



---

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE NÚCLEOS DE PERFORACIÓN EN LA PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

**JUAN CARLOS BÁEZ MIRANDA**

**DIRECTOR: Dr. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI**



MÉXICO D.F., CD. UNIVERSITARIA  
2010

## AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

De manera especial quiero agradecer a las siguientes:

A Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones.

A mis Padres, a quienes agradezco de todo corazón por su amor, cariño y comprensión. En todo momento los llevo conmigo.

A mi hermana por la compañía y el apoyo que me brinda.

Al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

A mi alma mater a la Universidad Nacional Autónoma de México a la que nunca podre pagarle toda mi formación académica y por ende a la Facultad de Ingeniería.

A mis sinodales Ing. Manuel Villamar Viguera, Ing. Leonardo Cruz Espinoza, M.c. Gabriel Vázquez Castro y al Dr. Rafael de los Ángeles Herrera Gómez por sus comentarios en el proceso de revisión de la tesis y sus atinadas correcciones.

Gracias también a mis amigos, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante todo este tiempo.

---

ÍNDICE

<b>RESUMEN.</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>7</b>
OBJETIVOS. ....	7
PLATAFORMA CARBONATADA DE YUCATÁN. ....	9
CALIZAS. ....	16
DOLOMIÁS. ....	18
<b>CAPÍTULO 2.PERFORACIÓN Y RECUPERACIÓN DE NÚCLEOS.</b> .....	<b>20</b>
EL CRÁTER CHICXULUB. ....	20
EYECCIONES DE IMPACTO Y LA SECUENCIA DE CARBONATOS EN EL SECTOR ORIENTAL DEL CRÁTER DE CHICXULUB. ....	22
ASPECTOS DE LA PERFORACIÓN DEL POZO YAXCOPOIL-1.....	29
OPERACIONES DE PERFORACIÓN Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS DEL POZO YAXCOPOIL-1.....	31
REGISTROS EN EL POZO YAXCOPOIL-1.....	37
SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y BASES DE DATOS DEL CRÁTER CHICXULUB. ....	41
PROGRAMA DE PERFORACIÓN UNAM. ....	44
LITOLOGÍAS Y PROPIEDADES MAGNÉTICAS DEL POZO TEKAX. ....	51
<b>CAPÍTULO 3. MÉTODOS.</b> .....	<b>54</b>
ANÁLISIS DE DENSIDAD POZO YAXCOPOIL-1. ....	54
MÉTODO DE SUMERGENCIA. ....	57
ANÁLISIS QUÍMICO POZO TEKAX. ....	59
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b> .....	<b>63</b>
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS AL POZO YAXCOPOIL-1.....	63
DISCUSIÓN SOBRE EL ANÁLISIS DE DENSIDAD EN EL POZO YAXCOPOIL-1.....	70

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DEL POZO YAXCOPOIL-1.....	82
HISTOGRAMA DEL POZO YAXCOPOIL-1. ....	89
DISCUSIÓN SOBRE LOS ANÁLISIS EN EL POZO YAXCOPOIL-1.....	91
RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DEL POZO TEKAX. ....	94
DISCUSIÓN SOBRE LOS ANÁLISIS GEOQUÍMICOS DEL POZO TEKAX. ....	97
DISCUSIÓN SOBRE LOS ANÁLISIS EN EL POZO TEKAX. ....	110
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>120</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>124</b>

---

Resumen.

En este estudio, se utilizó una nueva técnica de análisis químico por fluorescencia de rayos X, empleando un detector portátil directamente en los núcleos de perforación. Esta técnica ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales que requieren de submuestreo y preparación de muestras, ya que son análisis no destructivos, emplean un tiempo de medición menor y se tiene un mejor control estratigráfico de las mediciones.

El estudio geoquímico proporciona información sobre un gran número de elementos mayores y trazas y es empleado convencionalmente en los registros geofísicos de rayos gama. Los estudios realizados en los núcleos de los Pozos Yaxcopoil-1 y Tekax permiten caracterizar las propiedades petrofísicas de las formaciones. La investigación desarrollada corresponde a registros geofísicos de pozos medidos directamente en los núcleos

La evaluación y análisis de núcleos de perforación se realizó en la plataforma carbonatada de Yucatán presentando los siguientes puntos: a manera de introducción se mencionan los objetivos y las características principales del lugar de trabajo; aspectos generales sobre la perforación; la metodología empleada, destacando el análisis de densidad y geoquímico de fluorescencia, los resultados y discusión de los mismos, así como las gráficas obtenidas. Por último se presentan las conclusiones a las cuales se llegaron con los temas que fueron abordados al realizar este trabajo.

**Capítulo 1. Introducción.*****Objetivos.***

El estudio y evaluación de los yacimientos carbonatados presentan un gran interés para la industria petrolera. A nivel mundial, las reservas de petróleo se encuentran en estos yacimientos con alrededor del 60%, por lo que el potencial es alto. Entre estos yacimientos destacan los campos en el Medio Oriente, Arabia Saudita, Kuwait y los campos en el Golfo de México.

Por otro lado, La exploración y explotación de estos yacimientos plantean problemas diversos, en particular en su evaluación y análisis de sus propiedades petrofísicas. Las determinaciones de porosidad y permeabilidad y estudios de flujo de fluidos presentan problemas adicionales. Akbar y colaboradores (2001) comentan que estos yacimientos requieren de análisis detallados y sobre la necesidad de desarrollar e implementar métodos nuevos de caracterización petrofísica. En el golfo de México, los campos principales en la Sonda de Campeche están asociados a los yacimientos carbonatados naturalmente fracturados.

En esta tesis se presentan y analiza el uso potencial de una herramienta de registros geofísicos de pozo que emplea análisis químico por fluorescencia de rayos-X. La técnica se aplica en núcleos de pozo recuperados en los proyectos de perforación en el cráter de Chicxulub en la plataforma de Yucatán y el Sureste del Golfo de México.

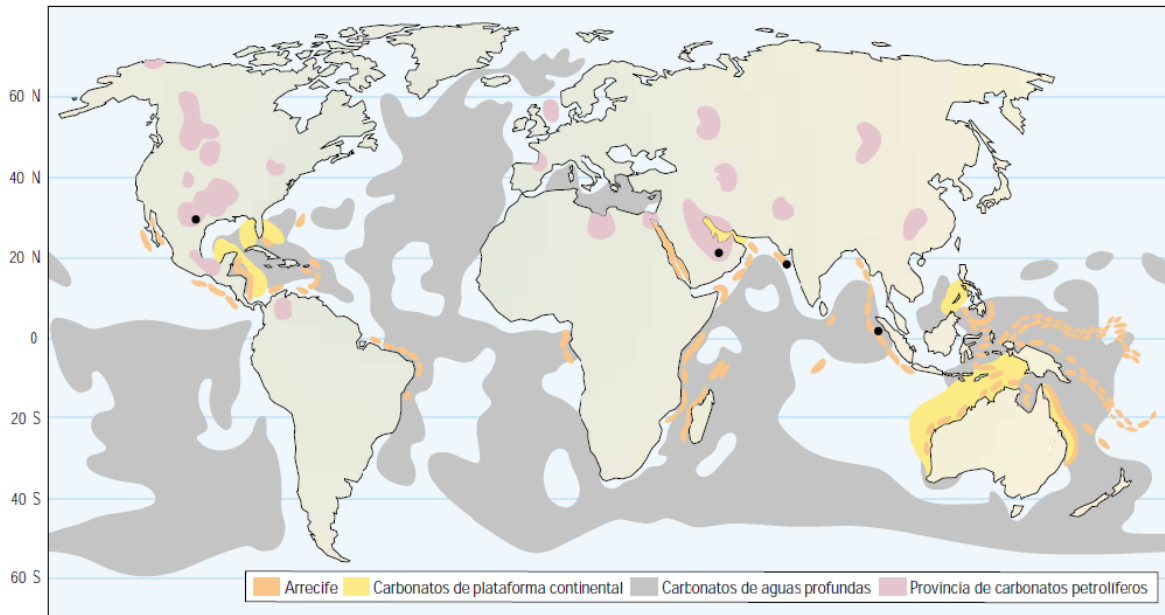


Figura. 1.1. Distribución de Rocas Carbonatadas, (Schlumberger, 2001 “Evaluación de Yacimientos Carbonatados”).

Los objetivos de la tesis incluyen:

- 1) Efectuar estudios de densidad y de análisis químicos en núcleos de los Pozos Yaxcopil-1 y Tekax ubicados en la plataforma carbonatada de Yucatán, en el Cráter Chicxulub, a fin de determinar las características de las propiedades petrofísicas de las formaciones.
- 2) Estudiar y analizar el uso de una nueva técnica de análisis químico por fluorescencia de rayos X, empleando un detector portátil directamente en los núcleos de perforación.
- 3) Estudiar y conocer aspectos de perforación y recuperación de núcleos como herramientas en la industria petrolera, como parte de los programas de exploración y explotación.

***Plataforma Carbonatada de Yucatán.***

La península de Yucatán corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental de Yucatán, que abarca una extensión de 500 000 km<sup>2</sup> y que separa al Mar Caribe del Golfo de México (Véase Fig. 1.1). En la península, los rasgos orogénicos están prácticamente ausentes, lo que es singular en el contexto nacional; 90% de su superficie están a menos de 200 msnm y la Sierrita de Ticul es la única elevación prominente. Topográficamente se puede dividir en planicie norte, Sierrita de Ticul y planicie del sur. La península carece de drenaje superficial debido a la litología (relativo a las rocas), y el río Hondo en la frontera con Belice es el único sistema fluvial de la península.

