide la concentración de torio en las rocas, el torio es otro elemento radiactivo natural que emite radiación gamma, la medición de la radiación gamma debida al torio puede brindar información adicional sobre la composición de las rocas y la presencia de ciertas formaciones.

En conjunto los registros geofísicos radioactivos brindan información valiosa sobre la composición de las formaciones del pozo como la porosidad, la cantidad de arcilla, estos datos son utilizados para entender mejor las propiedades de las rocas, evaluar la viabilidad de la producción de hidrocarburos y tomar decisiones informadas durante la exploración y producción de petróleo y gas.

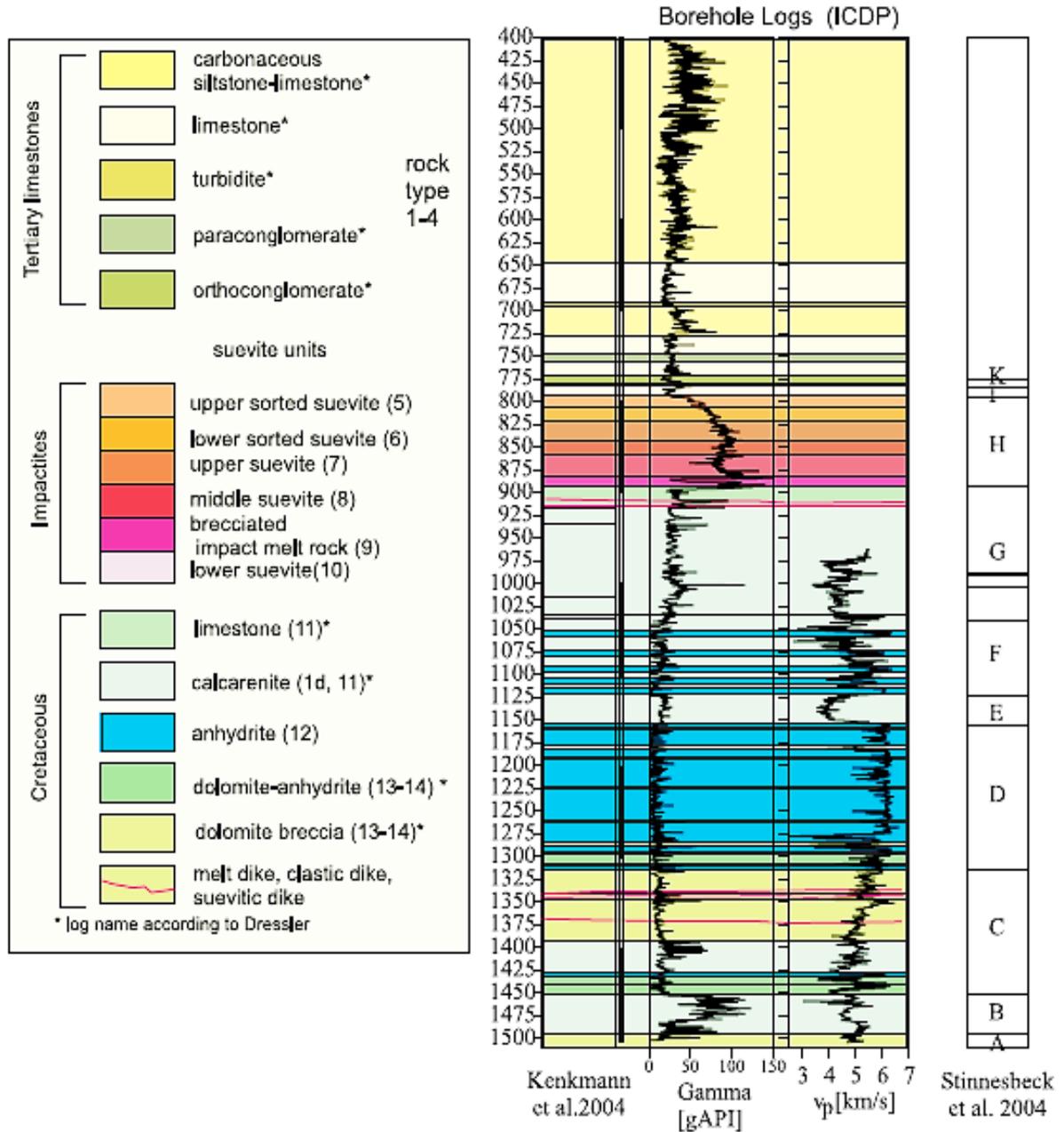


Fig. 38 Se muestra de izquierda a derecha la litología del pozo según Kenkmann et al (2004), registro de rayos gamma y registro sísmico proporcionados por ICDP y Unidades A – K según Stinnesbeck et al. (2004).

Los núcleos obtenidos de la perforación se encuentran actualmente resguardados en el Instituto de Geofísica de la UNAM en la Ciudad de México, donde se han podido realizar diversos estudios después de estar bajo el resguardo de la máxima casa de estudios de México.

4.9 Lodos de perforación

Los lodos de perforación, también conocidos como fluidos de perforación, son mezclas de fluidos que se utilizan en la industria de la perforación de pozos, ya sea para pozos de petróleo, gas o geotérmicos, estos fluidos tienen varias funciones esenciales durante el proceso de perforación, como enfriar y lubricar la barrena, transportar los recortes de roca a la superficie, mantener la integridad del pozo y equilibrar la presión en las formaciones subterráneas.

La composición exacta de los lodos de perforación puede variar según las condiciones geológicas, la profundidad del pozo y los objetivos de perforación, sin embargo, en términos generales, los lodos de perforación están compuestos por una base líquida, puede ser agua (lodos a base de agua) o aceite (lodos a base de aceite). El agua y los aceites se mezclan con otros aditivos para cumplir diversas funciones, en conjunto forman los lodos de perforación que contienen sólidos que están suspendidos en el lodo y que ayudan a transportar los recortes de roca a la superficie como la barita y la bentonita, aditivos que ayudan a mejorar las propiedades del lodo como viscosificantes para controlar la viscosidad del lodo y asegurar un adecuado transporte de los recortes. Contienen también fluidos de control de filtración que ayudan a prevenir la pérdida de lodo en las formaciones permeables, inhibidores de arcilla que previenen la hinchazón de arcillas en las formaciones, biocidas que evitan el crecimiento bacteriano en el lodo, lubricantes que reducen la fricción entre la broca y las paredes del pozo, entre otros.

Para la etapa de 17 ½" se programó un lodo bentónico base agua con una densidad entre 1.02 y 1.04 (g/cm³), una capacidad de filtrado de 5 a 7 cm³ y una viscosidad entre 55 y 60 segundos.

Para la etapa de 12 ¼" se programó un lodo bentónico base agua con una densidad entre 1.06 y 1.08 (g/cm³), una capacidad de filtrado de 12 a 14 cm³ y una viscosidad entre 45 y 50 segundos.

Para la etapa de 8 ½" se programó un lodo bentónico base agua con una densidad entre 1.08 y 1.10 (g/cm³), una capacidad de filtrado de 10 a 12 cm³ y una viscosidad entre 45 y 50 segundos.

4.9 Barrenas

Las barrenas de perforación son herramientas utilizadas generalmente en la industria petrolera para la perforación de pozos y es la herramienta que se encarga de cortar o triturar las rocas en el subsuelo y así crear un orificio en la tierra o en la formación geológica, estas herramientas son esenciales en la exploración y producción de petróleo, gas, agua y en proyectos geotécnicos, existen diferentes tipos de barrenas diseñadas para diferentes tipos de formaciones y objetivos de perforación.

La composición y el diseño de las barrenas de perforación pueden variar según las condiciones geológicas y los objetivos específicos de perforación, en términos generales, la barrena de perforación es llamada broca o punta y es la parte activa del aparejo de perforación que realiza el corte en la roca y pueden tener diferentes diseños de corte, como dientes, insertos de carburo de tungsteno o discos de diamante, según la dureza y el tipo de formación que se esté perforando, el cuerpo es la parte que conecta la broca con la tubería de perforación y puede estar hecho de acero u otros materiales resistentes que puedan soportar las fuerzas de corte, rotación, presión y abrasión durante la perforación y el transporte de recortes a la superficie.

Existen varios tipos de barrenas como las helicoidales, tricónicas y de cortadores fijos, en esta clasificación entran las de diamante impregnado, diamante natural y PDC y también existen las híbridas o especiales que son diseñadas según el objetivo específico de la perforación.

En la recuperación de núcleos se emplean barrenas especiales como las mostradas en la Fig. 39, que tiene cortadores fijos con un espacio disponible para que a través de ella y de la tubería de perforación pueda transportar el núcleo a superficie.



Fig. 39 Se muestra una barrena de cortadores fijos para la recuperación de núcleos y el cácher que ayuda al transporte del núcleo a la superficie.

La Fig 40 muestra esquemas de los tipos de cortadores que poseen las barrenas empleadas para la recuperación de núcleos, así como la forma de los cuerpos de la barrena, que es la parte donde se conecta la tubería de perforación.

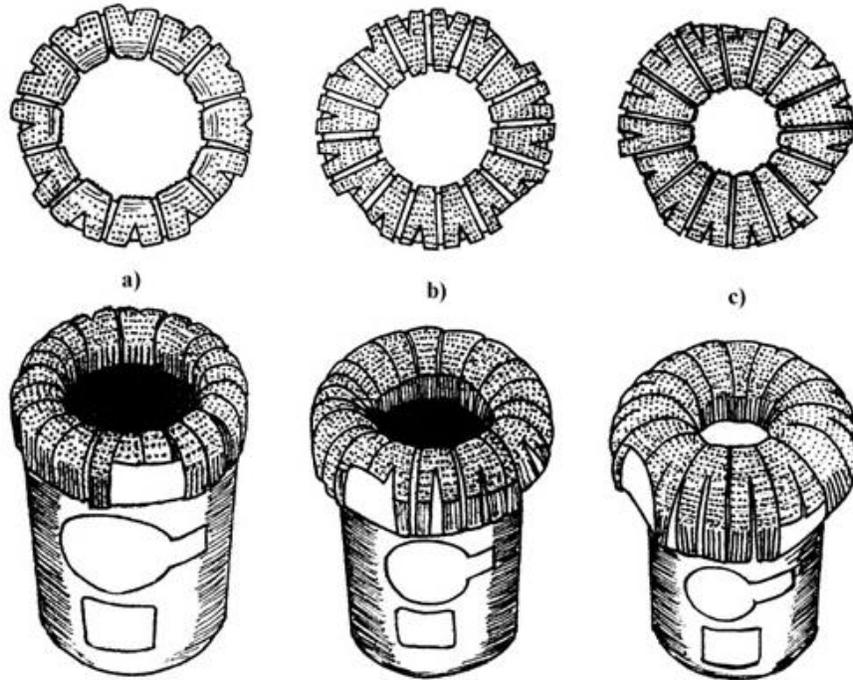


Fig. 40 Se muestran barrenas de cortadores fijos para la recuperación de núcleos a) se emplea para formaciones medianamente duras, b) para formaciones muy duras y c) para formaciones extremadamente duras.

4.10 Estado mecánico del pozo

El estado mecánico de un pozo se refiere a las condiciones y características físicas de la estructura de perforación y revestimiento de un pozo, se trata de la descripción de las tuberías, revestimientos y otros componentes que se utilizan para mantener la integridad y la seguridad del pozo a medida que se perforan y producen hidrocarburos generalmente.

Es fundamental para garantizar la seguridad operativa, evitar fugas de fluidos, prevenir problemas de presión y asegurar la eficiencia en la producción u operación, las partes clave del estado mecánico de un pozo incluyen las tuberías de revestimiento que son las empleadas para mantener el pozo con un diámetro sin

cambios por los esfuerzos de la formación y evitar derrumbes que a su vez generan problemas durante las operaciones de perforación o reparación.

Se inicia con la tubería conductora, que es la que guía el pozo desde la superficie, enseguida se coloca el revestidor superficial que tiene la función de continuar con la dirección del pozo dictada por la tubería conductora, después se colocan tuberías de revestimiento intermedias y en este punto se pueden usar las que se consideren necesarias para lograr la profundidad programada, para el caso de la industria petrolera puede seguir la camisa de producción si la zona productora es inestable o se puede tener la tubería de producción, los empacadores se usan para sellar zonas entre las tuberías de revestimiento, generalmente en las primeras etapas de un pozo se colocan cuando se va a cementar una tubería que ya está dentro de otra o para el caso del agujero descubierto ayuda a mantener la presión en el fondo del pozo y a conducir el hidrocarburo por la tubería de producción.

La cementación es clave porque funciona como aislante entre la formación y la tubería de revestimiento para evitar la fuga de fluidos o lodos de perforación si se continuará perforando a una profundidad mayor.

Como se ha descrito, el estado mecánico de un pozo es esencial para garantizar una operación segura y eficiente a lo largo del ciclo de vida del pozo, desde la perforación inicial hasta la producción y eventualmente el cierre del pozo.

Estado mecánico del pozo Yaxcopoil-1

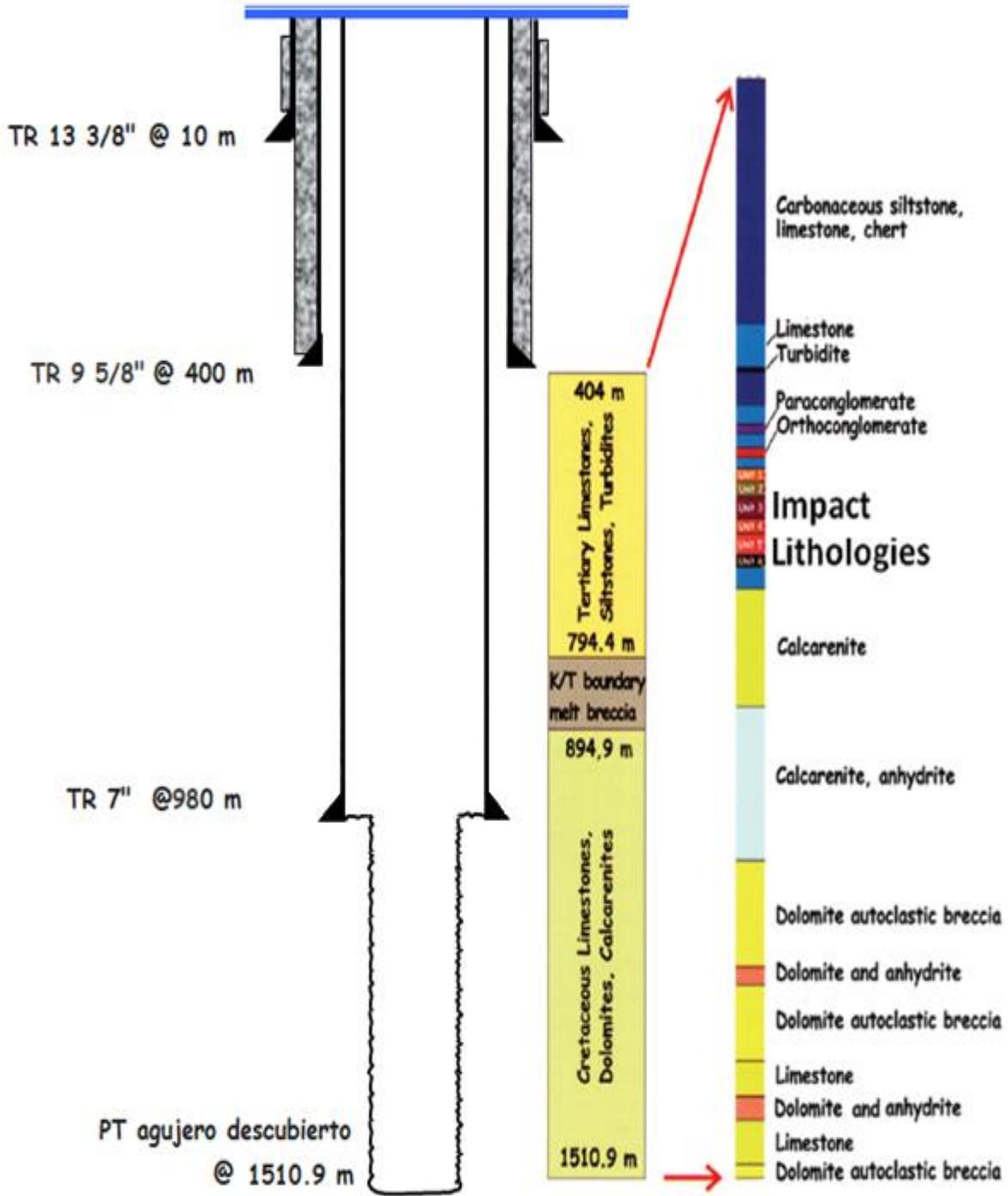


Fig. 41 Se muestra el estado mecánico del pozo²⁹ Yaxcopoil-1 con la columna litológica (Urrutia et al, 2011).

²⁹ Esquema realizado para el pozo con los diámetros de las tuberías y las profundidades de asentamiento y se adicionó la columna litológica generada por (Urrutia et al, 2011).

Capítulo 5. Discusión

El objetivo principal de la perforación del pozo Yaxcopoil-1 fue científico a diferencia de los pozos perforados por PEMEX, los cuales buscaban yacimientos petroleros para su explotación comercial, al tener ese objetivo principal se incluye la recuperación continua de núcleos, inicialmente se tenía programada una profundidad total de 2500 m como se muestra en la Fig. 42. La profundidad no fue alcanzada debido a los problemas presentados durante la perforación porque el presupuesto era limitado, dando como resultado una disminución considerable en los metros perforados con respecto al plan original. Durante la perforación se inició la recuperación de núcleos a partir de los primeros 400 metros y los registros de rayos gamma disponibles del pozo también fueron tomados a partir de esa profundidad, aunque los primeros metros pueden ser analizados mediante el estudio de las muestras de canal, se debe tener en cuenta que es mejor el estudio mediante un núcleo, el cual muestra la composición exacta y la profundidad a la que se obtuvo. Es importante mencionar que en la recuperación de recortes en superficie derivados de la perforación se puede tener un atraso en la salida dependiendo del tamaño de los mismos y eso puede proporcionar información incompleta acerca de las litologías que se observan derivados de la misma dificultad para que el lodo de perforación empleado transporte a la superficie los recortes.

Al analizar la perforación realizada hay una ventana de oportunidad para reducir el costo de la perforación en las primeras etapas para futuras operaciones de perforación en la zona, las cuales pueden ahorrar tiempo lo que se traduce en un ahorro de dinero, que son dos factores ampliamente recomendables cuando se está perforando un pozo. El uso de herramienta especializada se puede convertir en una gran aliada para lograr alcanzar objetivos mayores teniendo en cuenta que cualquier reducción en los costos pueden ayudar a perforaciones futuras o inclusive profundizar la que se está llevando a cabo, si así se considera necesario.

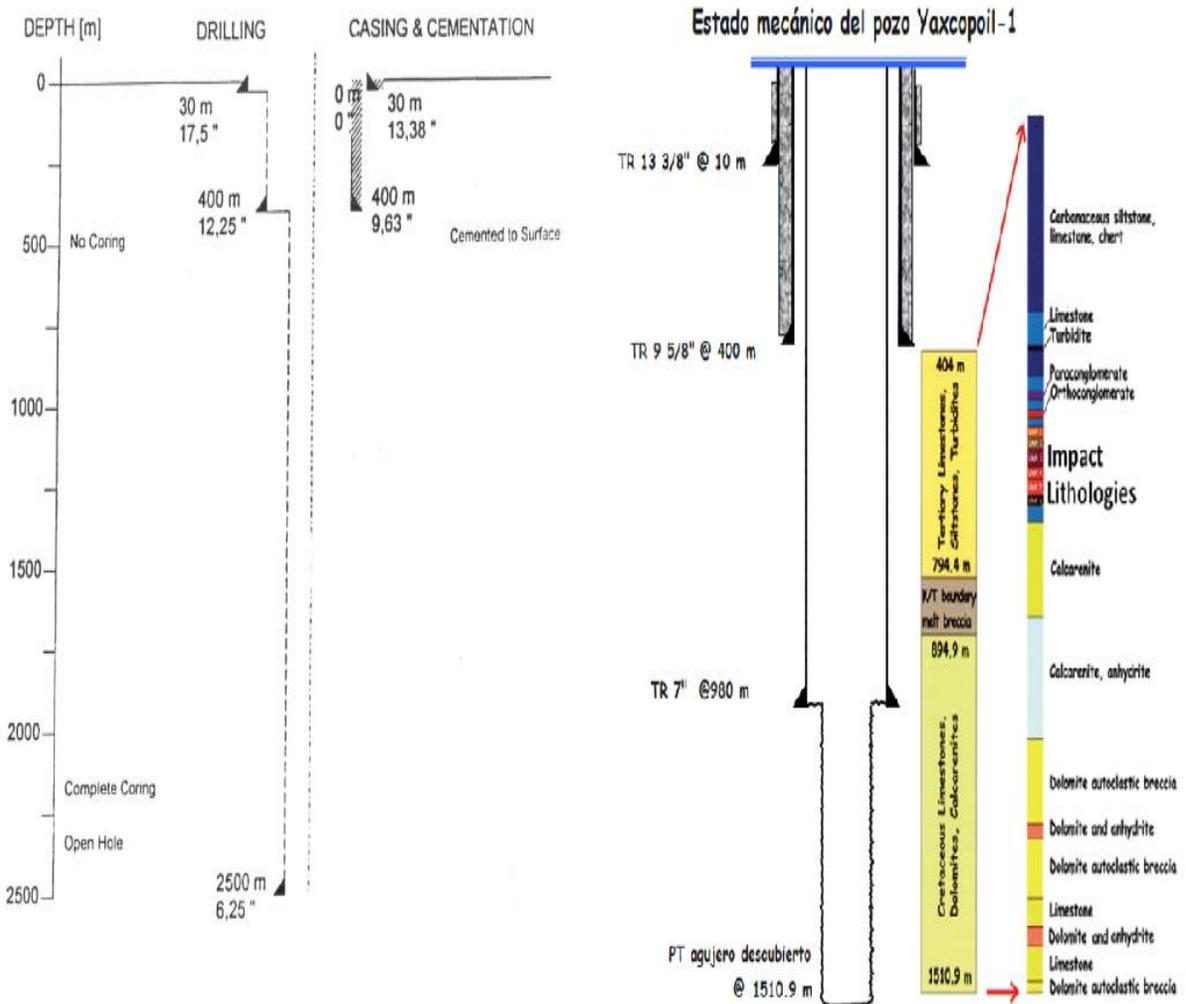


Fig. 42 Se muestra el estado mecánico del pozo Yaxcopoil-1, el programado se observa a la izquierda y el real a la derecha.

El proceso normal para asentar una tubería de revestimiento (TR), es armar una sarta de perforación y comenzar la perforación hasta la profundidad deseada, enseguida se retira la sarta de perforación y se prepara el equipo para montar la TR en el equipo y comenzar a introducirla en el agujero perforado, alcanzada la profundidad deseada se procede a cementar. Sabiendo esto y considerando que no se cortarán núcleos en las primeras etapas, una herramienta que puede ser de gran ayuda sobre todo para reducir los días de perforación, es la zapata perforadora o

zapata rimadora que se observa en la Fig. 43. Esta herramienta utiliza la tubería de revestimiento como tubería de perforación, tiene un diseño parecido a una barrena PDC y no necesita cálculos especiales porque se calculan como una barrena PDC de cortadores fijos normal, tiene un pistón deslizable que permite desbloquear puertos laterales e incluso se pueden adicionar estabilizadores para garantizar el adecuado asentamiento y una vez alcanzada la profundidad deseada solo se procede a cementar por los puertos laterales. Esta herramienta se emplea principalmente en zonas diferenciales de presión, en las primeras etapas puede llegar a reducir el tiempo de perforación hasta un 40% debido a que se evitarán posibles problemas como atrapamientos en la salida de la sarta de perforación por una mala consolidación de agujeros o por alta severidad (DLS)³⁰.



Fig. 43 Se muestra una zapata perforadora XCD de segunda generación de la empresa TESCO.

Las especificaciones de esta barrena son recomendables para formaciones suaves a medias altas, ideales para la zona del cráter de impacto de Chicxulub ya que se encuentra localizado en una zona carbonatada, tiene altas tasas de penetración. Posee un cuerpo de aleación perforable, puerto secundario o bypass que le

³⁰ El término DLS, por sus siglas en inglés Dog Leg Severity, indica que tan desviado está un agujero y es empleado para indicar que un pozo tiene una inclinación de más de 3° por cada 30 m, si el ángulo llega a superarse el equipo corre el riesgo de quedar atrapado en el agujero.

garantiza la cementación a prueba de fallas por taponamiento, soporta un gasto de 1,550 a 2,550 gpm³¹, posee cuatro aletas y es tipo PDC.

Una tecnología que puede ser usada como herramienta es la construcción de pozos multilaterales que se ilustra en la Fig. 44, aunque este proceso si puede representar un costo considerable en la perforación de pozos debido a que se necesita un trabajo adicional que es la perforación de un pozo direccional, sin contar con que se debe tener el recurso económico para la cantidad de pozos totales a perforar.

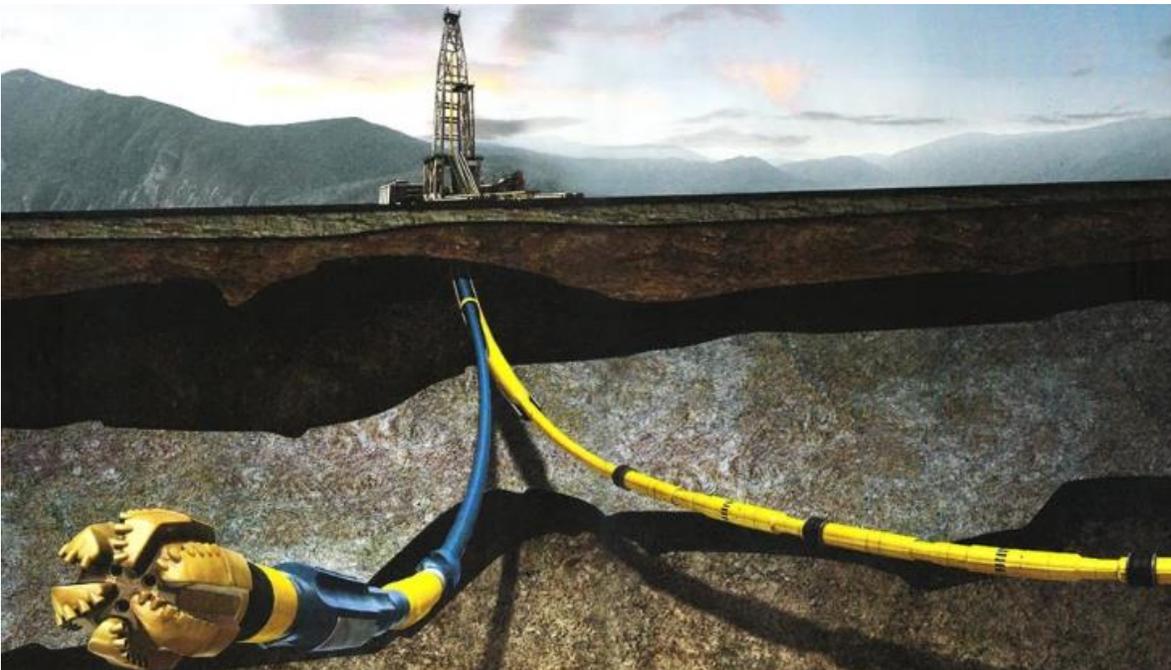


Fig. 44 Se muestra una imagen de pozo multilateral (portal del petróleo, 2016)³².

El equipo que se contrate necesita una amplia experiencia en el trabajo direccional ya que en este tipo de perforaciones la construcción del ángulo es de vital importancia para llegar al objetivo deseado y la más mínima desviación suele desencadenar un posible problema en la introducción o salida del equipo de

³¹ gpm, es una medida que indica la cantidad de galones por minuto.

³² Portal del petróleo (6 de marzo de 2016). Ejemplo de pozo multilateral. Portal del petroleo. <https://portaldelpetroleo.com/perforacion-direccional-en-pozos-de-petroleo/>

perforación, es una técnica avanzada y estratégica en la perforación ya que permite una mayor eficiencia de los recursos empleados y puede proporcionar información importante desde un pozo a diferentes puntos de interés para conocer su litología a detalle como se ilustra en la Fig. 45.

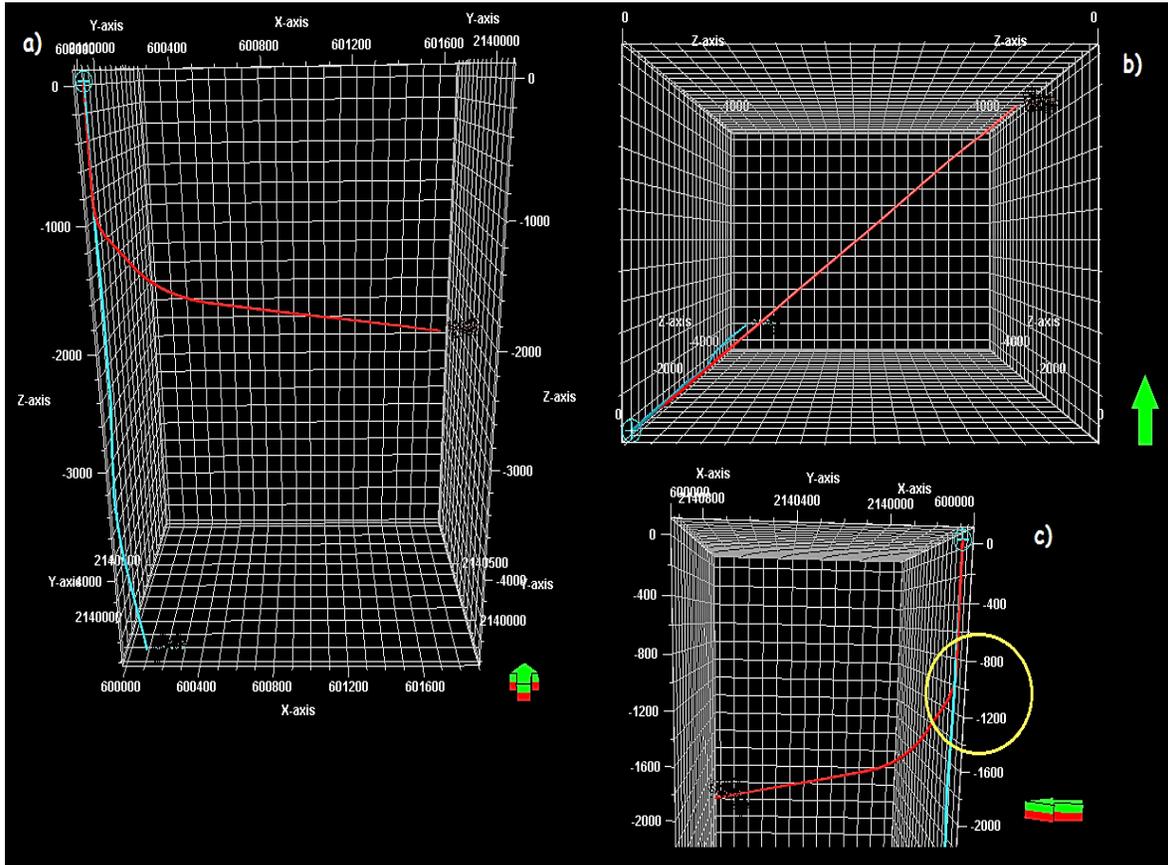


Fig. 45 Se muestra la imagen de un pozo vertical perforado por PEMEX en la Sonda de Campeche y la modificación por cambio de objetivo, a) Vista del sur, b) Vista superior y c) Vista lateral del oeste y se observa el punto donde se inició la construcción del ángulo para el nuevo objetivo.