El clima de la península de Yucatán es cálido-subhúmedo con lluvias en verano, sin embargo, presenta un gradiente de precipitación que aumenta de noroeste a sureste, lo cual se refleja en la vegetación, desde la de zonas áridas en el noroeste, pasando por selvas bajas y medianas subcaducifolias y caducifolias (es decir, que pierden en parte o totalmente las hojas en la estación de secas), hasta selvas altas en el sur, cerca de Chiapas. En verano se presentan huracanes y en invierno, “nortes”.

El Bloque Yucatán es un bloque tectónico único, sin plegamientos, del Paleozoico, cuyo límite es la falla Motagua. Este basamento metamórfico de origen pangéico continental se separa del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México; su posición actual viene desde finales del Triásico (~ 200 millones de años). Sobre este basamento se ha acumulado una capa gruesa de



sedimentos marinos del Paleozoico Tardío, seguido por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas (rocas sedimentarias formadas a partir de los residuos de antiguos mares o lagos evaporados) que corresponden a una cuenca carbonatada limitada por arrecifes del Cretácico Temprano. Sobre éstas se encuentran calizas (rocas sedimentarias porosas formadas por carbonatos) depositadas en plataforma durante el Cretácico Tardío; la frontera entre el Cretácico y el Paleoceno presenta la estructura de impacto Chicxulub. La plataforma de Yucatán, conformada por calizas del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Cuaternario (65 millones de años al reciente), refleja un gradiente temporal en sentido norte-sur, lo cual indica una emergencia paulatina de la plataforma durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años). Este levantamiento paulatino explica la asimetría, que se extiende solamente unos 10 km en el margen del Caribe y hasta 200 km del lado del Golfo de México.

El tercio norte y la mitad oriental de la península están formados por carst de planicie, con elevación máxima de 10 m, compuesta por secuencias de capas horizontales de calcita y dolomitas del Terciario Tardío (Plioceno) de la formación Carrillo Puerto, limitada por los depósitos periféricos del Cuaternario. La formación Carrillo Puerto tiene un espesor de entre 163 y 240 m, con la presencia del foraminífero (orden de microfósiles marinos) *Archaias angulatus*, que actualmente se asocia a algas endosimbiontes, que viven en simbiosis con su huésped dentro de sus células, en aguas someras muy claras de plataformas continentales.

Los depósitos del Cuaternario están restringidos a una franja periférica angosta a lo largo de la costa. A lo largo de la costa norte estos depósitos constan de calizas compuestas por conchas de bivalvos, compactadas densamente. En la costa noreste los depósitos del Cuaternario son del Pleistoceno y su extensión y topografía se interpretan como carbonatos supramareales que reflejan los movimientos de la línea de costa, lo cual es consistente con la formación de cavidades extensas de la disolución subterránea asociada a la haloclina y su profundidad en relación con el nivel del mar en esa época, como se explica más adelante.

La topografía de la península presenta como rasgo más importante a los cenotes. Éstos se concentran en la parte norte, a lo largo de una línea imaginaria situada entre Tulum, Quintana Roo y Campeche, y disminuyen hacia el sur de la península. La roca kárstica se caracteriza por su alta permeabilidad y un gradiente hidráulico casi nulo; el agua de origen meteórico se infiltra y acumula en el subsuelo, formando una lente de agua dulce delgada que flota sobre una masa de agua salina más densa, cuyo origen es la intrusión marina natural. El contacto entre ambas masas de agua, dulce y marina, forma una zona de mezcla o haloclina que en conjunto conforman una componente geológica importante del acuífero. La lente de agua dulce constituye la única fuente de agua dulce en la península de Yucatán, desde tiempos prehistóricos, renovable solamente por la lluvia estacional.

Este acuífero es, por sus características, intrínsecamente vulnerable a la contaminación. La masa de agua marina ingresa por la costa a la península y llega hasta los 110 km tierra adentro en el estado de Yucatán. En estudios recientes, realizados por Patricia Beddows, se ha propuesto la existencia de una circulación salina profunda transpeninsular, derivada de las diferencias en el nivel del mar entre el Mar Caribe –más elevado– y el Golfo de México, con menor elevación.



Figura. 1.2. Geología de los Carbonatos de la Península de Yucatán, (Tomada de la Revista Arqueología Mexicana, AGT, México, 2002).

**Características Distintivas.**

- a) Su estructura configura un bloque tectónicamente estable que jugó un papel fundamental con su desplazamiento en la apertura jurásica del Golfo de México.
- b) Contiene en el subsuelo la huella del impacto catastrófico del límite Cretácico-Terciario que causó la extinción de más del 50 % de las especies biológicas del planeta, incluyendo completamente al grupo de los dinosaurios.
- c) Contiene un registro continuo de la sedimentación asociada con la subsidencia de la cuenca del Golfo de México.

Extensión en México: dimensión máxima 800 km de norte a sur y mínima de 600 km de este a oeste, con casi. 500,000 km<sup>2</sup> y un espesor medio de cobertura Cretácico-Terciario de 3,000 m, dando un volumen de 1'500,000 km<sup>3</sup> de sedimentos, es decir tres veces mayor que el volumen de rocas volcánicas asociado a la Provincia Ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental.

Limites: Al norte y poniente la Cuenca del Golfo de México, al sur la Cuenca Deltaica de Tabasco y el Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas, y al oriente la Cuenca de Yucatán, la cual presenta un basamento expuesto de esquistos del Paleozoico.

Edad: Jurásico-Cenozoico (Cobertura). Neo proterozoico Panafricano (Basamento).

Origen: Sedimentario marino en ambiente de plataforma somera y evaporítica.

Ambiente geotectónico: Plataforma cratónica desde el Paleozoico.

### **Estratigrafía General.**

Tiene como basamento un complejo cristalino-volcánico del Neo proterozoico hasta el Paleozoico tardío oculto bajo la cobertura sedimentaria del Mesozoico (Jurásico-Cretácico) y del Cenozoico.

### **Cobertura.**

Las rocas sedimentarias más antiguas identificadas en esta provincia se encuentran también ocultas bajo rocas más jóvenes del Cretácico y Cenozoico. Consisten en lechos rojos continentales que descansan directamente sobre el basamento Paleozoico y que por correlación regional con unidades semejantes del SE de México (Formación Todos Santos) se les asigna una edad del Jurásico Medio-Tardío.

De manera discordante sobre estas rocas continentales reposa una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas del Cretácico, interrumpida abruptamente por los depósitos del límite Cretácico-Terciario asociados con el impacto de Chicxulub. Salvo esta interrupción catastrófica, la sedimentación durante el Terciario es análoga a la del Cretácico, es decir, consiste esencialmente en carbonatos y evaporitas. Los carbonatos por lo general están fuertemente dolomitizados. El Cuaternario igualmente está representado por carbonatos aunque carente de evaporitas.

Las formaciones representativas de las secuencias mencionadas que están expuestas en la superficie (bajo la capa de caliche) son las siguientes: Icaiche (Eoceno medio temprano y Paleoceno), Piste y Chichen Itzá (Eoceno medio y tardío), Bacalar (Mioceno) y Carrillo Puerto (Mioceno-Plioceno). Las formaciones del Oligoceno (calizas, lutitas y margas), así como las del Cuaternario no tienen nombres formales.

Por información de pozos y afloramientos, los espesores medidos para estos grupos de estratos es variable entre 1,000 y 3,000 m.

### **Estructura.**

Por tener un carácter de plataforma, la cobertura de esta provincia no ha sufrido deformación compresiva, como se deduce de la posición horizontal de sus estratos. Tomando en cuenta las edades conocidas de sus rocas, es indudable, sin embargo, que el basamento constituye parte de una o más provincias orogénicas de origen Panafricano y Apalachiano. Los límites estructurales están bien marcados, pues al oriente limita contra el sistema de fallas Bartlet y las Montañas Maya, así como el Canal de Yucatán, mientras al poniente con el escarpe de Campeche, este último producto del rompimiento tensional asociado con la separación de América del Sur de la región jurásica del Golfo de México. Hacia el sur existen grandes estructuras de compresión miocénica como el Arco de la Libertad que forma el límite norte del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas o bien la cuenca deltaica de Tabasco (Ríos Candelaria, Usumacinta y Grijalva).

Por otra parte, la ubicación de esta provincia en la periferia del Golfo de México implica que durante el Jurásico sufrió una intensa deformación tensional con la formación fallas y de grabens en los que se depositaron los lechos rojos de edad equivalente. Las únicas fallas visibles en la superficie de esta provincia son la Falla de Ticul en la región norte-central de la plataforma y dirección WNW (110 km), y el sistema de fallas de Río Hondo-Catoche (140 km) con una orientación ENE y en el sector oriental de la provincia. Las características geológicas en ambos casos se han definido como sistemas de fallamiento normal y edad terciaria, con un salto máximo en el primer caso de unos 200 m (referencia).

### ***Calizas.***

Las calizas son rocas sedimentarias de origen fundamentalmente químico u organógeno, que se forman al menos por un 50% de carbonato de calcio. Las de origen bioquímico se forman por la acción de los seres vivos. Estos fijan el calcio disueltos en el agua y lo utilizan para construir sus esqueletos en forma de calcita o aragonito, cuando estos mueren, sus esqueletos darán unas calizas formadas por calcita, siempre el aragonito es inestable y se transforma en calcita, también se depositan calizas en los fondos marinos como consecuencia indirecta del metabolismo de los seres vivos.

Genéticamente las calizas pueden dividirse en cuatro tipos principales de calizas:

- 1) Calizas Endogénicas: Estas calizas son aquellas que han sido formadas en situ por la acumulación lenta de restos orgánicos, tales como conchas.

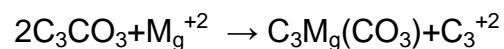
2) Calizas Clásticas: Estas calizas son aquellas en las que su última etapa de formación fue el transporte y depósito de detritos carbonatados en la misma forma que el de los otros clásticos comunes.

3) Calizas químicas o bioquímicas: Estas calizas son las formadas directamente por la precipitación química de carbonato de calcio debido a causas físico-químicas o a la acción bioquímica de bacterias u otros organismos.

4) Calizas epigénicas o metasomáticas: Estas calizas son aquellas que han sido formadas por la alteración de los anteriores procesos tales como dolomitización silicificación y recristalización.

Si el calcio es substituido en buena parte por magnesio la roca recibe el nombre de caliza dolomítica o dolomita.

La dolomitización es un proceso mediante el cual la caliza se transforma en dolomita. La reacción química que permite visualizar el proceso de dolomitización se muestra a continuación:



El proceso de dolomitización ocurre cuando rocas carbonáticas (constituidas por calizas) entran en contacto con agua (con alguna cantidad de magnesio disuelto) que circula a través del medio poroso. Al entrar en contacto el magnesio desplaza al calcio y debido a que el magnesio es considerablemente más pequeño que el calcio, la roca generada luego del desplazamiento puede presentar una porosidad



mucho mayor. Es importante mencionar que la dolomita resultante de un proceso de dolomitización presentará generalmente una porosidad mayor a la caliza de donde se originó, sin embargo, desde el punto de vista teórico, si el proceso de dolomitización fuera total, es decir que el magnesio sustituyera completamente al calcio, la nueva roca podría presentar una porosidad menor a la de la roca original.

### ***Dolomías.***

Las dolomías se originan como consecuencia de procesos post sedimentarios: las calizas, formadas por los procesos antes descritos, pueden ponerse en contacto con aguas enriquecidas en magnesio, lo que da origen al proceso llamado de dolomitización.

Al ser la dolomía más densa y de estructura cristalina más compacta que la calcita, este proceso implica un aumento del volumen de huecos de la roca, es decir, de su porosidad.

Texturalmente las dolomías no presentan variabilidad, al tratarse de rocas recristalizadas. Todo lo más, pueden preservar relictos texturales de la caliza original.

Las dolomías, a diferencia de las calizas, no son solubles en agua, lo que impide el desarrollo de los procesos kársticos sobre ellas. Si tienen una cierta capacidad de almacenamiento de fluidos, relacionada con la porosidad secundaria que desarrollan durante el proceso de dolomitización.

Es también interesante el comportamiento de estas rocas frente a los fluidos: las calizas suelen presentar escasa porosidad primaria, es decir, debido a la disposición original de sus elementos texturales, por lo que las calizas sanas y no fracturadas suelen tener escasa capacidad de almacenamiento de fluidos. Sin embargo, en determinadas condiciones (a bajas presiones y temperaturas) pueden responder a la deformación tectónica fracturándose, lo que les confiere una cierta porosidad secundaria. Además, el carbonato cálcico es soluble en agua, sobre todo en aguas cálidas, en las que existe ácido carbónico disuelto como consecuencia de las reacciones.

### **Otras Rocas Carbonatadas.**

Además de las calizas y dolomías, hay otras rocas formadas mayoritariamente por carbonatos, aunque son mucho menos frecuentes, y a menudo están originadas por otro tipo de procesos, no sedimentarios (reemplazamientos). Entre ellas destacan las rocas de magnesia y de siderita, de interés minero por ser importantes menas de magnesio y hierro, respectivamente.

**Capítulo 2. Perforación y Recuperación de Núcleos.*****El Cráter Chicxulub.***

El cráter Chicxulub es una estructura formada por un impacto hace 65 Ma, el cual se asocia con uno de los eventos geológicos más importantes en el Fanerozoico, que marca la transición del Mesozoico al Cenozoico. El cráter Chicxulub se encuentra enterrado por debajo de sedimentos carbonatados en el norte de la península de Yucatán, al sureste de México y tiene un diámetro de 180 a 200 km.

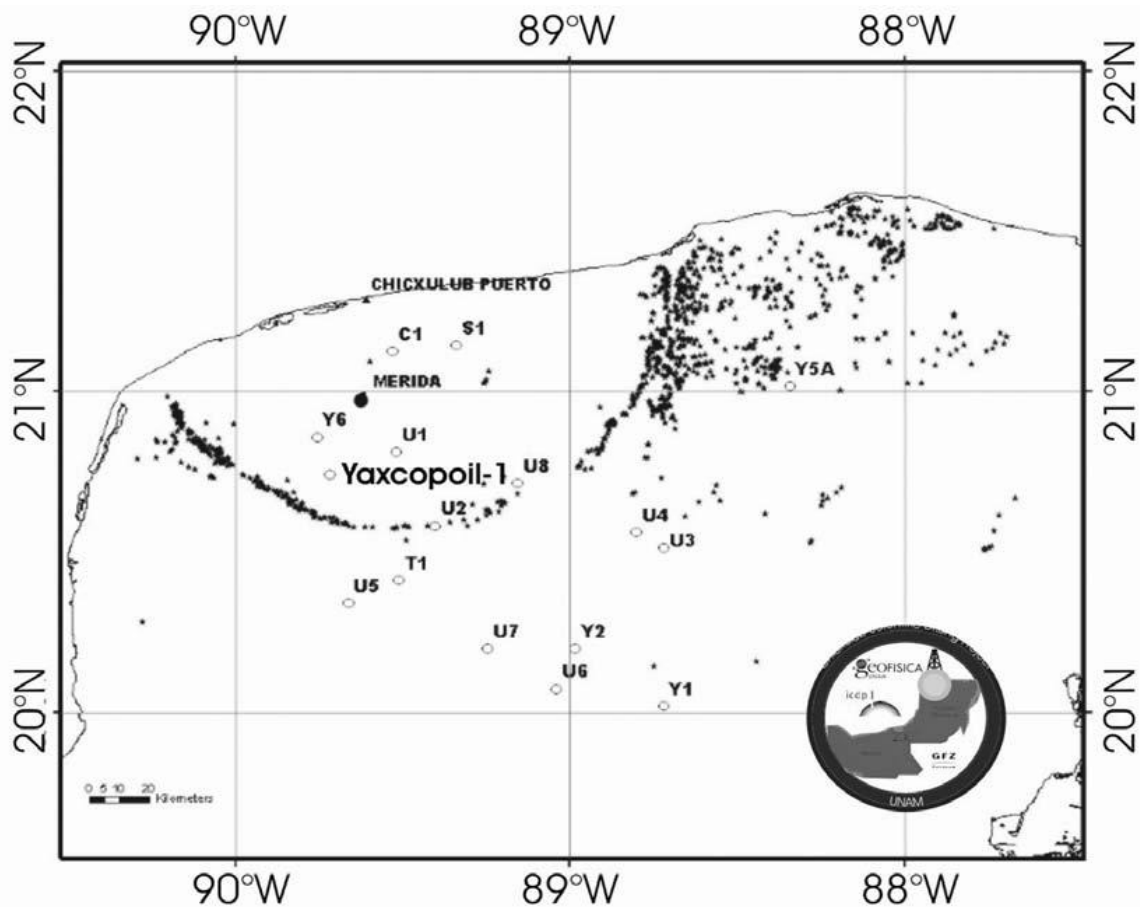


Figura. 2.1. El cráter constituye una estructura con un complejo de anillos Múltiples, (Urrutia et al., 2004).

En la Tierra solo se tienen tres cráteres multi-anillos, que corresponden a los cráteres de Vredefort (África del Sur), Sudbury (Canadá) y Chicxulub (México). El cráter Chicxulub representa el más joven y es el mejor preservado de cráteres terrestres complejos de multi-anillos documentados en el registro geológico. Se vincula con la extinción masiva en el límite Cretácico/Terciario (K/T), (aproximadamente 75% de las especies que habitan en aquel tiempo, incluyendo los dinosaurios, se extinguieron).

Los estudios del cráter Chicxulub presentan una gran oportunidad para descubrir nueva información, como las consecuencias globales en el ambiente, en el clima y su participación en la evolución geológica y biológica.

Los estudios en torno a éste son diversos; incluyen métodos geofísicos terrestres, aéreos y marinos, proyectos de perforación y análisis de laboratorio con las muestras obtenidas y modelados realizados por computadora. Parte de estos estudios los inició Pemex en un programa de exploración petrolera y más recientemente fueron realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) dentro de sus proyectos geofísicos y de perforaciones.

### ***Eyecciones de Impacto y la Secuencia de Carbonatos en el Sector Oriental del Cráter de Chicxulub.***

Este sector del área de estudio se encuentra en la porción de tierra entre Mérida y Valladolid. Se caracteriza por marcar cambios en la distribución de la densidad y en las propiedades del Carst (paisaje propio de terrenos calizos, por el efecto que la disolución del agua tiene sobre ellos), patrones de fractura y en la geografía topográfica.

Estas características tienen relación con el cráter enterrado a través de la compactación diferencial en la secuencia de brechas. El número más alto de cenotes ocurren al este del borde del cráter, aproximadamente entre el anillo del cráter y el área de Valladolid; esta zona se extiende hacia la costa (véase Figura. 2.2).