Un punto a favor de este procedimiento es que hay pozos que se encuentran perforados a una profundidad baja como son el UNAM-1, UNAM-3, UNAM-4 y UNAM-8, que tienen profundidades de 154.45 m, 137.55 m, 63.1 m y 100.8 m respectivamente, si se consigue el presupuesto para incrementar la perforación de dichos pozos pueden tener dos funciones, la primera es continuar con el pozo

vertical y la segunda es determinar el segundo objetivo y comenzar la construcción del segundo pozo para alcanzar el nuevo objetivo trazado.

Para que la información se encuentre bien descrita se ordenaron los pozos como se encuentran indicadas en las Fig. 27 y Fig. 28, una vez ordenada se calcularon los espesores de cada estrato debido a que esa información es importante para la perforación y para construir modelos tridimensionales, quedando las tablas como se observan en las Fig.46 y Fig. 47.

Pozo	C1		S1		Y6		Yax-1		T1		Y2		Y5A		Y1		Y4	
	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor
Limestone and marl	992	992	1038	1038	1047	1047	794.6	794.6	566.6	566.6	287.9	287.9	192.9	192.9	389	389	180.8	180.8
Dolomite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	390.6	197.7	-	-	286.3	105.5
Impact breccias	1293	301	1383	345	1444	397	894.9	100.3	965.8	399.2	710.7	422.8	920.9	530.3	1030	641	617	330.7
Impact melt	1562	269	1527	144	1645	201	-	-	1054	88.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1240	319.1	-	-	962.5	345.5
Limestone and marl	-	-	-	-	-	-	1511	616.1	1681	627	1468	757.3	1509	269	1866	836	1457	494.5
Evaporites	-	-	-	-	-	-	-	-	1881	200	1713	245	-	-	-	-	-	-
Dolomite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1533	24	2093	227	1490	33
Limestone and marl	-	-	-	-	-	-	-	-	2133	252	2227	514	1644	111	-	-	1579	89
Intercalation of dolimites	-	-	-	-	-	-	-	-	3175	1042	3029	802	1684	40	2694	601	-	-
Limestone and marl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3114	85	1765	81	2773	79	1700	121
Evaporites	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2822	49	-	-
Dolomite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1803	38	2864	42	731	-969
Evaporites	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3316	202	-	-	2955	91	-	-
Limestone and marl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3503	187	2151	348	3041	86	-	-
Intercalation of dolimites	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2977	826	3110	69	2253	1522
Crystalline basement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3267	157	2439	186

Fig. 46 Se muestra la tabla³³ con la estratigrafía de los pozos perforados por PEMEX y el pozo Yaxcopoil-1 perforado por la ICDP.

³³ Tabla generada para poder dar paso al modelo tridimensional con las cimas y bases de los pozos perforados hasta momento en tierra cerca del cráter de Chicxulub.

Pozo	UNAM-1		Yax-1		UNAM-8		UNAM-2		UNAM-5		UNAM-4		UNAM-3		UNAM-7		UNAM-6	
	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor	Base	Espesor
Coquinas and fossiliferous calcarenites	71.77	71.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcarenites and silty limestones	153.3	81.53	-	-	100.8	100.8	202.1	202.1	-	-	63.1	63.1	137.6	137.6	-	-	63.1	63.1
Crystalline dolomitized limestones	-	-	-	-	-	-	354.3	152.2	178.3	178.3	-	-	-	-	204	204	176.9	113.8
Silty limestones with chert and evaporites	-	-	794.6	794.6	-	-	559	204.7	331.8	153.5	-	-	-	-	215.1	11.1	265.6	88.7
Without description	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	223.1	8	282.8	17.2
Polymictic breccia (with abundant basement)			894.9	100.3	-	-	-	-	504	172.2	-	-	-	-	349.4	126.3	504	221.2
Polymictic breccia (with abundant clasts of)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	644.6	295.2	700	196
Silty limestones with chert and evaporites	-	-	1511	616.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fig. 47 Se muestra la tabla³⁴ con la estratigrafía de los pozos perforados por la UNAM y el pozo Yaxcopoil-1 perforado por la ICDP.

Una vez que se tienen las cimas y bases de los pozos se debe calcular la distancia del cráter a cada uno de los pozos perforados, es a partir de ahí que se miden las ubicaciones de los demás pozos, como se observa en Fig. 48, con la finalidad de estudiar las formaciones que derivaron del impacto del meteoro y sus posibles similitudes entre ellos o de pozos futuros.

³⁴ Tabla generada para poder dar paso al modelo tridimensional con las cimas y bases de los pozos perforados hasta momento en tierra cerca del cráter de Chicxulub.

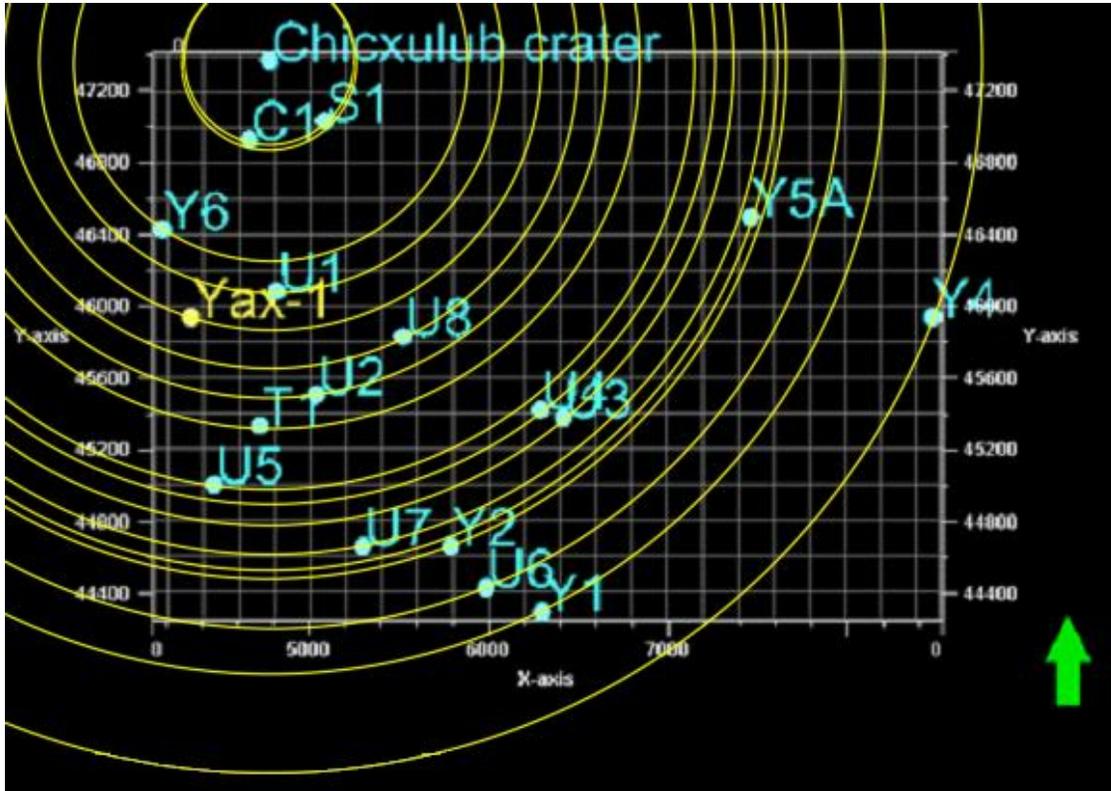


Fig. 48 Se muestran las ubicaciones de los pozos a escala 1:50 con círculos trazados³⁵ a partir del centro del cráter.

Con la figura mostrada se confirman las distancias calculadas en la Fig. 49 donde se colocan los pozos tal cual aparecen en las Fig. 46 y Fig. 47, con esta información es más sencillo ordenar los pozos por distancia del cráter a cada uno de ellos como se muestra en la Fig. 50, con esto se pueden hacer inferencias acerca de las posibles perforaciones futuras o las ubicaciones aproximadas de posibles pozos de correlación si se toma en cuenta que en teoría la litología es similar de forma radial. Se calculó además la latitud y la longitud y con ello se realizó la conversión a unidades UTM³⁶.

³⁵ La imagen fue generada con la ayuda del software AutoCAD para garantizar que los círculos fueran trazados de forma íntegra y sin variaciones.

³⁶ Sistema de coordenadas por sus siglas en inglés, Universal Transverse Mercator (UTM), sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.

Las coordenadas UTM son un sistema de coordenadas geográficas utilizadas para describir en la superficie terrestre de manera precisa, este sistema divide la Tierra en una serie de zonas elipsoidales, cada una de las cuales utiliza una proyección cartográfica de Mercator transversal para representar el terreno en un plano.

La Tierra se divide en 60 zonas longitudinales de 6 grados cada una, cada zona tiene una proyección cartográfica específica que minimiza la distorsión en esa región particular, las coordenadas UTM se definen en metros, lo que facilita los cálculos y la medición de distancias en comparación con otros sistemas de coordenadas.

Las coordenadas UTM se utilizan ampliamente en cartografía, topografía, navegación, geodesia, sistemas de información geográfica (GIS) y ampliamente en la industria petrolera donde es necesaria la alta precisión.

Pozo	Profundidad (m)	Distancia al centro de cráter (km)	Coordenadas		Coordenadas en UTM	
			Latitud	Longitud	Coordenada X	Coordenada Y
C1	1581	22.47	21°12'	89°34'	233193.85	2346447.34
S1	152.7	28	21°15'	89°22'	254049.13	2351660.61
Y6	1645	47.79	20°58'	89°48'	208854.42	2321374.83
Yax-1	1511	62.47	20°44'	89°43'	216765.37	2296863
T1	3175	93.7	20°29'	89°32'	236095	2266639.1
Y2	3488	129.6	20°11'	89°01'	289258.01	2233049.15
Y5A	3003	138.4	21°01'	88°13'	373216.58	2324845.31
Y1	3226	154.8	20°01'	88°46'	314849.44	2214673.79
Y4	2425	205.8	20°46'	87°44'	424014.8	2296864.91
UNAM-1	154.45	52.49	20°49'	89°29'	240846.89	2304229.16
Yax-1	1511	62.47	20°44'	89°43'	216765.37	2296863
UNAM-8	100.8	79.38	20°10'	89°07'	276084.62	2291539.26
UNAM-2	559	80.51	20°34'	89°23'	267190.39	2250681.77
UNAM-5	504	104.8	20°20'	89°39'	223303.04	2250224
UNAM-4	63.1	117.2	20°32'	88°47'	314411.14	2271144.11
UNAM-3	137.55	125.2	20°30'	88°43'	320645.09	2268862.97
UNAM-7	702.4	126.1	20°11'	89°15'	264860.55	2232993.59
UNAM-6	700	150.9	20°05'	88°55'	299230.71	2221489.39

Fig. 49 Se muestra la tabla con la profundidad, distancia al cráter, coordenadas geográficas y UTM.

Pozo	Profundidad (m)	Distancia al centro de cráter (km)	Coordenadas		Coordenadas en UTM	
			Latitud	Longitud	Coordenada X	Coordenada Y
C1	1581	22.47	21°12'	89°34'	233193.85	2346447.34
S1	152.7	28	21°15'	89°22'	254049.13	2351660.61
Y6	1645	47.79	20°58'	89°48'	208854.42	2321374.83
UNAM-1	154.45	52.49	20°49'	89°29'	240846.89	2304229.16
Yax-1	1511	62.47	20°44'	89°43'	216765.37	2296863
UNAM-8	100.8	79.38	20°10'	89°07'	276084.62	2291539.26
UNAM-2	559	80.51	20°34'	89°23'	267190.39	2250681.77
T1	3175	93.7	20°29'	89°32'	236095	2266639.1
UNAM-5	504	104.8	20°20'	89°39'	223303.04	2250224
UNAM-4	63.1	117.2	20°32'	88°47'	314411.14	2271144.11
UNAM-3	137.55	125.2	20°30'	88°43'	320645.09	2268862.97
UNAM-7	702.4	126.1	20°11'	89°15'	264860.55	2232993.59
Y2	3488	129.6	20°11'	89°01'	289258.01	2233049.15
Y5A	3003	138.4	21°01'	88°13'	373216.58	2324845.31
UNAM-6	700	150.9	20°05'	88°55'	299230.71	2221489.39
Y1	3226	154.8	20°01'	88°46'	314849.44	2214673.79
Y4	2425	205.8	20°46'	87°44'	424014.8	2296864.91

Fig. 50 Se muestra la tabla ordenada respecto a la distancia del cráter

Una vez que se tiene toda la información necesaria, se muestra en la (Fig. 51) una representación del pozo Yaxcopoil-1 en el modelo tridimensional para observar las columnas litológicas con el uso del software Petrel de la compañía Schlumberger³⁷ que tiene, entre otras muchas funciones, modelos de desviaciones tridimensionales y que es ampliamente usado en la industria petrolera para la caracterización de yacimientos.

³⁷ Schlumberger es considerada una de las mejores compañías del mundo en servicios a yacimientos petroleros y asistencia en perforaciones de pozos.

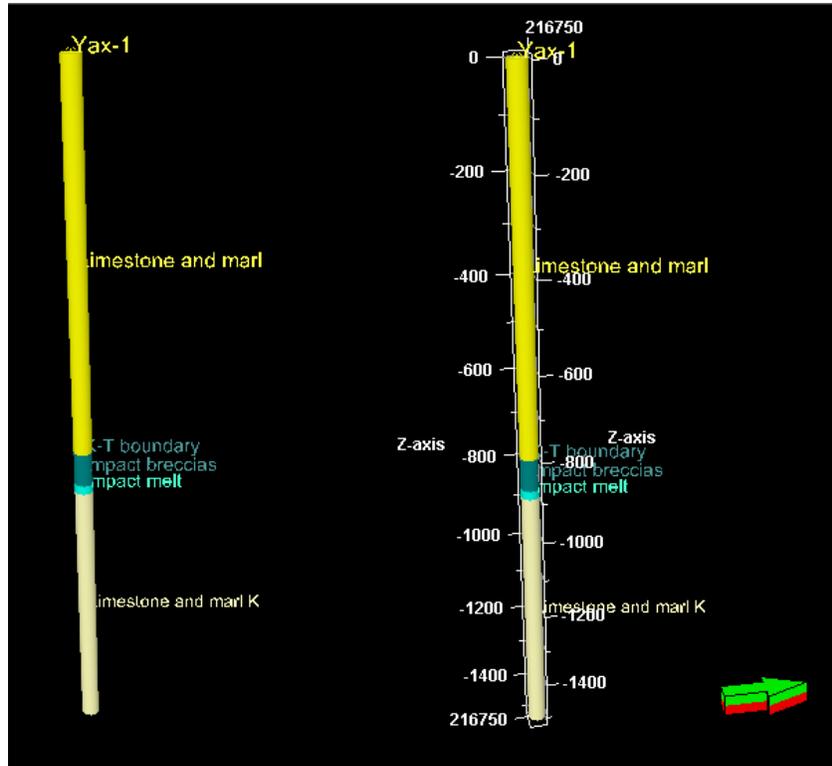


Fig. 51 Se muestra la vista 3D que se generó con los datos de las tablas³⁸.