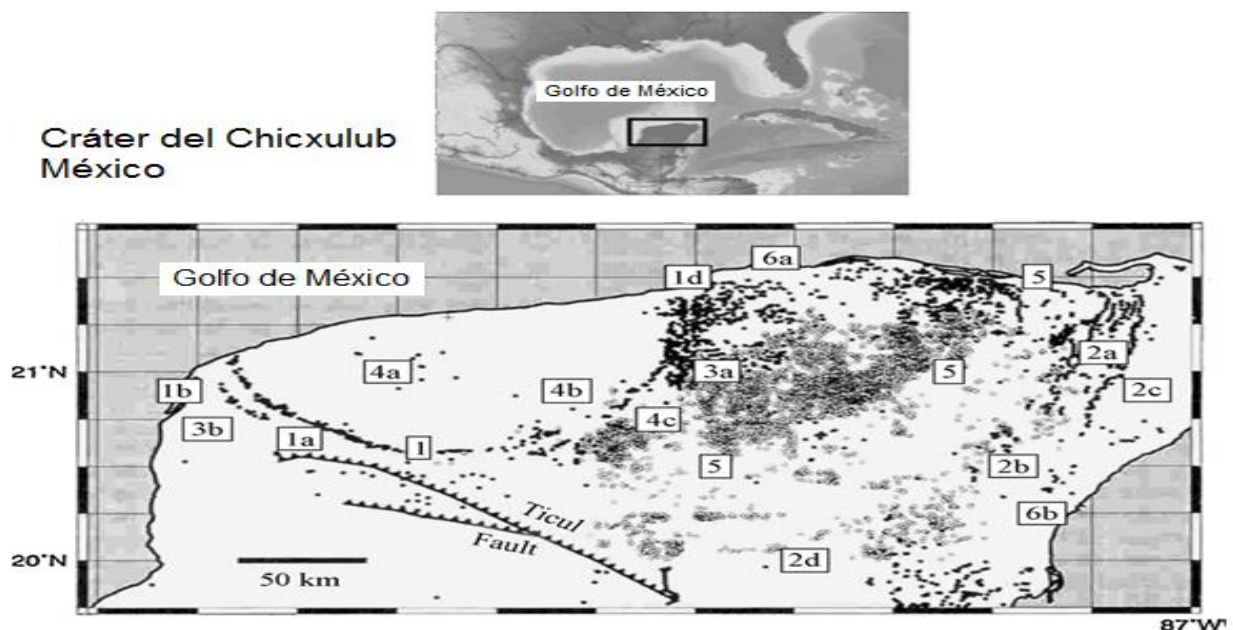


Figura. 2.2. Mapa esquemático de la península de Yucatán que muestra la distribución de los cenotes. Los números muestran las distintas áreas identificadas, (Urrutia et al., 2000).

Las características del carst en gran medida están ausentes en la planicie costera, lo que sugiere un cambio en el flujo de aguas subterráneas y en las características de los acuíferos. El acuífero del noroeste de Yucatán no está confinado y representa la disolución del carbonato, así como las características del carst. Cerca de la costa hay un desarrollo de caliche que a su vez forma una capa impermeable, la cual emigró hacia mar adentro durante el Holoceno.

La alta densidad de cenotes y las características del carst en la zona dan una geomorfología con una superficie distinta, con la que se liga a una posible incidencia de los depósitos de brechas de impacto en la profundidad.

La disolución del yeso y la anhidrita a causa de la intrusión salina en la profundidad de los depósitos de las eyecciones puede explicar las características topográficas del carst. Los cenotes que se encuentran en el grupo del sur son generalmente secos, en contraste con los cenotes llenos de agua en el anillo de cenotes y los grupos cerca de la costa. El cambio en la distribución de la densidad de las características del carst corta a la costa diagonalmente aproximadamente desde 20.58 al norte y 88.68 al oeste paralelo a una anomalía mínima de gravedad y se vincula con un bajo nivel de anomalías magnéticas.

Como parte del programa de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), los pozos exploratorios han sido perforados en el sector este, entre Mérida y Valladolid (véase Figura.2.3).

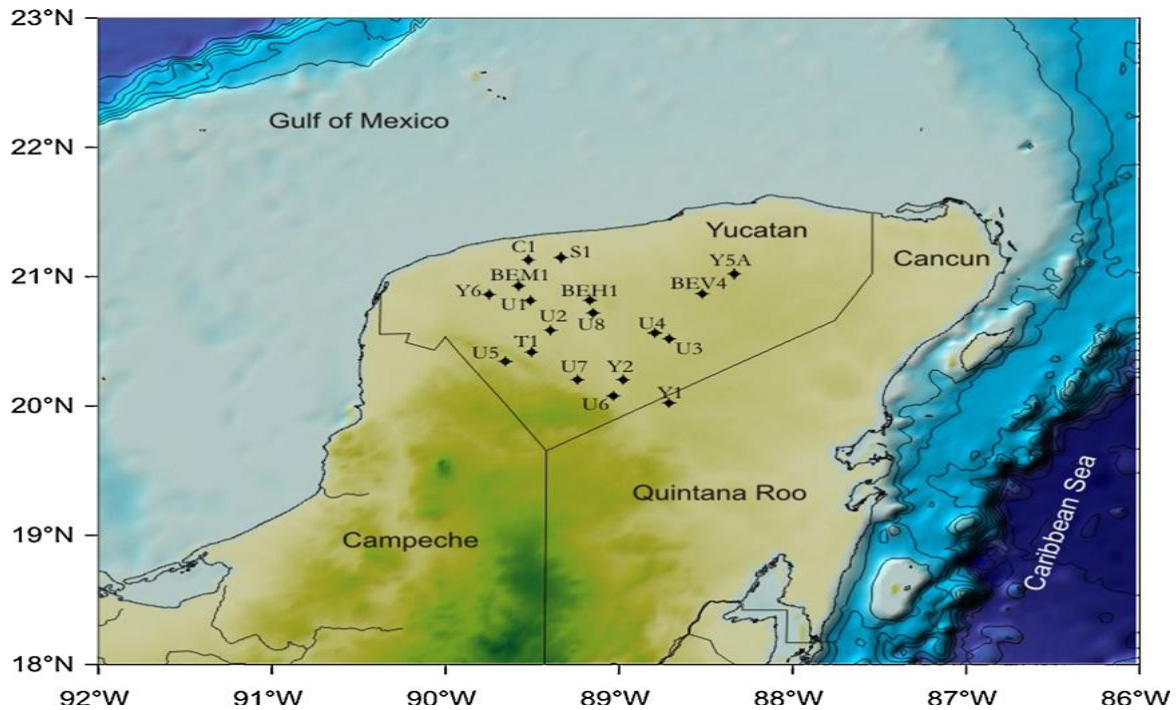


Figura. 2.3. Ubicación de los pozos exploratorios (Área de Mérida, a 50 km del centro del cráter), (Urrutia et al., 2000).

La Descripción macroscópica y estudios petrográficos en muestras para los tres pozos (BEM-1, BEH-1 Y BEV-4) fueron realizadas. Los pozos BEM-1, BEH-1 y BEV-4 se encuentran situados a una distancia radial que se incrementa en el centro del cráter a lo largo del transector este-oeste, cerca de Mérida, Huhí y Valladolid, respectivamente.

Tabla. 2.1. Pozos con continua extracción de núcleos en el cráter del Chicxulub.

Pozo	Localización	Cordenadas del sitio		Profundidad de nucleos(m)	Eyecciones+ (m)
		Longitud	Latitud		
BEM-1	Merida	89.60°W	20.91°N	350	
BEH-1	Huhi	89.20°W	20.82°N	150	
BEV-4	Valladolid	88.50°W	20.86°N	300	250
UNAM-1	Timucuy	89.52°W	20.81°N	155	
UNAM-2	Tecoh	89.40°W	20.58°N	560	
UNAM-3	Kancabdzanal	88.72°W	20.51°N	138	
UNAM-4	Piste	88.80°W	20.56°N	63	
UNAM-5	Santa Elena	89.66°W	20.34°N	503	332
UNAM-6	Peto	89.04°W	20.07°N	702	257
UNAM-7	Tekax	89.25°W	20.20°N	700	222
UNAM-8	Huhi	89.16°W	20.71°N	101	
YAX-1	Yaxcopoil	89.72°W	20.74°N	1511	795

Las perforaciones llegan a profundidades de hasta más de 350 [m], y cortan la secuencia terciaria del carbonato. Los estratos de piedra caliza del terciario contenidas en la zona comprendida entre Mérida y Valladolid fueron formadas por calizas cristalinas, dolomias, calizas arcillosas y margas.

Las subunidades se pueden distinguir por las intercalaciones de micritas, biomicritas, calcirudita, calcilutitas con distinto contenido de arcilla, la disolución y las características de las fracturas, los restos fósiles y texturas. Los colores y texturas de los estratos de carbonato varían desde el blanco, crema, rojizo hasta el gris (en el pozo BEV-4, algunos horizontes de dolomita son azulados y lutitas por debajo de la secuencia de brechas muestran luces de color verde).

Los estratos de carbonato son parte de las formaciones Icaiché, Chichen Itza y Carrillo Puerto. En profundidades por debajo de 200-250 [m], las rocas del carbonato muestran los efectos de la deformación y la fractura.



En Mérida, la secuencia de carbonatos en el pozo BEM-1 esta formada por intercalaciones de calizas micríticas, calcirudita, calciruditas, rico en arcilla gris y calizas entre 200 y 300 [m] (véase Fig. 2.5).

En el área entre Mérida y Huhí, la secuencia es más abundante en blanco que los depositos de coquina crema, con fragmentos de bivalvos, gasteropodos y corales. En algunas partes, está menos fusionada con horizontes de calcarenitas crema en el fondo. La secuencia de perforacion del pozo BEH-1 de Huhí se compone por micríticas cremas, calizas blancas, dolomitizacion gris o roja, calizas grises , que muestran fragmentos de microfósiles y en algunas partes, características de disolución. En el área ubicada entre Huhí y el borde del cráter, la secuencia muestra una mayor proporción de calcarenitas con calizas, calizas dolomitizadas, coquina y algunas estructuras de coralinas recristalizadas.

La secuencia de perforación de BEV-4 en Valladolid está compuesto por 250 [m] de calizas micríticas con algunos horizontes de arcilla, en parte alterado con características de disolución de calcirudistas fosilíferos y horizontes ricos en arcilla. Las brechas carbonatadas se presentan entre 250 m y 284[m].

Por debajo de 284 m, e inclusive, de 300 [m], la secuencia se integra de calizas, calizas dolomitizadas con luz rojiza con luz verde y horizontes de lutita .

Un intervalo de unos 34 m de brechas de carbonato se encuentra en el pozo BEV-4 en la zona de Valladolid (Vease Fig. 2.5). El intervalo de las brechas carbonatadas se producen aproximadamente entre los 250 y 284 [m].

Las brechas se caracterizan por abundantes clastos de piedra caliza, yeso y anhidrita; la sección de brecha se correlaciona con las brechas carbonatadas observadas al sur en los pozos Peto y Tekax. Basándose en los resultados de análisis químicos de muestras de aguas profundas en el cenote Ucil ( Ubicados a unos 20.99° N, 88.6°W), algunos científicos propusieron la incidencia de una capa perteneciente a una brecha de impacto a profundidad de 200 [m] por debajo de la zona de cenotes para tener en cuenta el contenido de estroncio en la solución del agua salina del cenote. La extracción de núcleos en el pozo BEV-4 confirma la presencia de capa de brechas en el impacto, que se encuentra debajo de la zona de Valladolid y en el cenote Ucil. El pozo BEV-4 se encuentra localizado en las distancias radiales aproximadamente similares al pozo Tekax en el sector sur. Las brechas de impacto en el pozo de Tekax se forman por dos unidades distintas: una unidad superior rica en basamento y en roca fundida localizados aproximadamente entre 222.2 y 384 [m], y una secuencia de roca carbonatada y terrigenos por debajo de 384 [m] y que los grados hacia abajo forman una secuencia de carbonatos con terrigenos. En el pozo Peto, las brechas superiores están entre 257 y 283 [m], y las brechas de carbonato se encuentran aproximadamente entre 283 y 540 [m]. Estos pozos se encuentran fuera del borde del cráter, y fuera de la anomalía de gravedad en el anillo exterior. Las brechas de carbonato permanecen en los estratos de carbonato, las cuales pueden corresponder a grandes bloques desplazados del Cretácico o para el pre-impacto de la secuencia-objetivo del Cretácico.

La secuencia de carbonato es similar a la observada en el pozo de Peto , la cual muestra mayor abundancia de anhidritas y yeso. Los datos sísmicos de reflexión a lo largo del perfil paralelo a la costa este-oeste exponen los carbonatos del Terciario que se caracterizan por la alta frecuencia de reflexión que pueden ser seguidos a través de la cuenca. El sector oriental presenta características diferentes comparado con el sector occidental, con un historial de depósitos que contenía una geometría más compleja y un paquete de clinoformas distintos.

La profundidad se hace mayor hacia el oeste de las clinoformas junto al mismo tiempo con las relaciones de una línea costa de regresión. El paquete de clinoformas muestra depresiones menos profundas y en su parte inferior contiene discontinuos reflectores de baja amplitud con geometrías complejas. Algunos especialistas indican que su parte inferior es un depósito de flujo de masa y que la disminución de inmersión entre los paquetes de clinoformas es el resultado de una reorientación de clinoformas de un sistema pendiente o de un desarrollo de una suave pendiente después de la remoción en masa. Los reflectores por encima de los paquetes de clinoformas muestran superficies por cubrir y el proceso "onlap", indicando una etapa de sedimentación pasiva.

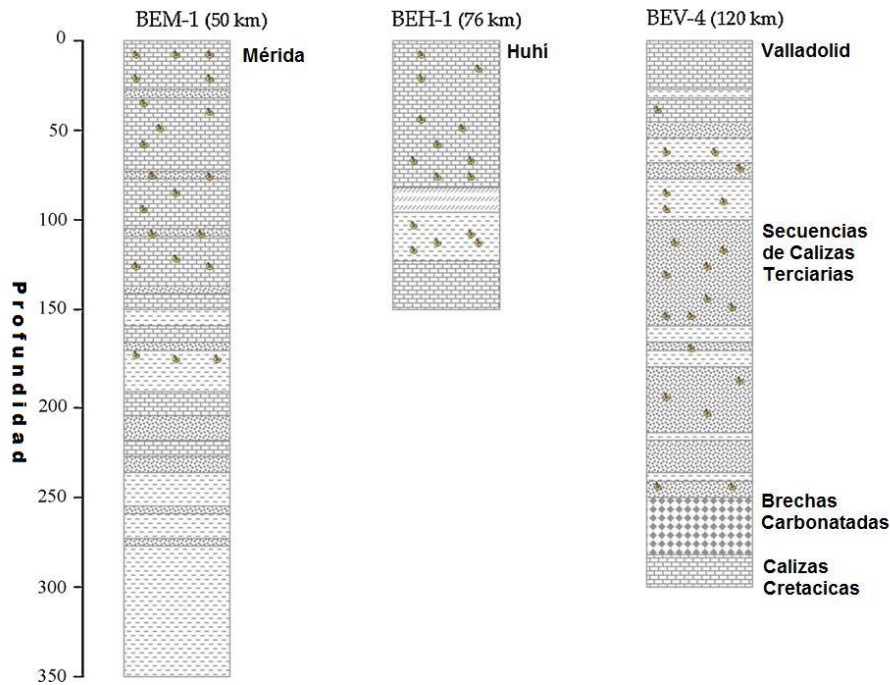


Figura. 2.4. Columnas litológicas simplificadas de los pozos exploratorios BEM-1(Área de Mérida), HEB-1(Área de Huhi) y BEV-4(Área de Valladolid), (Urrutia et al., 2000).

### ***Aspectos de la Perforación del Pozo Yaxcopoil-1.***

Uno de los pozos en el Programa de Perforaciones es el Yaxcopoil-1. Dicho pozo fue perforado de diciembre del 2001 a marzo del 2002 en el sector sur del cráter y financiado por el Programa Internacional de Perforación Científica Continental (ICDP por sus siglas en inglés) en coordinación con la UNAM. El estudio fue realizado con base en la integración de datos gravimétricos, magnéticos, magnetotéluricos y sísmicos.



Figura. 2.5. Operaciones de Perforación y núcleo para el Pozo, (Urrutia et al., 2004).

Varios grupos de investigación y empresas de perforación como GFZ-Potsdam y DOSECC auxiliaron con la recolección de muestras (núcleos) en el interior del cráter. Estas fueron obtenidas hasta una profundidad de 1511 metros.

Los núcleos recuperados han sido estudiados por diferentes métodos. Sus mediciones incluyen: porosidad, permeabilidad, velocidades sísmicas, susceptibilidad magnética, contenido de elementos radioactivos, potencial natural y resistividad eléctrica.

Un equipo científico especializado examinó las muestras obtenidas de diferentes maneras. Dividió los resultados según la naturaleza de la clase de rocas obtenidas en los análisis. Los estudios realizados en el pozo Yaxcopoil-1 permitieron a los investigadores desarrollar diferentes proyectos como:

- 1) Determinar las relaciones entre esta estructura y las extinciones masivas del final del periodo Cretácico.

- 2) Estudiar en gran escala los procesos de formación de cráteres multi-anillos.
- 3) Investigar los efectos en la evolución y ambiente antes, durante y después del impacto.
- 4) Proporcionar datos, observaciones y modelos sobre deformación y fractura de la corteza debida a impactos de meteoritos.
- 5) Los bloques recuperados del Impacto en el Cretácico proporcionan material valioso para ser analizado en el laboratorio, pese a los efectos subsecuentes a la alteración.
- 6) El origen de la secuencia del espesor de carbonato debajo de las brechas (>600 m) ha provocado un interesante debate que requiere un estudio futuro.

Los estudios iniciales en esta estructura ya han proporcionado resultados preliminares que nos ayudan a entender mejor este tipo de procesos y sus efectos en el momento del impacto.

***Operaciones de Perforación y Extracción de Muestras del Pozo Yaxcopoil-1.***

Se desarrolló un concepto de perforación para el pozo Yaxcopoil-1, bajo contratiempos y un plan con un presupuesto estricto y limitado, con una proyección de perforación de más de 2000 [m]. Fue proyectado con un requerimiento científico de la continua extracción de muestras de alta calidad desde los 400 [m] (superior Terciario) hasta la profundidad final.

Se contrató una empresa nacional para las operaciones de perforación rotaria sin recuperación de muestras durante el trabajo de la sección superior a 400 [m]. (Véase Figura. 2.6).

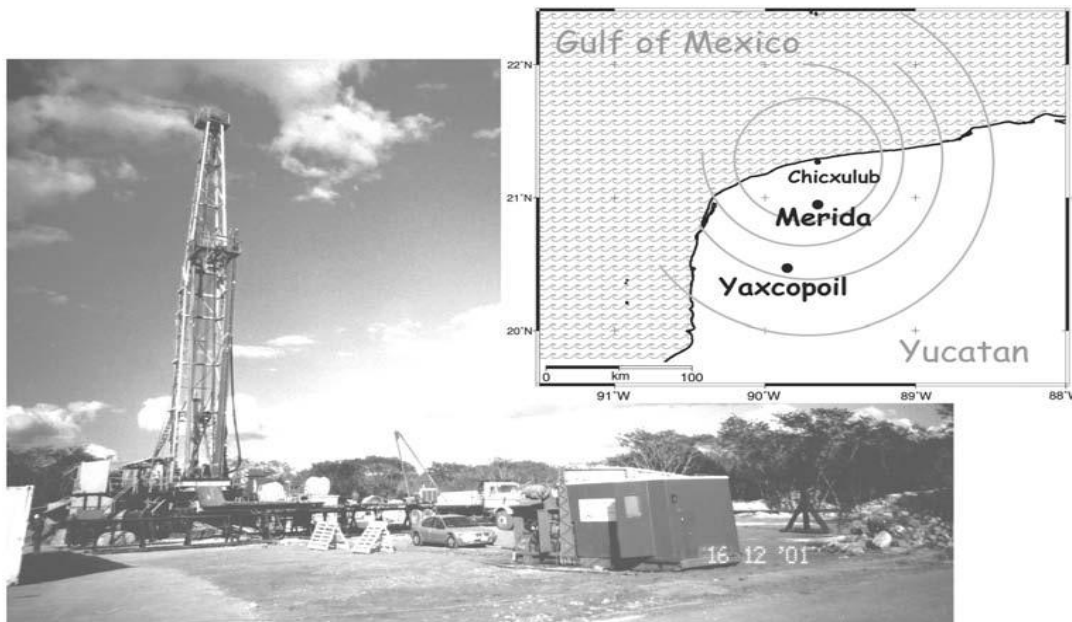


Figura. 2.6. Sitio de la perforación en Yucatán pozo Yax-1, (Urrutia et al., 2004).