Se observa el pozo Yaxcopoil-1 en una vista 3D con la información que se obtuvo al procesar las tablas y las coordenadas geográficas, en la parte de la izquierda se muestra el pozo con su columna litológica y a la derecha se observa el mismo pozo con la localización en coordenadas UTM y con la escala de profundidad, además de observar en la parte inferior derecha la orientación al Norte.

Una consideración más es que se deben buscar pozos que puedan ser considerados como correlación para las perforaciones futuras y con ello determinar la profundidad adecuada para colocar cada una de las tuberías de revestimiento, después identificar el objetivo a alcanzar, la ubicación y la profundidad, para ello es necesario conocer las ubicaciones de los pozos perforados en la zona como se observa en la Fig. 52, los cuales se describen en estudios como los desarrollados

³⁸ Se hace referencia a las Fig. 46 a Fig. 49 que fueron generadas para el presente trabajo.

por el Dr Jaime Urrutia Fucugauchi³⁹ y su equipo de científicos que son altamente calificados para el desarrollo de la investigación, entre otros equipos más con las mismas capacidades.

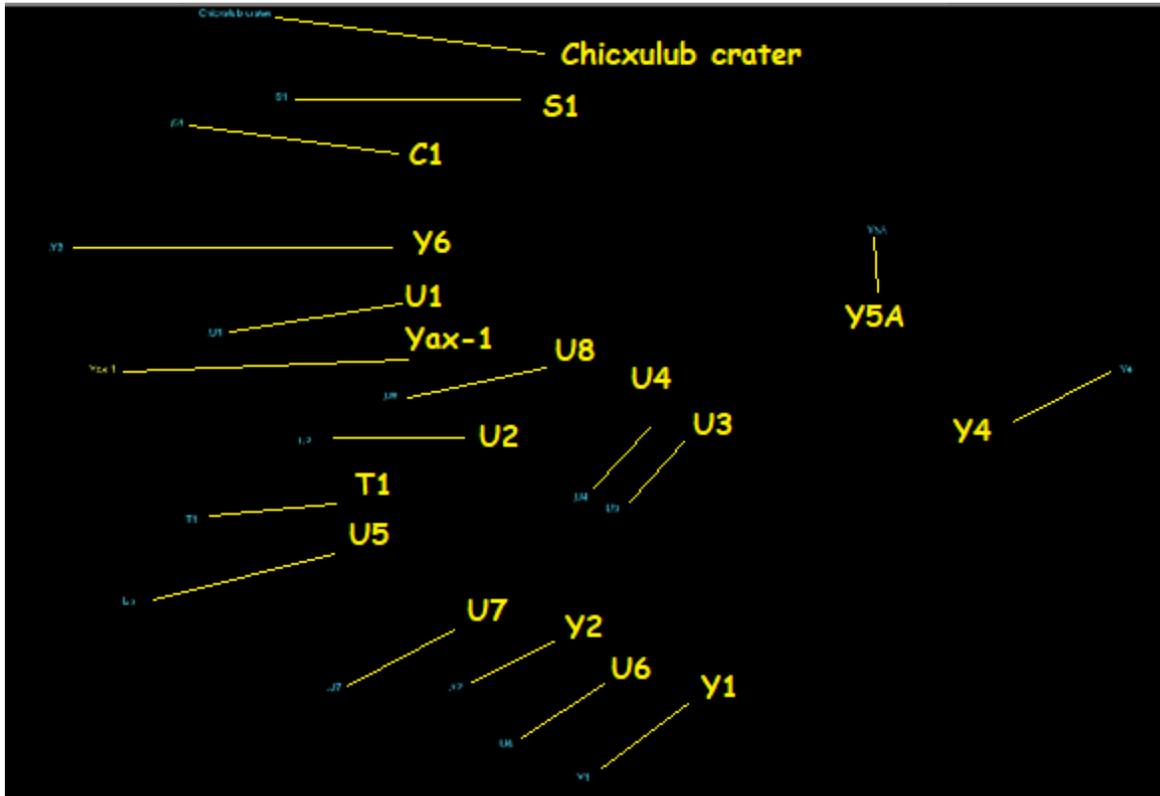


Fig. 52 Se muestran las ubicaciones de los pozos perforados en la plataforma de Yucatán tanto de PEMEX como de la UNAM en color azul (Urrutia et al, 2010).

La imagen muestra las ubicaciones de los pozos ya cargados en el software PETREL y como se observa no se alcanzan a distinguir de forma adecuada cada una de las leyendas y esto se debe a que las distancias empleadas son las reales a pesar de emplear la fuente más grande permitida por el mismo programa por lo que se realizó una nueva imagen Fig. 53 donde se muestren los mismos pozos, pero con una escala menor para poder observar de forma adecuada las ubicaciones y después las profundidades de cada uno de los estratos descritos.

³⁹ Urrutia, J. et al, (2010). The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Edición 2011, (99-127).

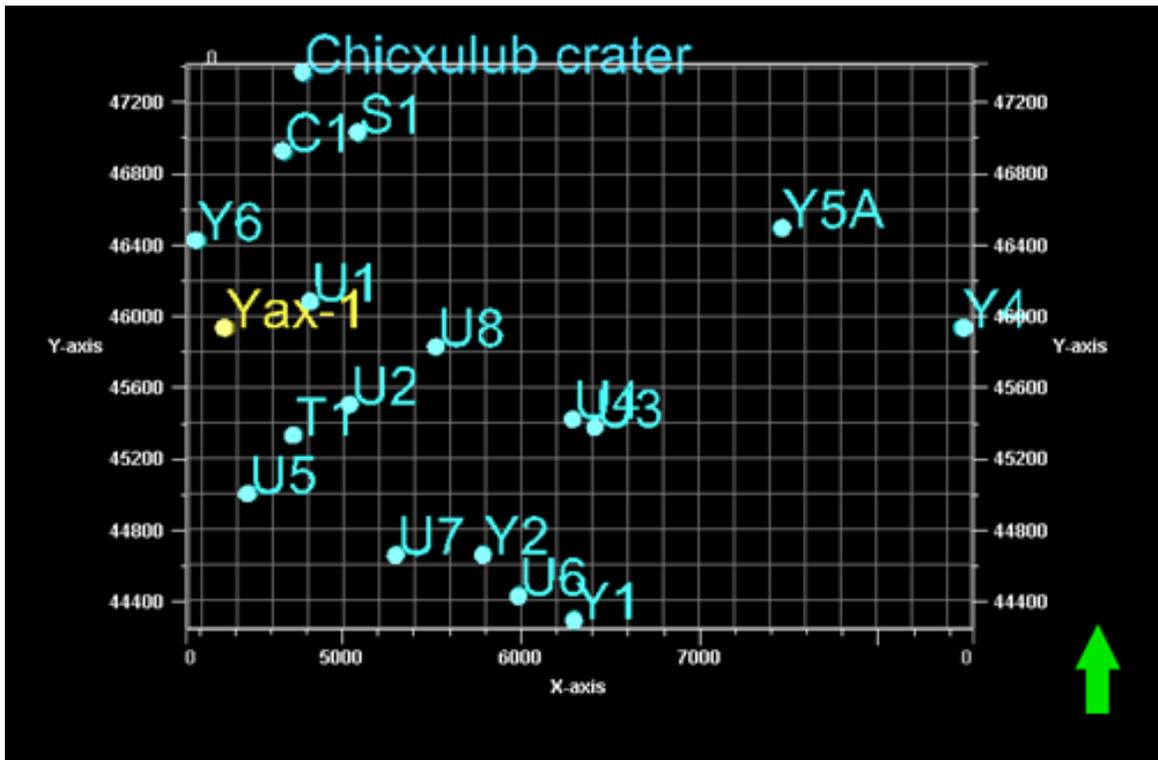


Fig. 53 Se muestran las ubicaciones de los pozos ⁴⁰ a escala 1:50 ⁴¹(Urrutia et al, 2010).

En la imagen se pueden visualizar los pozos ya mencionados en diversas figuras del presente trabajo incluyendo la anterior, pero se muestran con coordenadas aproximadas y a escala en el software PETREL, que como ya se ha mencionado, es ampliamente usado en la industria petrolera y otras áreas de las ciencias de la Tierra, se ilustra además de los pozos la ubicación aproximada del cráter de impacto del Chicxulub.

Los pozos exploratorios se perforan con el propósito principal de buscar y evaluar características específicas, estos pozos desempeñan un papel crucial aunque también implica un riesgo debido a la incertidumbre asociada con los resultados,

⁴⁰ La imagen fue creada con ayuda de las coordenadas aproximadas y el software PETREL para poder hacer visualizaciones en 2D y 3D.

⁴¹ Escala 1:50 indica que las distancias trazadas son 50 veces más pequeñas que la original, por lo que las coordenadas expresadas en UTM serán menores a las reales.

estos pozos deben de guardar ciertas características como ser verticales, con la ayuda de las imágenes de sísmica y los modelos planteados se puede observar que en ciertas etapas se pueden tener problemas como torque y arrastre alto debido a la fricción que puede generar la sarta de perforación con las paredes del pozo al atravesar ciertos estratos, esto puede ser derivado por presiones diferenciales que se asocian a fallas, fracturas, entre otros Fig. 54. Esto sucede en la perforación de pozos petroleros, en particular y con base en la experiencia personal, en el campo Akal del complejo Cantarell justo al perforar en zonas de fallas se debe diseñar de forma adecuada tanto la barrena como la densidad del lodo para evitar problemas derivados de las presiones diferenciales, la densidad se aumenta o se disminuye de forma gradual en cuanto se acerca a la zona de presión anormal alta o baja. Tomando en cuenta que el pozo Yaxcopoil-1 se encuentra situado sobre la zona de fallas muy probablemente se hubieran presentado ese tipo de problemas por presión diferencial si la profundidad total hubiera alcanzado profundidades de entre 1,900 m y 3,600 m como se ilustra en la Fig. 55, donde se hace una suposición de la trayectoria sobre una sección sísmica.

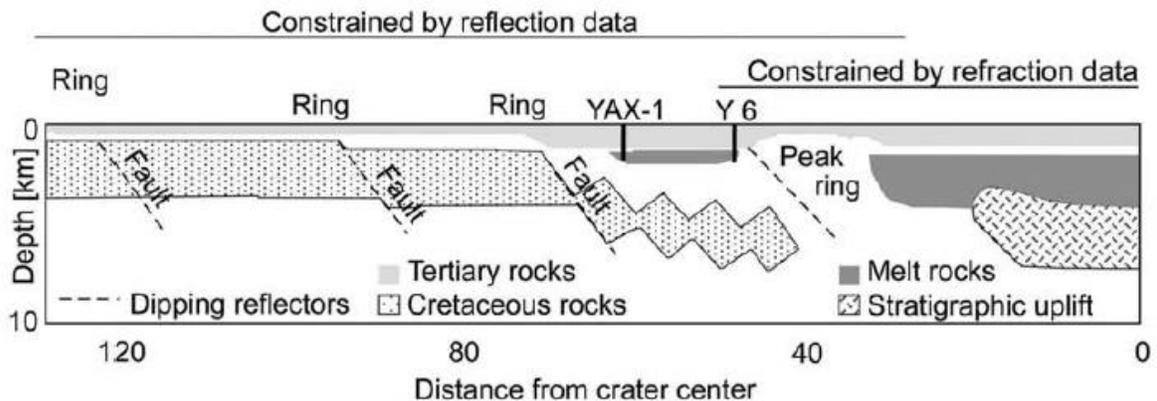


Fig. 54 Se muestra la ubicación del pozo Yaxcopoil-1 en una sección transversal que muestra las principales estructuras (rediseñado por Morgan et al, (2000).

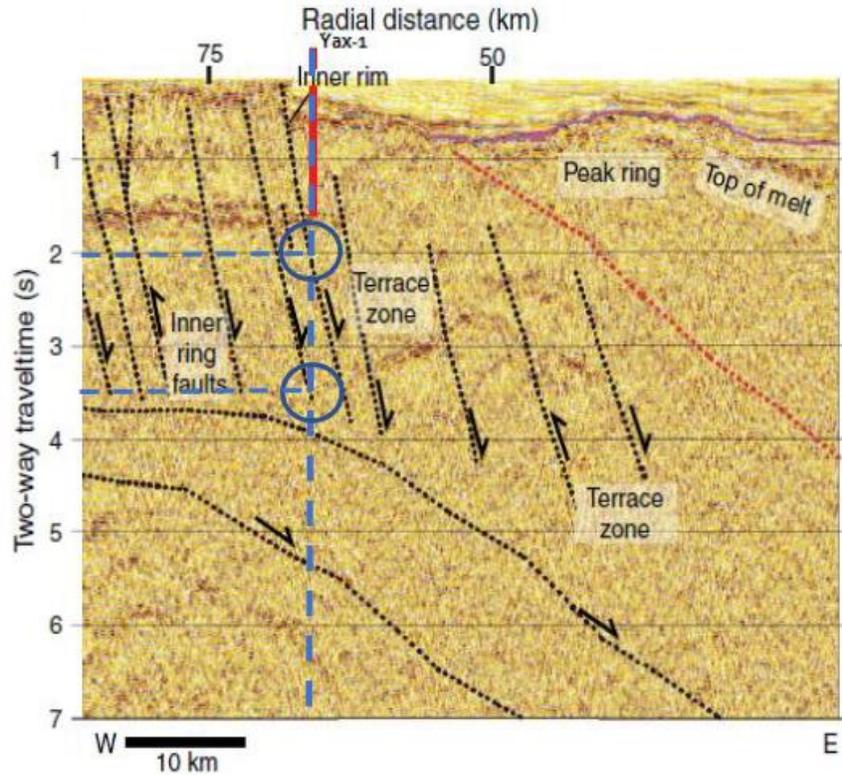


Fig. 55 Se muestra la ubicación del pozo Yaxcopoil-1 en una sección sísmica que muestra las principales estructuras del cráter y la proyección⁴².

La imagen es la mostrada en la Fig. 24 con una ligera modificación, se usó para estimar los posibles contactos con las fallas presentes en la zona, la Fig. 56 es un ejemplo de una sección sísmica en donde se observan un pozo vertical y uno tipo “S” dentro de una zona fracturada, la Fig. 57 es un ejemplo de la sección geológica que muestra los mismos pozos descritos en la sección sísmica.

Aunque las fracturas fueron generadas por un evento completamente diferente, la forma parece tener similitudes a las fracturas que se localizan después del anillo de picos, se debe recordar que el campo Akal se encuentra en la Sonda de Campeche y la zona productora es la asociada a BKS⁴³, aunque en el caso del pozo vertical la zona productora se encontró en JSK⁴⁴.