Este sistema de perforación también fue utilizado para desplegar una fuerza e impulsar una barrena de punta de diamante en un sistema de recuperación continuo de núcleos. (DOSECC Sistema híbrido de extracción de muestras o sistema HC por sus siglas en inglés), esto proporciona una continua extracción de muestras de alta calidad. Estos sistemas permiten la recuperación rápida de núcleos a través de la tubería, mientras que la sarta de perforación permanece en el agujero para evitar que se consuma el tiempo en los viajes de salida de la tubería.

La combinación de tecnología minera en la extracción de muestras con la técnica *wireline*, (Procedimiento mecánico con un sistema continuo de extracción de muestras), Permite en los campos petroleros estándar con equipo de perforación rotaria la perforación y el muestreo a profundidades de 1510 [m] (Véase en la Tabla 2.2 para detalles técnicos):

Tabla.2.2. Características técnicas sobre la perforación del Pozo Yaxcoboil-1.

Fase de la barrena rotaria	Fase de extracción de muestras
Profundidad 0-392 m. Diámetro de perforación: 311mm(12 ¼") 5-1-5 IADC- Inserte barrena. Radio de penetración (ROP)2.0-4.5 m/h. 20-60 kN peso sobre la barrena (WOB). 60-90 Revoluciones por minuto (RPM).	Profundidad 404-1510.6 m. 404-993m: 96mm (63.5 mm núcleo). 993-1510.6 m:76mm (47.6 mm núcleo). 96mm Barrena saca núcleos con corona de diamante. 2 m/h ROP 5-25 kN WOB/350-450 RPM/ 70-80 1/min 76 mm Barrena saca núcleos con corona de diamantes. 2.0-3.0 m/h ROP. 5-10 kN WOB/280-320 RPM/40-501/min.
Características del equipo de perforación: 110 ton de capacidad de carga del gancho, 450 HP malacate, 350 RPM mesa rotaria, 1 x 350 HP unidad de la bomba. Sistema de circulación (no centrífugo), 3000 psi preventor.	
Características del sistema rotario: 450 HP motor diesel, 113 t de capacidad estática,4875 m utilizando la capacidad de cadena HQ, 0-900 RPM torque variable y velocidad, malacate impulsado hidráulicamente, 6000 m de capacidad, Sincronización de operaciones de perforación: 9 de diciembre del 2001-26 de febrero del 2002 (77 Días).	
Profundidad final: 1510.6 m. 372 núcleos recuperados de 3m de longitud nominal. Recuperación de núcleos 98.5 % Promedio de vida de la barrena saca núcleos impregnada de diamantes: 152 m. Máxima vida de la barrena saca núcleos punta de diamante:280 m.	

ROP = Radio de penetración.  
 WOB= Peso sobre la barrena.  
 RPM = Revoluciones por minuto.

En primer lugar, se perforó a 392 [m] de profundidad (con un diámetro de tubería de perforación de 312 [mm]), revestido con tubos de acero de 245 [mm] de diámetro, y cementado para fijar el tubo a las paredes del pozo. (Véase Figura.2.7). En el segundo plano, los núcleos del pozo fueron obtenidos a 980 m



con el sistema HQ (con tubería de 96 [mm] de diámetro) la sarta de perforación sirvió como tubería de revestimiento durante las operación siguientes. La tercera sección los núcleos del pozo fueron obtenidos, con un sistema más pequeño (76 [mm] de diámetro) a la profundidad final de 1510 [m]. Este procedimiento permitió continuar con la extracción de muestras de un 98.5% de núcleos recuperados en regiones con situaciones de inestabilidad de pared de pozo.

La mayoría de las operaciones, incluida la perforación, extracción de núcleos, colocación de la tubería de revestimiento y cementación, fueron realizadas de acuerdo con el plan. Sin embargo, en la parte más alta, donde existen rocas carbonatadas y muy duras, éstas provocaron un incremento en el tiempo de perforación y pérdida de lodo de perforación en estratos de carbón. A una profundidad de 993 [m], se atascó el sistema de extracción de núcleos (HQ-sistema).

Esto fue causado por desenroscar la tubería de perforación en la parte superior de los estratos, esto fue indicado por mediciones obtenidas de una sonda que se usó a través de la tubería.

El sistema de extracción de núcleos (HQ) debió permanecer en el pozo como tubería de revestimiento sin cementar, mientras la extracción de muestras fue buscada usando un principio de plegamiento con un mismo sistema saca núcleos solo que para un diámetro más pequeño (llamado NQ por sus siglas en inglés) el cual fue desplegada a través de la tubería de revestimiento (HQ) y fue usado para alcanzar la profundidad final. (Véase Fig.2.7).

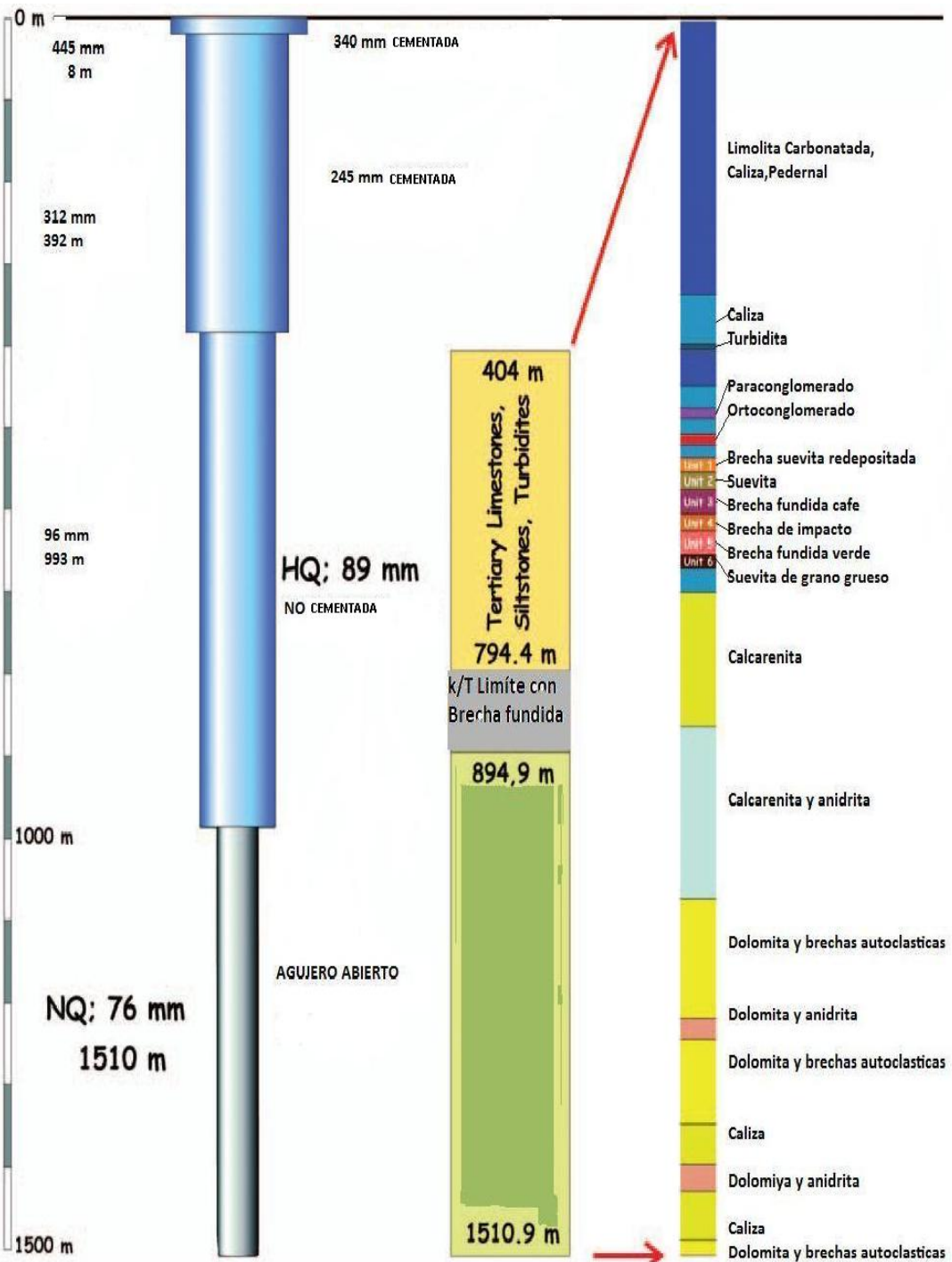


Figura. 2.7. Perforación y sistema de tuberías del pozo Yax-1 esquema geológico de los estratos truncados. La columna de la derecha muestra la sucesión litológica de la descripción del núcleo inicial en el sistema de información de perforación, (Urrutia et al., 2004).

Entre el 9 de diciembre del 2001 al 26 de febrero del 2002 (6 días de perforación rotaria, 21 días de extracción de núcleos con el sistema (HQ) y 18 días de perforación y obtención de núcleos (NQ).

Los costos totales de perforación, registros, sitio de la perforación, movilización, desmovilización de los equipos y el funcionamiento de los equipos ascendieron a unos \$ 1.6 millones de dólares.

La distribución de los costos se muestra en la Figura 2.8 las operaciones de perforación y extracción de núcleos contribuyen alrededor del 55% de los costos totales mientras que de la movilización y desmovilización fluctuó en un 27%.