⁴² La imagen muestra solo una proyección de forma vertical hasta observar los posibles contactos con las fallas generadas por el impacto y donde posiblemente se presentarían presiones anormales.

⁴³ BKS, son las siglas para denotar a la Brecha del Cretácico Superior.

⁴⁴ JSK, son las siglas para nombrar al Jurásico Superior Kimmeridgiano.

indicador es el alto torque y arrastre, en caso de no poder liberarlo, el problema puede terminar en la pérdida de parte de la sarta de perforación, lo que hace que se aumenten los días de perforación y también los costos porque se debe sacar el equipo, cementar y realizar un sidetrack⁴⁷ cuando se trata de un agujero descubierto o de una ventana⁴⁸ si la operación se debe llevar a cabo dentro de alguna tubería de revestimiento.

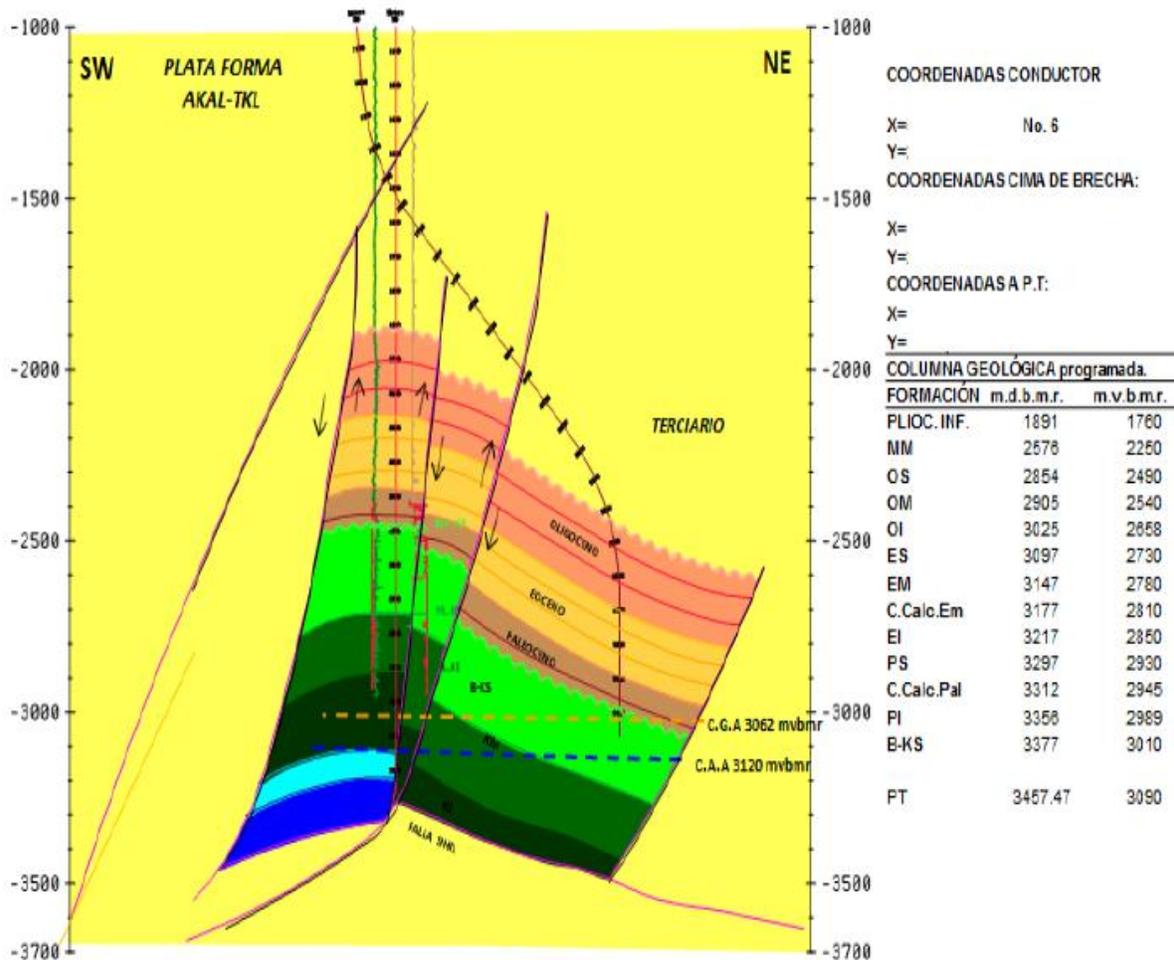


Fig. 57 Se muestra un ejemplo de la sección geológica obtenida del programa de perforación de un pozo de PEMEX donde se muestra un pozo vertical y un pozo tipo "S".

⁴⁷ Sidetrack es el término que se usa para el cambio de dirección en la perforación de un pozo petrolero ya sea por problemas operativos o por llevar una dirección errónea.

⁴⁸ Ventana es el término que se usa para el cambio de dirección en la perforación de un pozo petrolero cuando la operación se lleva a cabo dentro de una tubería de revestimiento.

En la actualidad se realizan estudios de sismica de alta definición 2D y ellos pueden mostrar de una forma más clara la composición del subsuelo, sería interesante poder hacer estudios de sismica a lo largo de las zonas ya perforadas para poder suministrar de información a los científicos que realizan estos estudios, pero ahora con la litología ya descrita y con ello talvez poder corregir o corroborar las técnicas empleadas para el trabajo de investigación. Esto podría representar una buena contribución a la perforación de pozos petroleros o de investigación científica ya que la sismica es el paso anterior a la perforación y se depende de la información proporcionada para diseñar el programa de perforación, aunque la información que se proporciona es de mucha utilidad, cuando se perfora se corrobora que los estudios de sismica son una excelente aproximación a lo que en realidad se encuentra en el subsuelo, pero inevitablemente hay variaciones.

A manera de propuesta sería conveniente buscar presupuesto para realizar estudios de sismica de alta definición a lo largo de varios pozos ya perforados en la zona como se muestra en la Fig. 58, buscando suministrar de información a los investigadores y con ello poder hacer correcciones o reafirmar los métodos y técnicas que se tienen y con las que se trabajan.

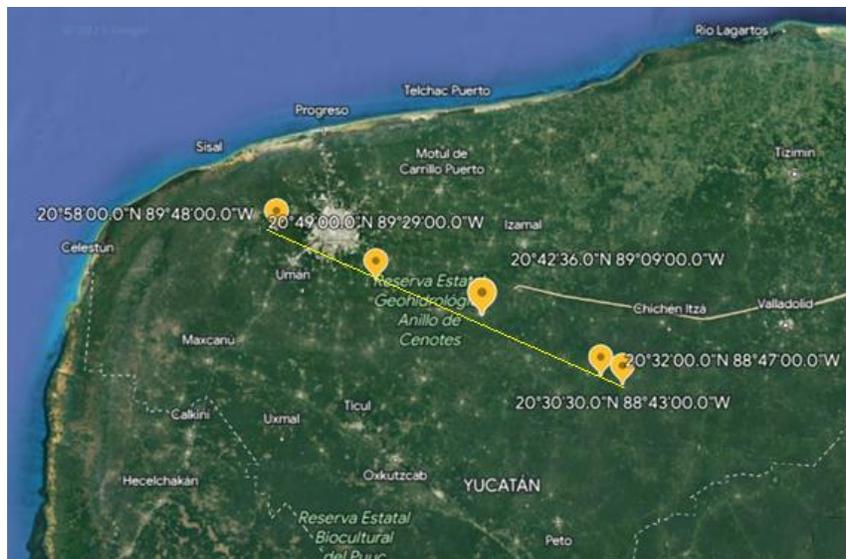


Fig. 58 Se muestra la propuesta de pozos para generar el estudio de sismica de alta definición.

Con las columnas litológicas se calcularon las profundidades y una vez localizadas se generó un modelo tridimensional en PETREL con una escala menor en las coordenadas “X” y “Y” para poder visualizar todos los pozos perforados más cerca, pero respetando el eje “Z” con la finalidad de observar las diferentes profundidades y con ellas relacionar las columnas.

Las figuras que se muestran a continuación sirven para ilustrar las profundidades de las brechas de impacto y la roca fundida por el impacto.

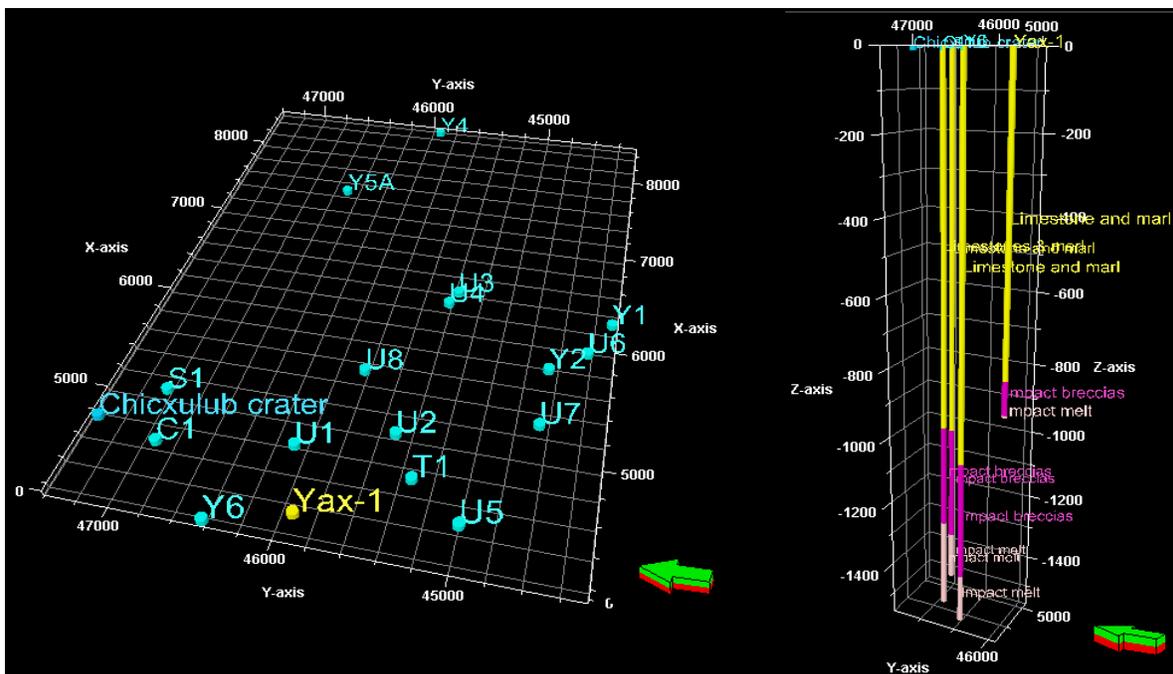


Fig. 59 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

La imagen muestra en el lado izquierdo una vista con un ángulo donde se ordenan los pozos de acuerdo a su cercanía al cráter de impacto y se buscará realizar las demás imágenes con ese ángulo para mostrar de una forma más clara como se comportan los espesores de interés, en el lado derecho se ilustran los cuatro pozos más cercanos al cráter, en color morado se ilustran las brechas de impacto y en un tono lila las rocas fundidas por el impacto, a partir de aquí solo se mostrarán esos intervalos para poder observarlos en el modelo 3D.

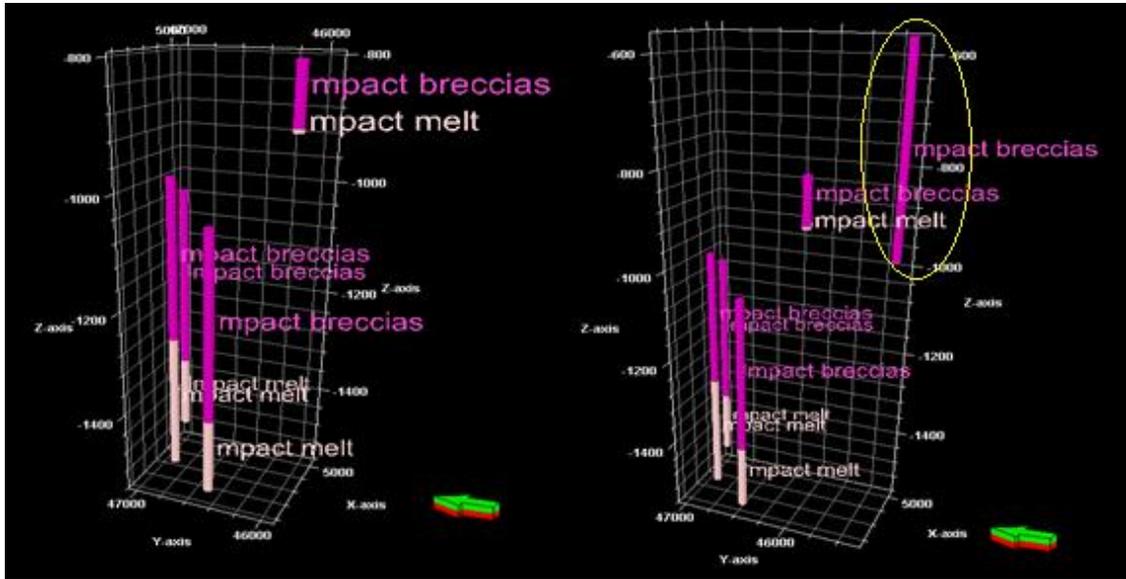


Fig. 60 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

Se muestra en el lado izquierdo los primeros cuatro pozos, en el lado derecho se adiciona el pozo T1 que se observa en el círculo amarillo.

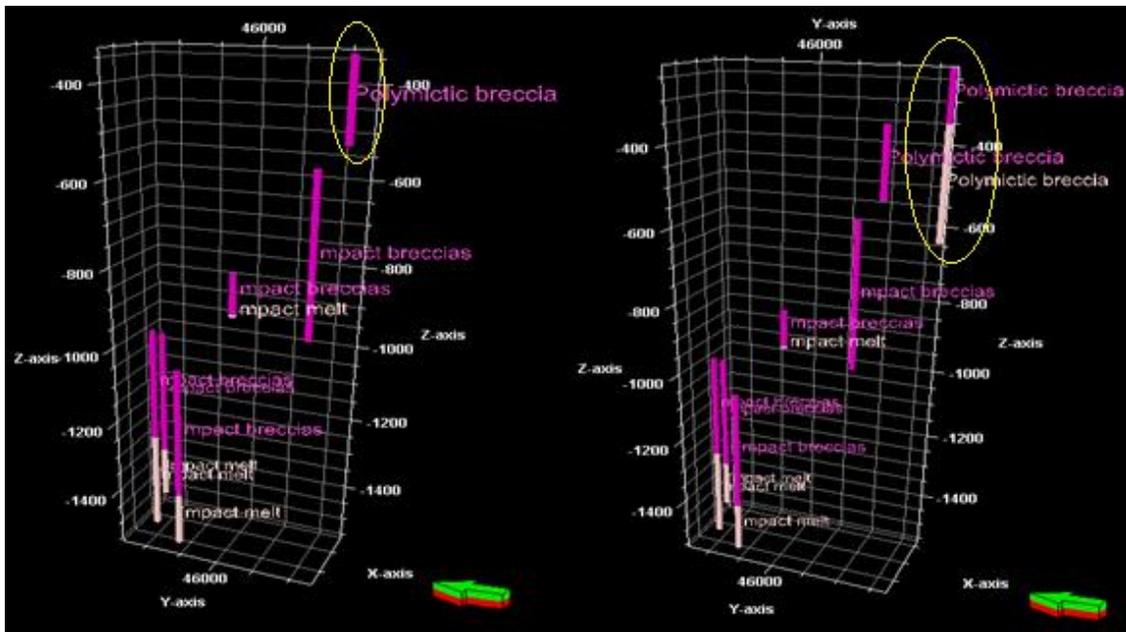


Fig. 61 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

Se muestra en el lado izquierdo adicionado el pozo Y2, en el lado derecho se adiciona el pozo U7 que se observan en el círculo amarillo.

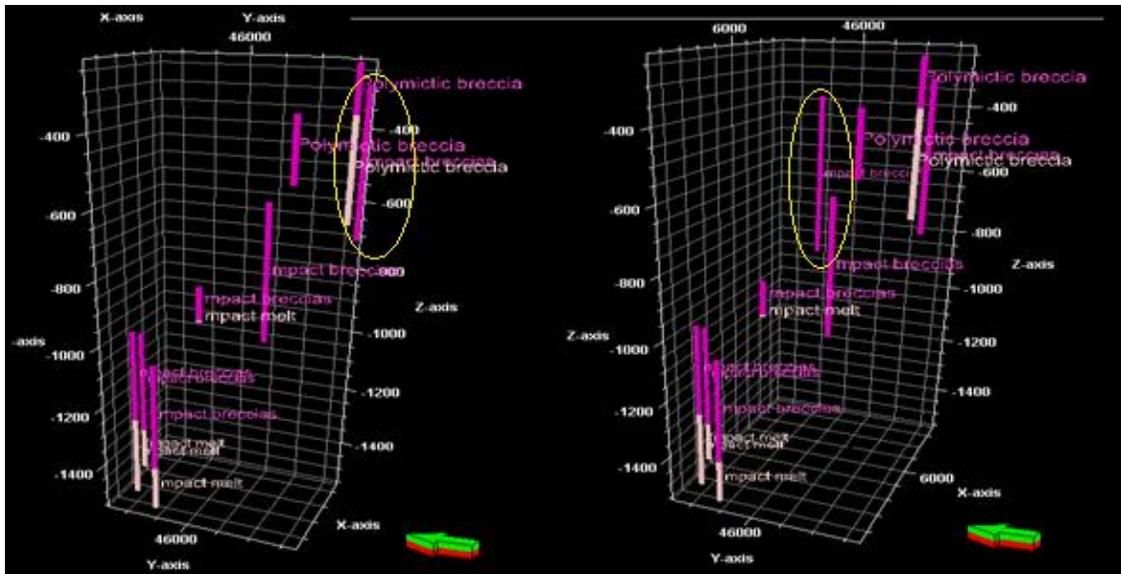


Fig. 62 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

Se muestra en el lado izquierdo adicionado el pozo U-6, en el lado derecho el pozo Y5A que se observan en el círculo amarillo.

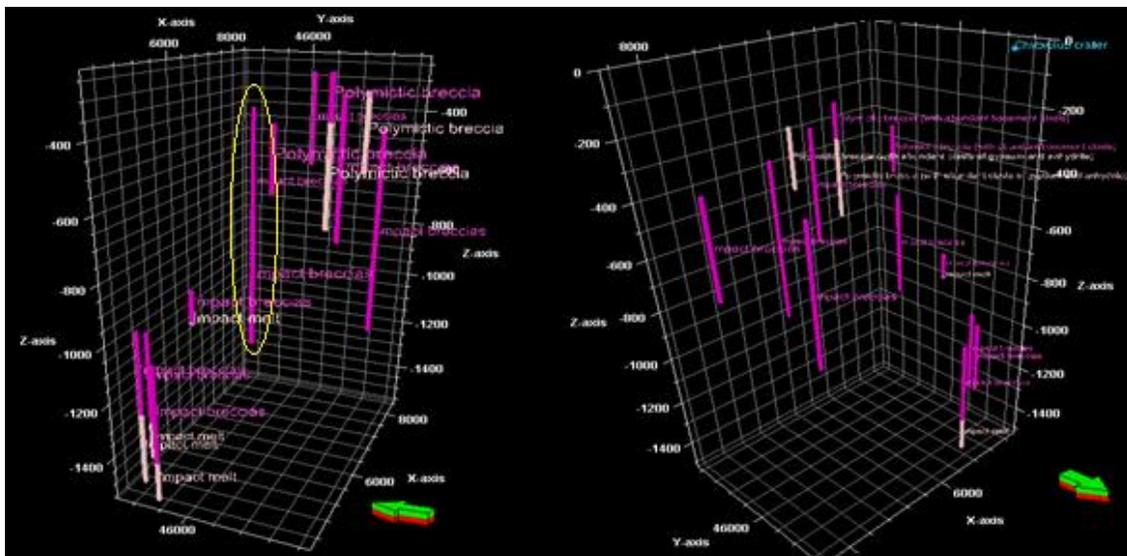


Fig. 63 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

Se muestra en el lado izquierdo adicionado el pozo Y4, en el lado derecho se muestran todos los pozos con un ángulo diferente como se indica con la flecha en color verde que indica la dirección norte, con la finalidad de ver las profundidades.

Con la construcción del modelo 3D se pudo identificar que en los pozos que rondan los 50 km de proximidad al centro del cráter la capa de brechas de impacto tiende a ser casi homogéneas Fig. 64, y a partir del pozo Yaxcopoil-1 la capa se encuentra más cerca de la superficie.

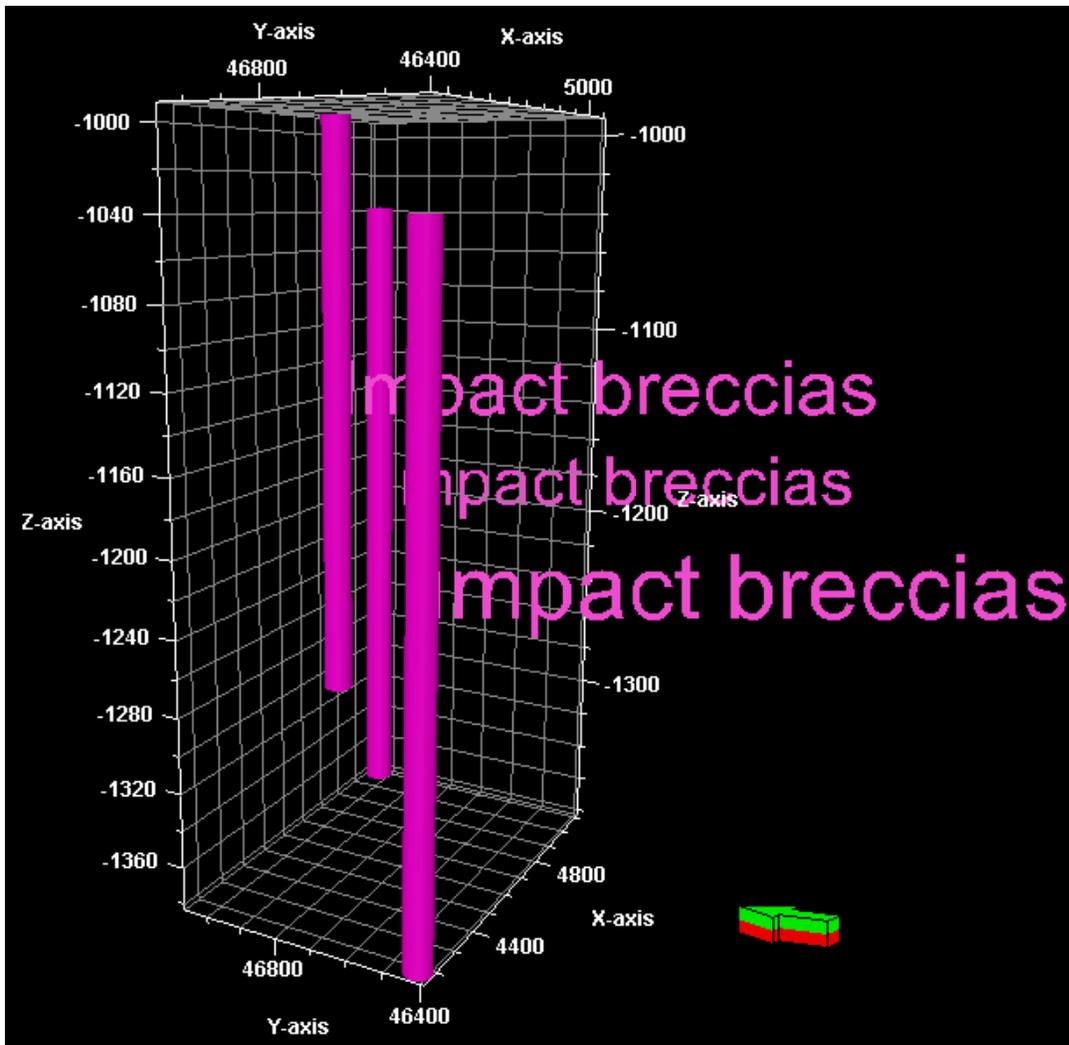


Fig. 64 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

La imagen muestra las profundidades reales solo de la brecha de impacto y se observan casi homogéneas, la Fig. 65 es una vista lateral desde el sur.

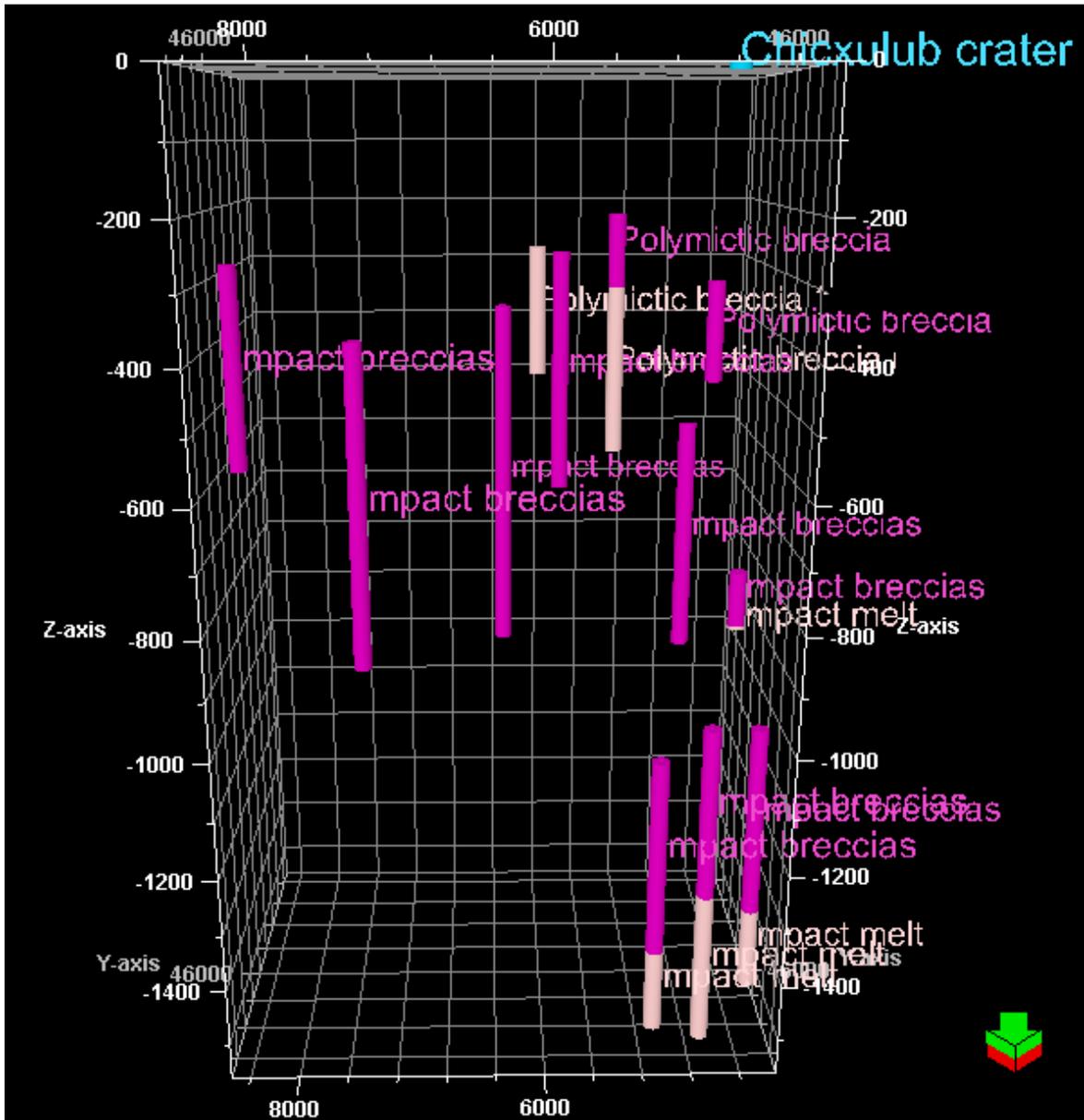


Fig. 65 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

Es importante resaltar que de acuerdo con los estudios realizados las Fig. 27 y Fig.28 cobran mucho sentido ya que en ellas se describe la columna litológica y al

tener la misma imagen vista desde el sur, pero con todos los estratos mostrados guarda la apariencia mostrada en la Fig. 66.

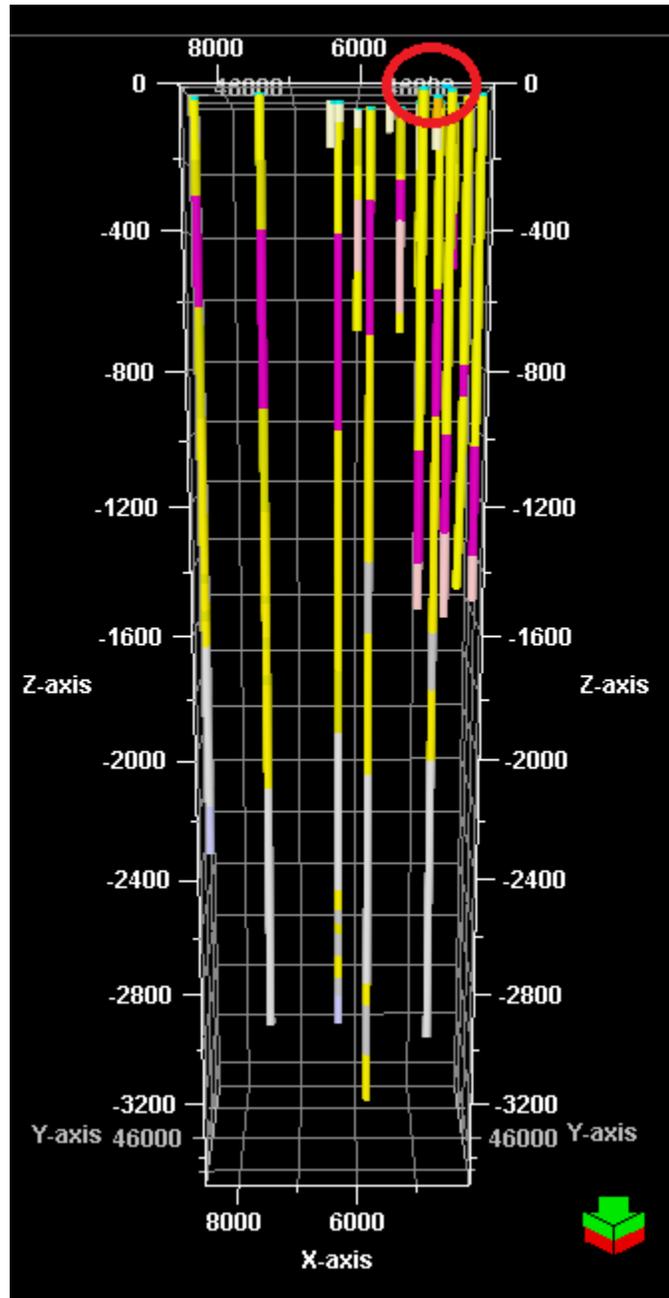


Fig. 66 Se muestra el modelo en 3D generado en PETREL.