Figura. 2.8. Distribución de costos (%) para todas las operaciones de perforación en el Pozo Yax-1, (Urrutia et al., 2004).

**Registros en el Pozo Yaxcopoil-1.**

Las continuas mediciones en el fondo del pozo con instrumentos como son el *wireline* sirven para algunos propósitos técnicos como la calibración, la orientación vertical, la desviación, la profundidad vertical verdadera de la perforación del pozo y para mediciones científicas de las propiedades petrofísicas de la pared del pozo por último complementa la investigación de núcleos y permite la calibración de los datos geofísicos en superficie.

Se realizaron mediciones geofísicas en el fondo del pozo con un equipo de sondas para diámetros reducidos proporcionado por el programa internacional de perforaciones científicas en continentes (ICDP por sus siglas en inglés). Dichas lecturas fueron tomadas en dos campañas una a profundidad de perforación de 400 [m] antes de ajustar la tubería de revestimiento y la otra a una profundidad total de 1510 [m] después de la terminación de la perforación (Véase en las Tablas 2 y 3).

Tabla. 2.2. Mediciones geofísicas.

<b>Sonda</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Alcance</b>
<b>DIP,TS.</b>	Desviación de pozo, Campo magnético GR.	0-85m
<b>SGR, MSdH, TS.</b>	K,U, Th Susceptibilidad magnética, GR.	0-85m
<b>DLL,TS</b>	Resistividad eléctrica profunda y superficial, GR.	0-85m
<b>BCS</b>	Velocidad acústica VP/Formas de onda sónica completa.	0-85m
<b>DIP, TS</b>	Desviación de pozo, Campo magnético, GR.	58-401m
<b>SGR,DLL</b>	K,U,Th, Resistividad eléctrica profunda y superficial GR.	89-399m
<b>MSdH,TS</b>	Susceptibilidad magnética.	87-398m

Tabla. 2.3. Mediciones geofísicas.

Sonda	Parámetros	Alcance
<b>DIP,TS</b>	Pozo desviado+Orientación en plano horizontal, calibración,campo,magnetico	960-1511m
<b>FAC 40</b>	Sondeo con imágenes de pared.	960-1505m
<b>DLL,SGR,TS</b>	Resistividad eléctrica profunda y superficial K,U, Th total GR.	390-1505m
<b>MSdH, TS</b>	Susceptibilidad magnética, GR.	976-1507m
<b>BSC</b>	Velocidad ácustica VP, forma de ondas sínicas completas.	400-1505m

Las sondas de registros para diámetros reducidos (ICDP) pueden ser operadas en condiciones superiores a 150 C° y 80 MPa de presión y aumenta los índices de señal de ruido en los agujeros de diámetros pequeños (75-120 mm). Por lo tanto, son ideales para los sistemas de recuperación de núcleos HQ y NQ ya que produce datos fiables en diámetros de agujero de alrededor de 311-[mm] de ancho y para secciones superiores a los 400 [m] de largo.

La sonda se aplica emitiendo quince parámetros, que incluyen el total de la actividad de rayos gamma, los contenidos en el potasio, uranio y torio; los tres componentes del campo magnético, la susceptibilidad magnética, la resistividad eléctrica para una penetración profunda y de superficie, la velocidad de compresión sónica, las formas completas de las ondas sónicas; calibradores de pozo, desviación y orientación; datos estratigráficos e imágenes acústicas en la pared del pozo. (Véase la Figura 2.9).

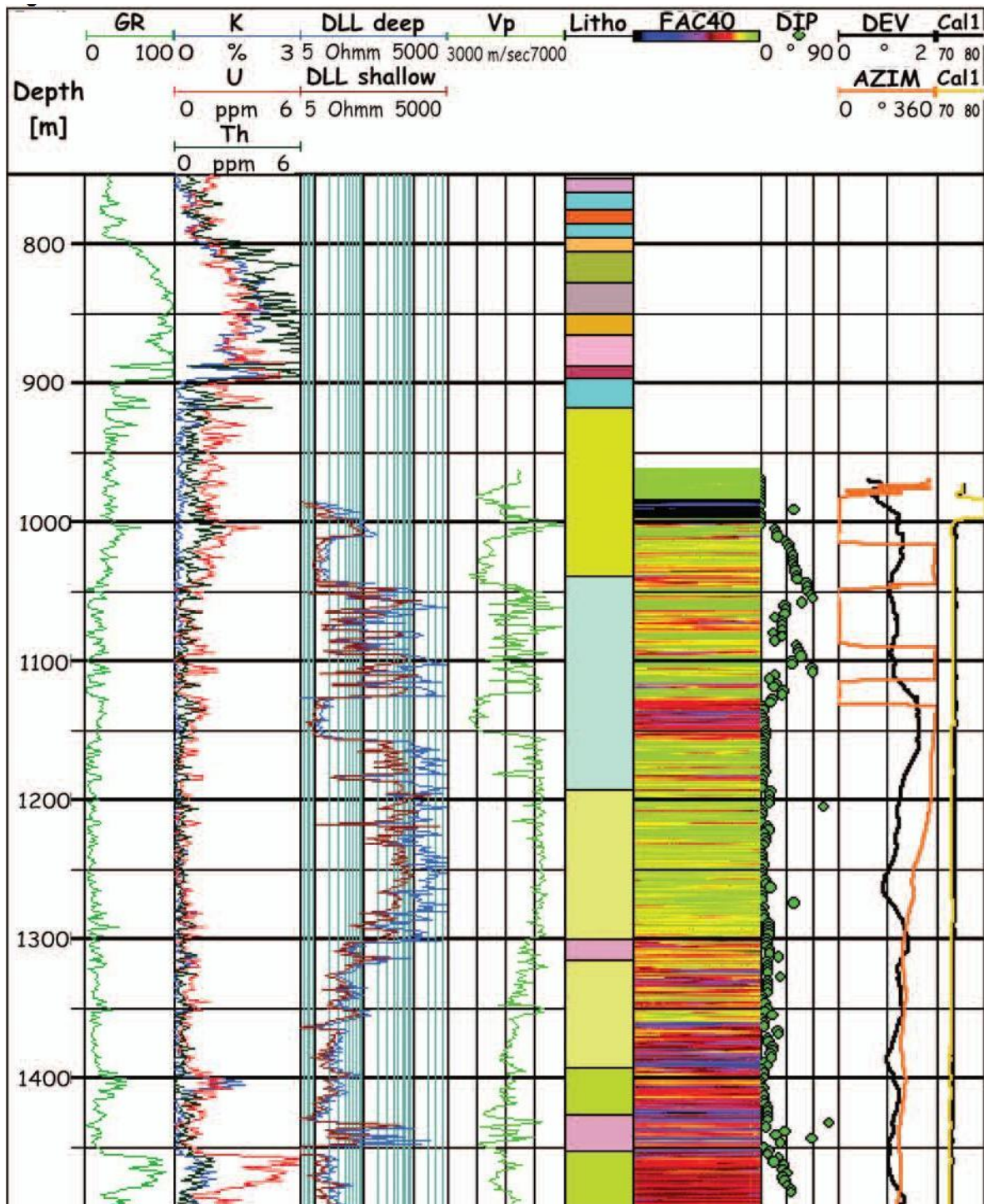


Figura. 2.9. Registro compuesto de la segunda sección a fondo de pozo en el Yax.1, el rango de profundidad es entre 981-1511[m]. De izquierda a derecha: GR= Actividad total de rayos gama; DL: Mediciones de resistividad eléctrica (ohmm); VP= Compresión acústica velocidad de la onda sísmica (registro sónico); Litología de la descripción del núcleo inicial; FAC40: Pared del Pozo acústica; DIP: Inclinación de las estructuras en la pared del Pozo, (Urrutia et al., 2004).



Pese a una pared inestable del pozo a 85 [m], la sección podría ser accesible mediante la ejecución de sondas en un diámetro reducido a través de la sarta de perforación más allá de la zona del bloqueo. En la sección de 400 y 993 [m], sólo se llevaron a cabo los registros de rayos gama y los registros sínicos, debido a que fueron embalados con la sarta de perforación, lo cual impidió que las medidas no se puedan hacer a través de tubos de acero.

El conjunto de parámetros de los registros revela información detallada en el sitio sobre las variaciones relacionadas de las propiedades físicas con las diferencias litológicas, orientación de las estructuras geológicas, propiedades elásticas y geometría del pozo. La Figura 2.9 muestra los datos del registro en los estratos del Cretácico dentro de la sección del pozo abierto; cuenta la actividad total de los rayos gamma en el impacto de la secuencia entre los 800 y 900 [m] (inclusive, midiendo a través de la tubería de revestimiento), mientras que el uranio es la principal fuente de actividad de rayos gamma naturales (GR) en rocas carbonatadas.

La resistividad eléctrica y velocidad de onda sonora muestran perfiles concordantes con una alta variabilidad junto con GR y los datos del registro de echado permiten una diferenciación mucho más fina del perfil litológico que es la descripción inicial. Los datos registrados de la profundidad corregida están compilados y disponibles en los datos del (ICDP) y en la información del sistema.

### **Sistemas de Información y Bases de Datos del Cráter Chicxulub.**

El pozo Yax-1, fue digitalmente documentado y distribuido a través de un nuevo sistema de distribución de datos del Chicxulub (Conze et al. 2001) que comprende tres principales componentes:

1) El sistema de información de la perforación del Chicxulub (Chicxulub-DIS) creado específicamente para los datos adquiridos en el sitio.

2) Los datos almacenados, la base de datos y archivos proporcionan a todos los miembros de equipos científicos de todo el mundo el acceso por vía internet sobre todos los datos conjuntos del proyecto.

3) Un portal en internet de información permite la recuperación y visualización de los procesos realizados. El Chicxulub-Dis muestra la adquisición, integración y la difusión de todos los datos, lo cual asegura una alta sostenibilidad y control de calidad de los resultados científicos de las diferentes etapas del proyecto.