En la imagen el cráter está ubicado hacia el norte y se podrá visualizar en la esquina superior derecha (marcado con un círculo rojo), si se observa la imagen de izquierda a derecha se visualizará el aumento en la profundidad de la brecha de impacto y la roca fundida (morado y lila, respectivamente), esa también es la dirección de los pozos más profundos. Con este modelo puede ser más sencillo hacer correlaciones para perforaciones futuras ya que con la ayuda de la Fig. 48, donde se muestra el cráter y con círculos en color amarillo las distancias a cada uno de los pozos se pueden trabajar las correlaciones donde se deberán esperar comportamientos y columnas litológicas similares en la perforación. Se plantea en este punto un pozo hipotético al que le llamaremos Yax-h y se propondrá en una locación a la altura del cráter de Chicxulub, pero recorrida hacia el este Fig. 67 y Fig. 68.

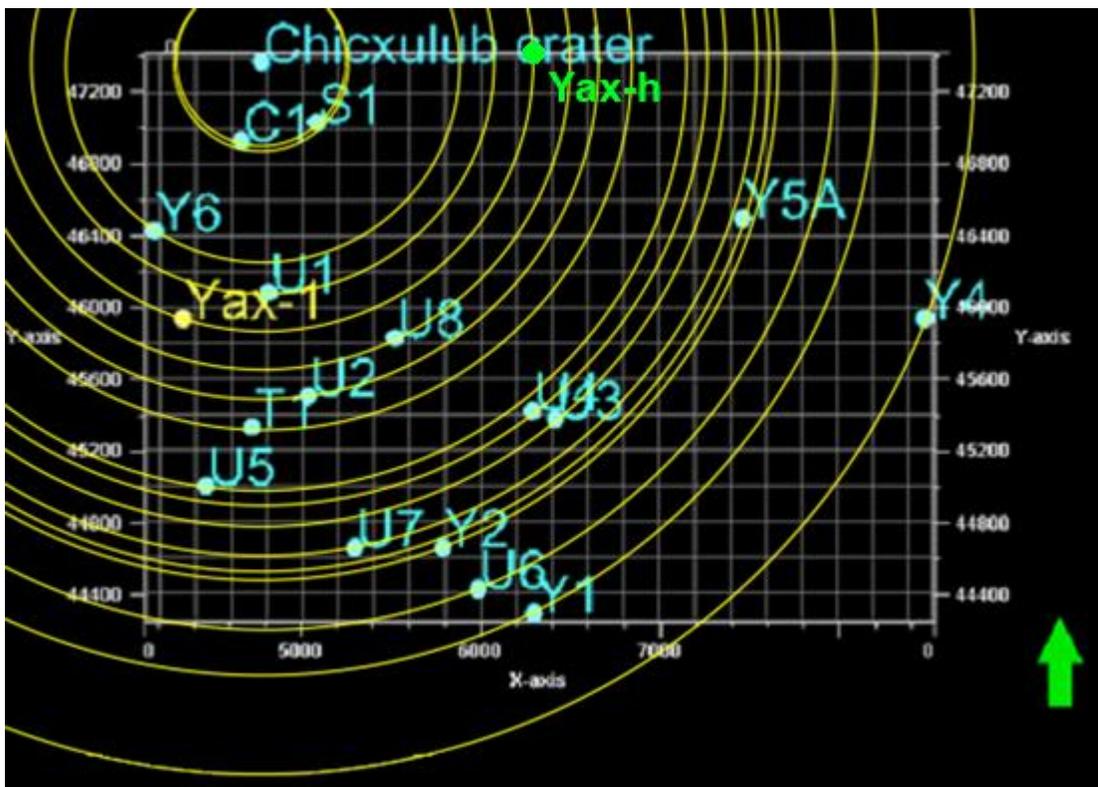


Fig. 67 Se muestran los pozos perforados por PEMEX, la UNAM, IOCP y el pozo hipotético Yax-h.

En la imagen se muestra la Fig. 48 pero adicionando el pozo hipotético Yax-h, con ello se tomarán las coordenadas en UTM para cargar el nuevo pozo al modelo

generado en PETREL para mostrar la litología posible a encontrar durante la perforación.

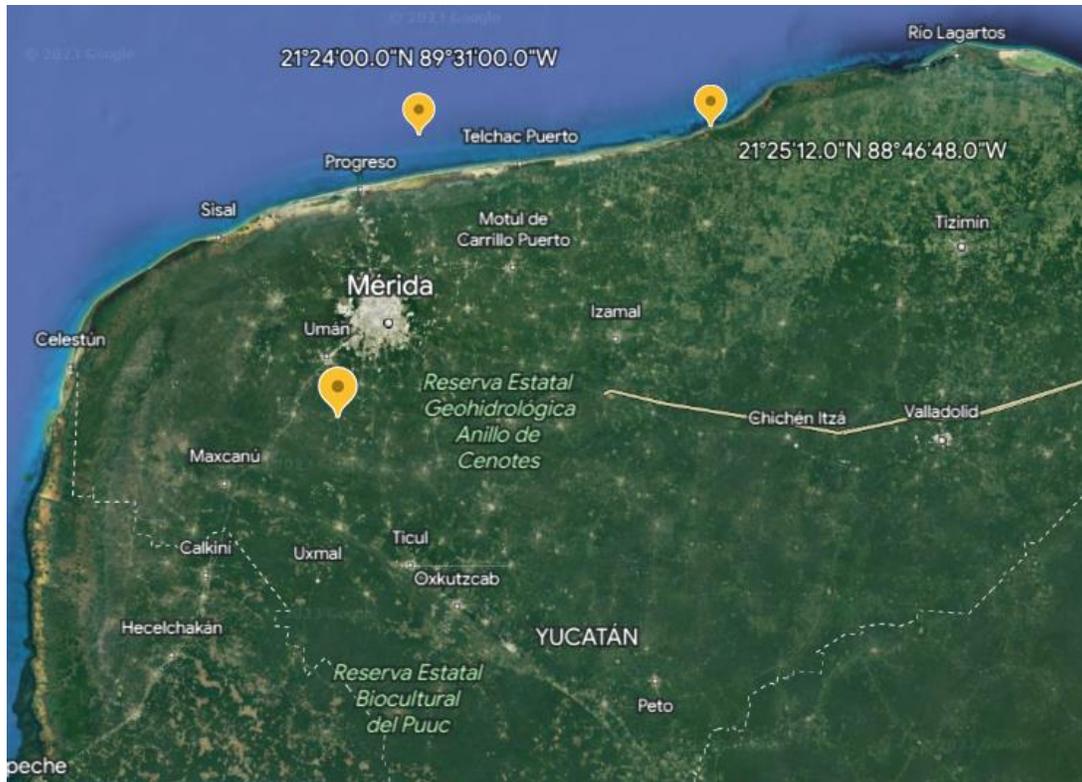


Fig. 68 Se muestra las coordenadas geográficas del pozo hipotético Yax-h, el cráter de Chicxulub y las del pozo Yaxcopoil-1.

La imagen muestra las coordenadas geográficas obtenidas mediante la aplicación de Google Earth para poder visualizar los puntos de interés, la Fig. 69 muestra un esquema en la parte superior y una imagen de sísmica en la parte inferior, podemos inferir que, si tomamos distancias radiales en el cráter, pueden considerarse similitudes en distancias iguales aunque la estructura es asimétrica y esto está documentado (Schultz y D'Hondt, 1996; Hildebrand *et al.* 1998). Para resolver el conflicto de la asimetría se necesitan modelos de mayor resolución con datos estructurales y estratigráficos detallados de las diferentes ubicaciones y unidades litológicas del cráter (Batista *et al.* 2013). Cuando se perforó el pozo Yaxcopoil-1 no se tenían estudios de sísmica por lo que haber encontrado solo 100 metros de

brecha de impacto fue algo inesperado (Tuchscherer et al, 2004), pero para esta propuesta simplemente se duplicará el pozo Yax-1 en el modelo de PETREL para generar una vista de los pozos más cercanos Fig. 70.

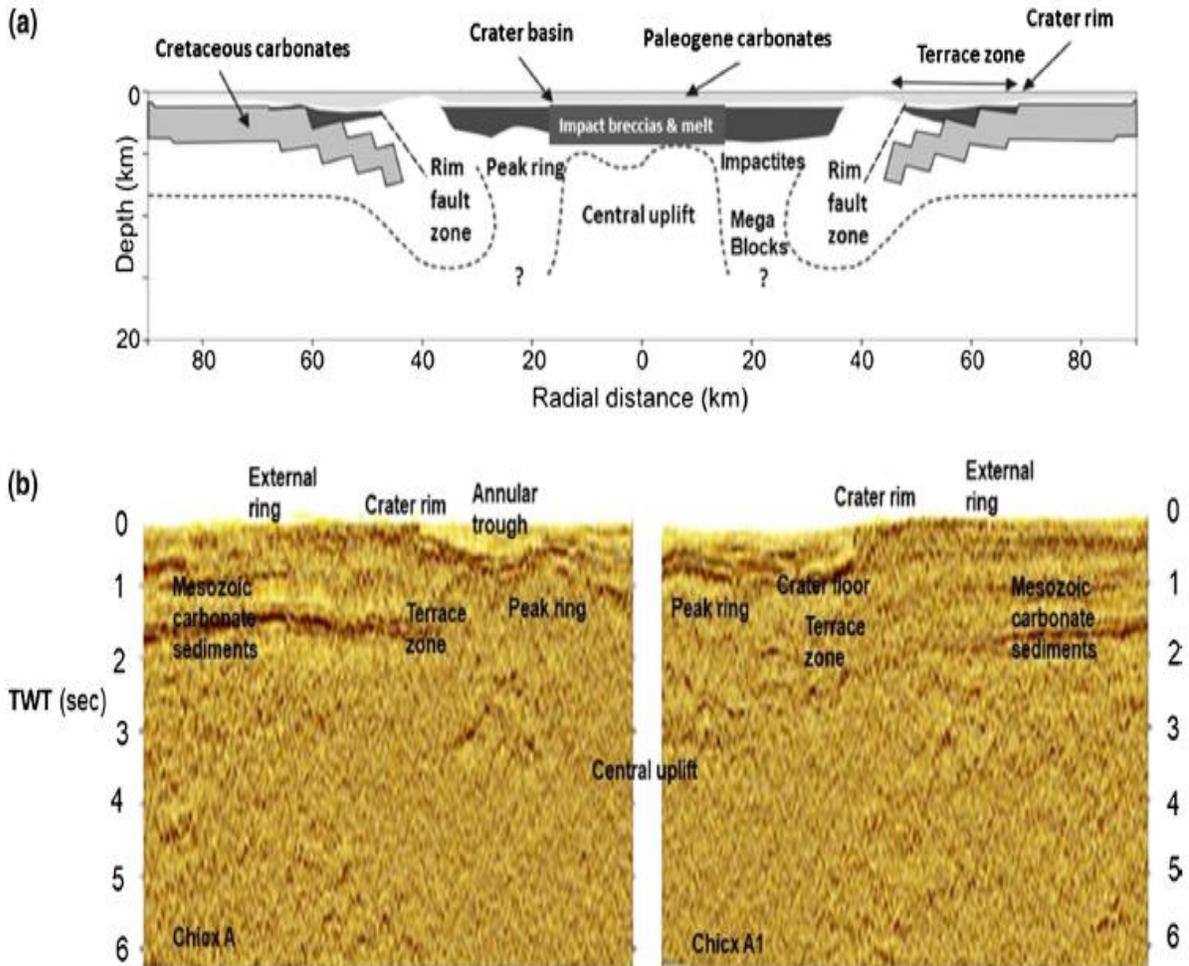


Fig. 69 Se muestra a) un esquema del cráter indicando distancias radiales modificado por (Morgan et al, 2000; Collins et al, 2008; Gulick et al, 2013), b) imágenes sísmicas de las líneas de Chicx_A y Chicx_A1.

Al observar el esquema superior y la imagen sísmica en la parte inferior se puede tener una mayor certeza de las zonas que componen el cráter y las profundidades, se puede entender mejor la altura donde se encuentran las brechas de impacto y el por qué en pozos más alejados como Y5A, Y4, Y1 y U6 los cuales superan los 120 km de distancia al centro del cráter, tienen una cantidad considerable de restos del

impacto y esto se debe a que la deformación lateral no alcanzó a generar fracturas considerables y es por eso que el material de la eyecta tiende a depositarse de forma más uniforme en distancias más grades, tomando en cuenta que los efectos y restos del impacto han alcanzado los 300 km alrededor del cráter Fig. 71.

Según datos de PEMEX, las rocas almacenadoras de hidrocarburos en la brecha de la región sureste provienen del impacto de Chicxulub y se considera que derivado de ese evento se tiene como zona productora la brecha del Cretácico Superior (BKS) y la Fig. 71 puede confirmar que eso es posible ya que la localización de los yacimientos de Cantarell y Ku-Malob-Zaap se encuentra en el límite de la eyecta de material derivado del impacto del meteorito.

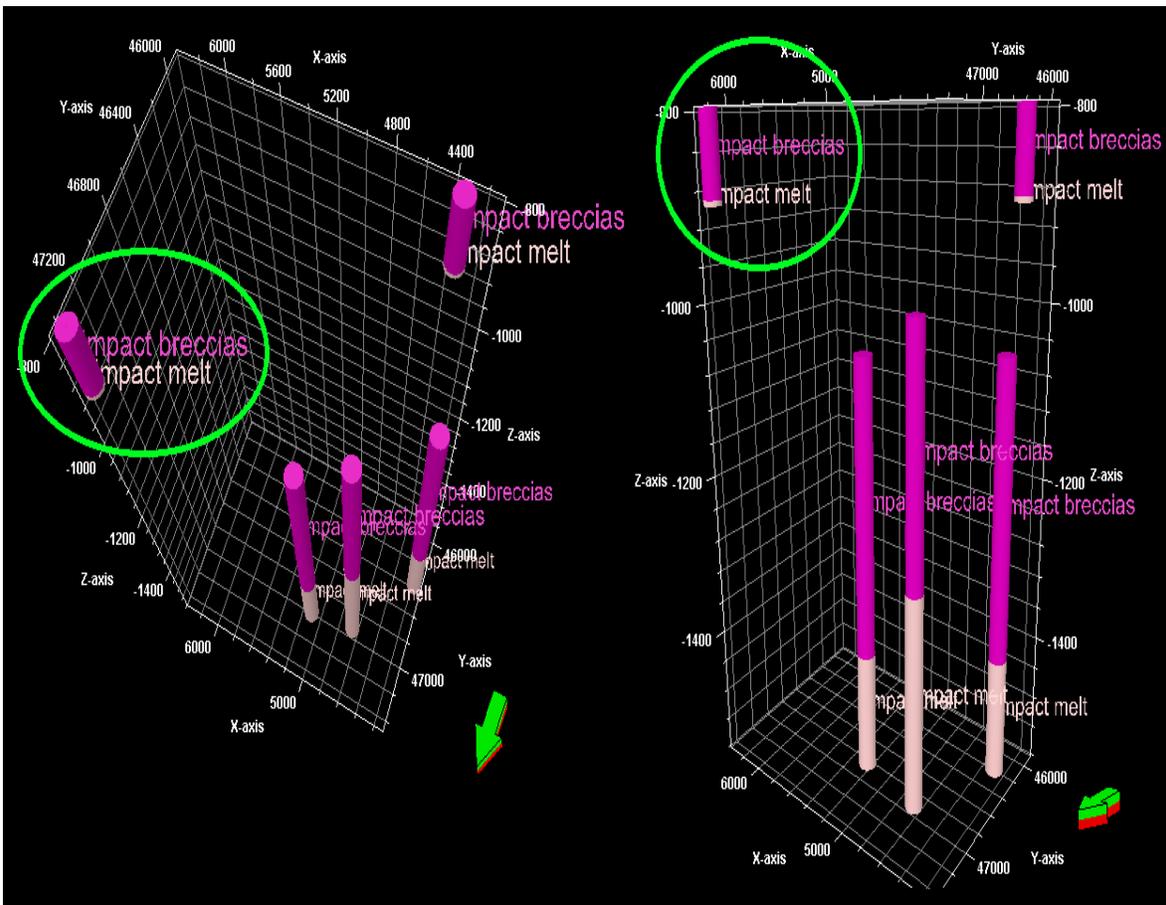


Fig. 70 Se muestra el modelo en 3D con los pozos cercanos al cráter y el pozo hipotético Yax-h encerrado en un círculo verde.

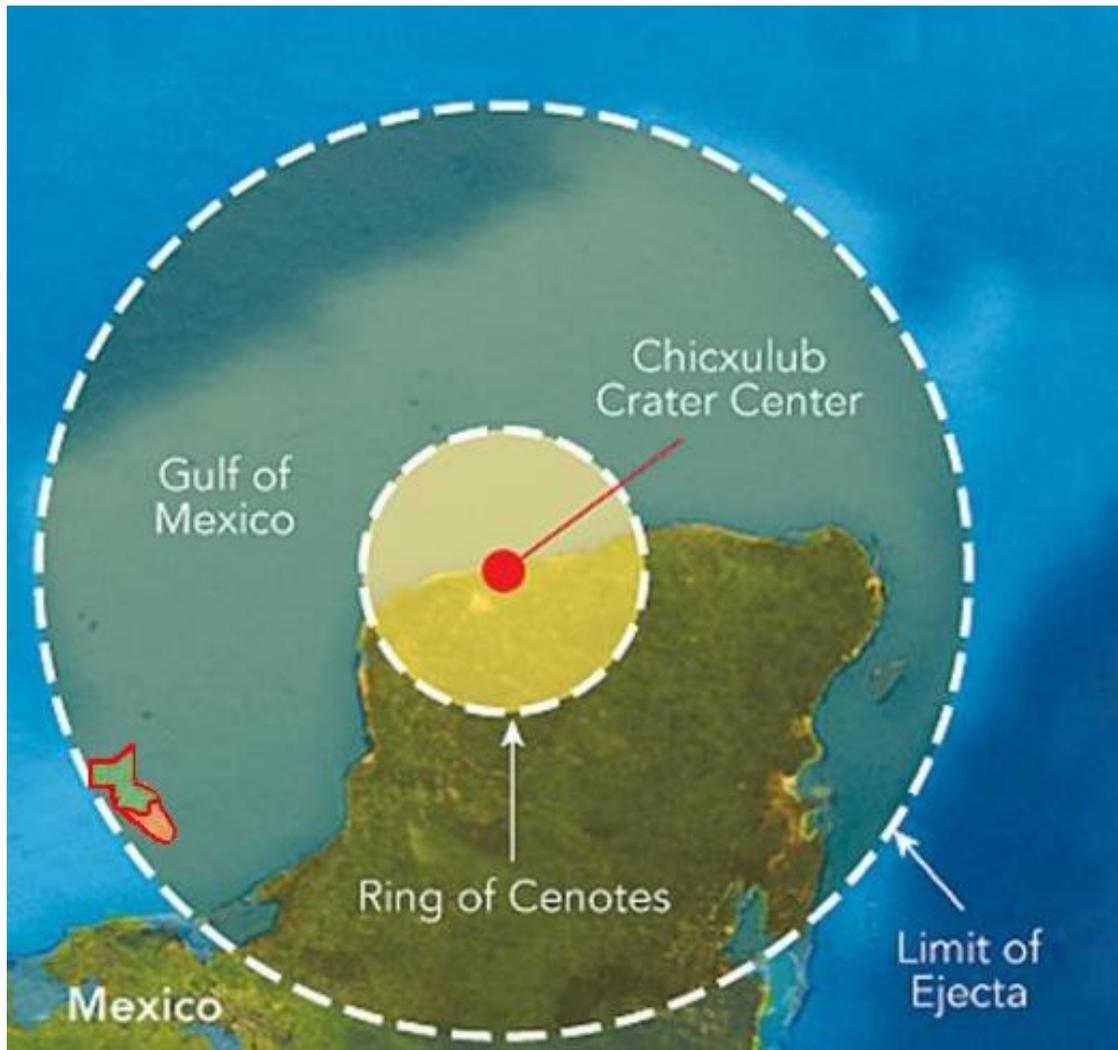


Fig. 71 Se muestra una imagen donde se muestra el centro del cráter, el anillo de cenotes (hay una reserva estatal en el estado de Yucatán) y se muestran los límites de la eyecta y la representación de los yacimientos Cantarell y Ku-Maloob-Zaap.

Conclusiones

Al analizar la perforación del pozo Yaxcopoil-1 y con la búsqueda de la información para poder realizar el presente trabajo, lo primero que se debe reconocer, es que la labor que se realiza por parte de los científicos es conseguir recursos para llevar a cabo dichas investigaciones y es por esta limitante que se propone emplear herramienta especializada, con una técnica para obtener más información derivado de un solo pozo y con menos recursos monetarios, en la industria petrolera este tipo de estudios y análisis son llevados a cabo por parte de los equipos y se tienen los recursos suficientes para llevar a cabo los procedimientos.

La propuesta para reducir los tiempos de perforación con la ayuda de una zapata perforadora y una técnica de perforación de pozos multilaterales que pueden, en conjunto, reducir los costos de la perforación ya que se puede ahorrar hasta un 40% del tiempo de perforación en las primeras etapas ya que no existe la necesidad de introducir y sacar el equipo de perforación, sino perforar hasta la profundidad deseada y cementar de inmediato ya que esa es la función de la zapata perforadora. Se debe recordar que en esas primeras etapas siempre existe el riesgo de colapso de los agujeros si no se llevaron a cabo buenas prácticas de perforación, adicionalmente el programar pozos multilaterales puede ayudar a recuperar la mayor cantidad de información sin la necesidad de iniciar nuevamente el proceso de perforación desde cero y en ese punto se debe considerar que para que sea rentable se deben considerar al menos dos pozos en la misma locación ya que en las operaciones de perforación cerca del 30% del costo total de la perforación se dedica a la movilización e instalación de la torre de perforación y sus componentes.

Aunque las empresas dedicadas a la perforación de pozos, ya sea para el sector petrolero o con fines de investigación científica, tienen experiencia no está de más indicar que se debe conformar la perforación en zonas de presión diferencial y se

deben hacer viajes de reconocimiento además de monitorear todo el tiempo los indicadores de torque y arrastre. Se deben medir los tiempos de atraso en cada una de las etapas del pozo para llevar a cabo la circulación de lodo al menos 1.5 veces el tiempo de atraso para garantizar la limpieza del agujero y llevar a cabo pruebas de cementación para evitar filtraciones ya sean naturales o inducidas por la operación de perforación.

Al buscar un registro giroscópico del pozo, no fue posible obtenerlo para poder ejecutar de mejor manera las trayectorias de cada uno de los pozos descritos por lo que el generar el modelo tridimensional fue un reto, sobre todo al obtener las cimas de las litologías, pero una vez obtenidas y con base en la experiencia profesional y con la ayuda de un registro giroscópico de un pozo vertical en la Sonda de Campeche, en particular en el campo Akal, se ajustaron los parámetros de cada uno de los pozos a las profundidades determinadas para poder llevar a cabo el modelo 3D. Ante esa problemática se puede sugerir que se incluya este estudio al final de la perforación para poder corregir, si es necesario, la dirección del depósito de los sedimentos ya que el registro muestra de forma exacta la trayectoria direccional del pozo perforado indicando la severidad y la dirección de dicha inclinación y el costo de este estudio debe considerarse dentro del presupuesto de perforación del pozo.

El continuar con el estudio del cráter es de importancia porque se podría extrapolar a las investigaciones planetarias que ya están avanzadas, otro de los retos que se podrían presentar al seguir investigando, es que parte de la zona de impacto se encuentra en zonas reservadas debido a la construcción del Tren Maya y esto podría convertirse en un reto al obtener los permisos para continuar con la investigación, pero si se logran superar y se consiguen los recursos económicos necesarios, sería muy interesante conocer los resultados que arrojen las futuras investigaciones.

Bibliografía

Libros

Melosh, H. J., (1989). *Impact cratering: A geologic process*: N.Y., Oxford University Press.

Poveda, A. & Espejo, F. (2011). *El cráter de Chicxulub y la extinción de los dinosaurios hace sesenta y cinco millones de años*. Colegio Nacional, segunda edición.

Stanley, S. (2009). *Earth System History*. W. H. Freeman and Company New York. Tercera edición.

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., (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction. *Science*, vol. 208, p 1095–1108.

Bratton, T., Viet, D., Van Que, N., Duc, N., Gillespie, P., Hunt, D., Li, B., Marcinew, R., Ray, S., Montaron, B., Nelson, R., Schoderbek, D. & Sonneland, L. (2006). The nature of naturally fractured reservoirs. *Oilfield Review*. p 4-25.

Camargo, A. & Suárez, G. (1994). Evidencia sísmica del cráter de impacto Chicxulub. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración*, v. 34, p. 1–28.

Christeson, G., Collins, G., Morgan, J., Gulick, S., Barton, P. & Warner, M., (2009). Mantle deformation beneath the Chicxulub impact crater. *Earth and Planetary Science Letters* vol. 284, p. 249–257.

Grajales, J., Cedillo, E., Rosales, C., Moran, D., Alvarez, W., Claeys, P., Ruiz, J., Garcia, J., Padilla, p. & Sanchez, A. (2000). Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields. *Geology*, v. 28, no. 4, p. 307-310.

Gulick, S. (2017). Chicxulub: drilling the K-Pg impact crater. *International Ocean Discovery Program Expedition 364 Preliminary Report*, 2017.

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

Hildebrand, A., Penfield, G., Kring, D., Pilkington, M., Camargo, A., Jacobsen, S. & Boynton, W. (1991). Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, vol. 19, p 867–871.

Kenkmann, T., Wittmann, A. & Scherler, D. (2004). Structure and impact indicators of the Cretaceous sequence of the ICDP drill core Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science*. no. 39, Nr 7, p 1069–1088.

Kring, D., Hörz, F., Zurcher, L. & Urrutia, 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.

Lawton, TF, Jackson, MPA y Hudec, MR (2012). El ambiente tectónico y los estilos estructurales de las cuencas sedimentarias de México. *Boletín AAPG*, 96(4), 625-672.

López, 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.

Magoon, L. & Dow, W. (1994). *The Petroleum System*. American Association of Petroleum Geologists. Vol 60. p 3-22.

Morán, D., Corona, P. & Tolson, G. (1996). Uplift and subduction erosion in southwestern Mexico since the Oligocene: pluton geobarometry constraints: *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 141, p 51-65.

Morgan, J., Gulick, S., Bralower, T., Chenot, E., Christeson, G., Claeys, P., Cockell, C., Collins, G., Coolen, M., Ferrière, L., Gebhardt, C., Goto, K., Jones, H., Kring, D., Le Ber, E., Lofi, J., Long, X., Lowery, C., Mellett, C., Ocampo, R., Osinski, G., Perez, L., Pickersgill, A., Poelchau, M., Rae, A., Rasmussen, C., Rebolledo, M., Riller, U., Sato, H., Schmitt, D., Smit, J., Tikoo, S., Tomioka, N., Urrutia, J., Whalen, M., Wittmann, A., Yamaguchi, K. & Zylberman, W. (2016). The formation of peak rings in large impact craters. *Science*. vol. 354. p 878-882.

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., Buffler, R., Urrutia, J. & Grieve, R. (2002). Chicxulub: Drilling the K–T Impact Crater. Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico, no. 4, p. 39.

Ormö, J. & Oms, O. (2013). La formación de cráteres de impacto. Un proceso fundamental en el Sistema Solar. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. p 310-320.

Ortiz, C. (2019). Programas internacionales de perforaciones en océanos y continentes. Gaceta Chicxulub, Volumen 2-3, (17-18).

Ortiz, C., Urrutia, 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, R. (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.

Paz, H. (2016). Desarrollo y prueba de un sistema de radio telemetría para adquisición sísmica. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 27, núm. 1, pp. 111-130.

Penfield, G., *et al.*, (1981). Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity, Research Gate.

Pindell, J. y Kennan, L. (2009). Evolución tectónica del Golfo de México, Caribe y norte de Sudamérica en el marco de referencia del manto: una actualización. Sociedad Geológica, Londres, Publicaciones Especiales, 328(1), 1-55.

Popov, Y., Romushkevich, R., Bayuk, I., Korobkov, D., Mayr, S., Burkhardt, H. & 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.

Rosenfeld, J. (2002). El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Belice. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 55, no. 1, p 30-37.

Salvador, A. (1991). Origen y desarrollo de la cuenca del Golfo de México. En *la Cuenca del Golfo de México: Sociedad Geológica de América, Boulder, CO, Geología de América del Norte*, G-3 (págs. 389-444).

Sanchez, P. (2021). Análisis de núcleo de la secuencia carbonatada Cretácica, pozo Yaxcopoil, Chicxulub. *Gaceta Chicxulub* v 4-2, p 15.

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.

Urrutia, J. (2019). Programas internacionales de perforaciones en océanos y continentes. *Gaceta Chicxulub*, Volumen 2-3, (17-18).

Urrutia, J. & Pérez, L. (2015). El cráter de impacto Chicxulub y el límite Cretácico/Paleógeno. *Revista Digital Universitaria*. Vol.16. No.6.

Urrutia, J. & Perez, L. (2011). Buried impact basins, the evolution of planetary surfaces and the Chicxulub multi-ring crater. *Feature. Geology Today*, Vol. 27, No. 6. p 222-227.

Urrutia, J., Camargo, A., Pérez, L. & Pérez, G. (2011). Discovery and focused study of the Chicxulub impact crater, *Eos Trans, American Geophysical Union*, vol. 92, no. 25, p. 209–216.

Urrutia, J. et al,(2010). The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Edición 2011, (99-127).

Urrutia, J., Moran, D., Sharpton, V., Buffler, R., Stöffler, D. & Smit, J. (2001). The Chicxulub Scientific Drilling Project. Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico, no. 3, 55 p.

Urrutia, J., Marin, L., Rebolledo, M., Soler, A. & Sharpton, V. (2000). Chicxulub Scientific Drilling Project: Geophysics and Well-Logging. *ICDP Newsletter*, v.2, p. 9–12.

Venegas, F. R., *et al.*, 2019. Registro fotográfico continuo del pozo Yaxcopoil-1 (YAX-1), *Gaceta Chicxulub* V2-3, p. 6-8.

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.