Durante las operaciones de perforación y extracción de muestras, el Chicxulub-DIS fue alimentado desde dos lugares diferentes en Mérida:

1) La Oficina de Supervisión de Perforación proporcionaba informes diarios,

2) Los núcleos explorados en laboratorio fueron utilizados en el inventario de los núcleos recuperados y de la descripción litológica inicial. Este laboratorio fue equipado con una pequeña red local y con conexión a internet que se obtuvo gracias a la red del campus.



El servidor de Chicxulub-DIS, el sistema de exploración de núcleos y alguno de los otros equipos fueron instalados para mantener la adquisición de datos y análisis básicos.

El archivo de núcleos se completó con imágenes de alta resolución desarrolladas en 360 grados en las superficies exteriores, así como también con la extracción de muestras de cada uno de los 372 núcleos recuperados o por cada 1103 [m] de núcleos producidos a través de un análisis óptico de núcleos. El archivo de núcleos y la descripción inicial de la litología de los núcleos proporcionan un funcionamiento de la columna estratigráfica como una referencia en el sistema para todas las medidas posteriores adoptadas por los núcleos o por la perforación, lo cual permite directamente la detección temprana de errores en la determinación de la profundidad en enumerada toma de núcleos.

Cada día, la web, informa y pone al tanto sobre todos los datos relacionados con los reportes de perforación e imágenes que fueron generadas en las últimas 24 horas y se envían al sitio web de Chicxulub vía internet. Esto permitió a todo el mundo un acceso inmediato para que los científicos involucrados en el proyecto (Acceso restringido) pudieran analizar la información sobre el progreso de actividades durante la fase de la perforación.

Durante una semana de muestreo de abril a mayo del 2002 en el Instituto de Geofísica de la UNAM (Ciudad de México) se realizó la coordinación y la documentación de la toma de muestras de los núcleos realizados. Los científicos

utilizaron el DIS para seleccionar las muestras que deseaban rápidamente (Véase Figura. 2.10).

Después del muestreo, la información de todas las tomas del Chicxulub-DIS quedó difundida a través del sitio Web de Chicxulub (<http://www.icdp-online.org>). Ninguna de las muestras se distribuyó durante la fase de perforación.

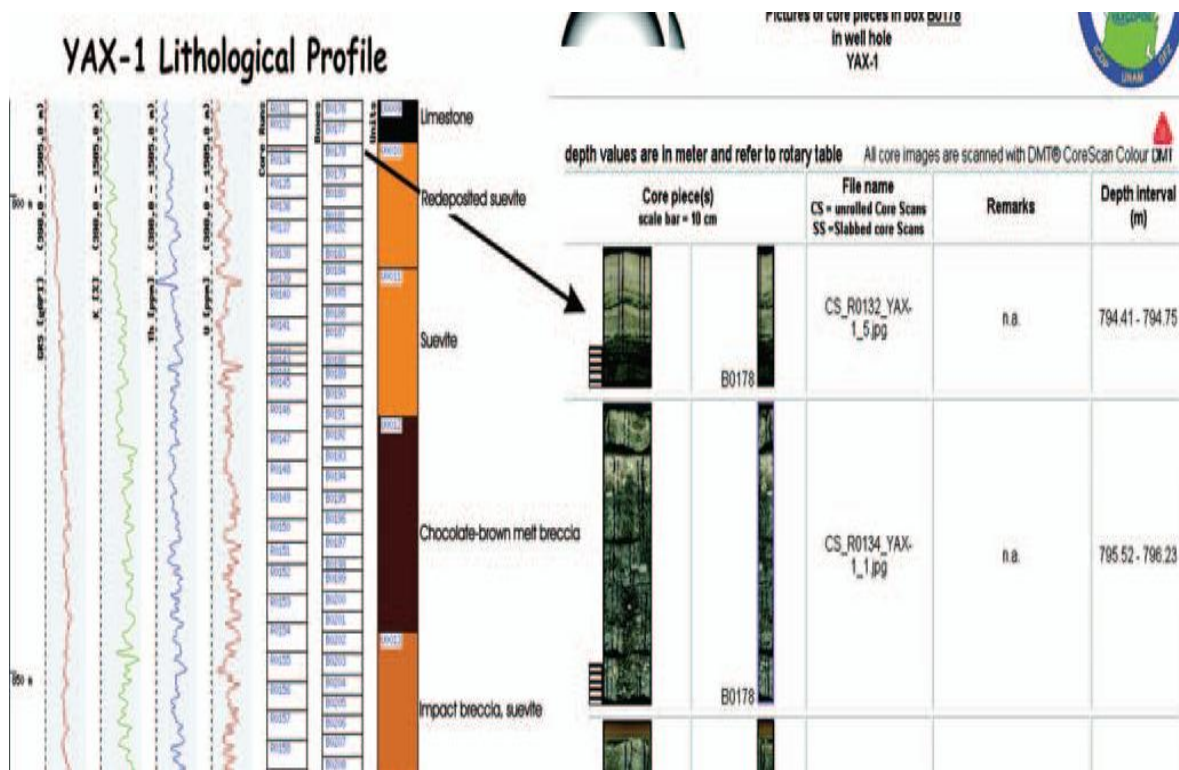


Figura. 2.10. Registró compuesto en la zona de brechas profundidad de 780 a 920 [m] de profundidad, (Urrutia et al., 2004).

### **Programa de Perforación UNAM.**

La estratigrafía del subsuelo de la Península de Yucatán inicialmente fue investigada para la exploración del petróleo, perforaciones y por registros geofísicos gracias al reconocimiento de la estructura de impacto del Chicxulub, se realizaron estudios en la interpretación de brechas, así como las anomalías en las características gravimétricas y magnetométricas y la edad de las unidades requeridas para modificaciones importantes. Un inconveniente en estos estudios procedía en la cantidad limitada de material sobre las perforaciones de pozos exploratorios de aceite. En consecuencia, algunas interpretaciones contrastantes fueron presentadas para la estratigrafía del subsuelo de Yucatán.

Como parte del programa de perforación científico UNAM, la continua extracción de muestras fue usada en ocho pozos de perforación dentro del sector sur del cráter, con una alta tasa de recuperación de núcleos se permitió una detallada investigación estratigráfica. En tres pozos se han tomado muestras de la litología en la zona de impacto: Santa Elena, Peto y Tekax (UNAM-5, UNAM-6 y UNAM-7). En estos pozos, dos están documentados como litologías de impacto: Una brecha superior rica en material fundido y con fragmentos de basamento y una menor brecha con carbonatos en la matriz y con fragmentos ricos en carbonato. Estos dos tipos de brechas son similares a la brecha *Suevitic* y *Bunte* en el cráter Ries. En el pozo Santa Elena UNAM-5 (Véase Fig. 2.11A) el contacto con las brechas de impacto y con los carbonatos del terciario permanecen a una profundidad de 332.0 m; Las brechas *Suevitic* tienen un grosor mínimo de 146 m.

En el pozo Tekax (UNAM-7) el grosor es de 126.1 m (Véase. Fig. 2.11B) y el contacto con los carbonatos del terciario se encuentra a 222.2 [m] de profundidad. La brecha más baja en el pozo Tekax UNAM-7 se sitúa en 348.4 [m], con un grosor de 180 m (Véase. Fig.2.11B). En el pozo Peto UNAM-6, la brecha superior no está presente; el contacto con la brecha Bunte y con los carbonatos de Terciario se encuentran en una profundidad de 282.8 [m], el espesor es de 153.7 [m] (Véase. Figura. 2.11C).

La presencia de clastos angulares a sub-redondeados perteneciente al basamento cristalino (gneiss, diorita), fragmentos de melt (roca fundida por el impacto) y vidrio de impacto (negro y verde oscuro) y granos de cuarzo de choque permiten la correlación con la brecha Santa Elena en el pozo UNAM-5 (Véase. Figura.2.11A) y en el pozo Tekax UNAM-7 (Véase. Figura.2.11B). La unidad de carbonatos por debajo del terciario del pozo Santa Elena UNAM- 5 es de color gris, de grano fino y bien ordenado, y muestran planos de estratificación cruzada-acostada. La estratificación cruzada-acostada apoya la conclusión de que está unidad fue re-depositada. La unidad menor del pozo Santa Elena es una matriz apoyada en brecha. La distribución de los clastos es muy heterogénea, y va desde rango de grava hasta medidas de bloque (hasta 25 cm); la composición de carbonato es principalmente de color café claro a gris, calizas cristalinas y anhidrita. Algunos clastos están fuertemente alterados y la litología original es difícil de identificar.

La siguiente unidad se compone de calizas cristalinas y dolomitizadas, que constituye la mayor parte de la secuencia de carbonatos; se caracteriza por colores crema clara y café oscuro, apariencia compacta y un alto grado de fractura y de fragmentación.

La dolomitización aparece en las bandas, en sustitución de los bivalvos y corales por el carbonato de magnesio. La secuencia de carbonatos del terciario del pozo Santa Elena fue seleccionado por el estudio del isotopo estable debido a la alta tasa de recuperación de muestras, extracción de núcleos de la secuencia terciaria, por el contacto de brechas (superior) rico en rocas, por la profundidad y los resultados de la polaridad magnética de estratigrafía. Estos resultados nos permiten establecer una correlación lateral, con la perforación de otros pozos (Véase .g., Figura. 2.11) de UNAM, PEMEX, y programa de perforación ICDP.

La secuencia de carbonato basal está en los primeros 20 m sobre el contacto con las brechas de impacto incluye varias capas de arcilla fina e intervalos de dolomitización. Las calizas muestran un alto contenido de sílice que parece no disminuir en la brechas de impacto, lo cual sugiere una derivación del sílice en la reestructuración de las brechas *Suevitic*.

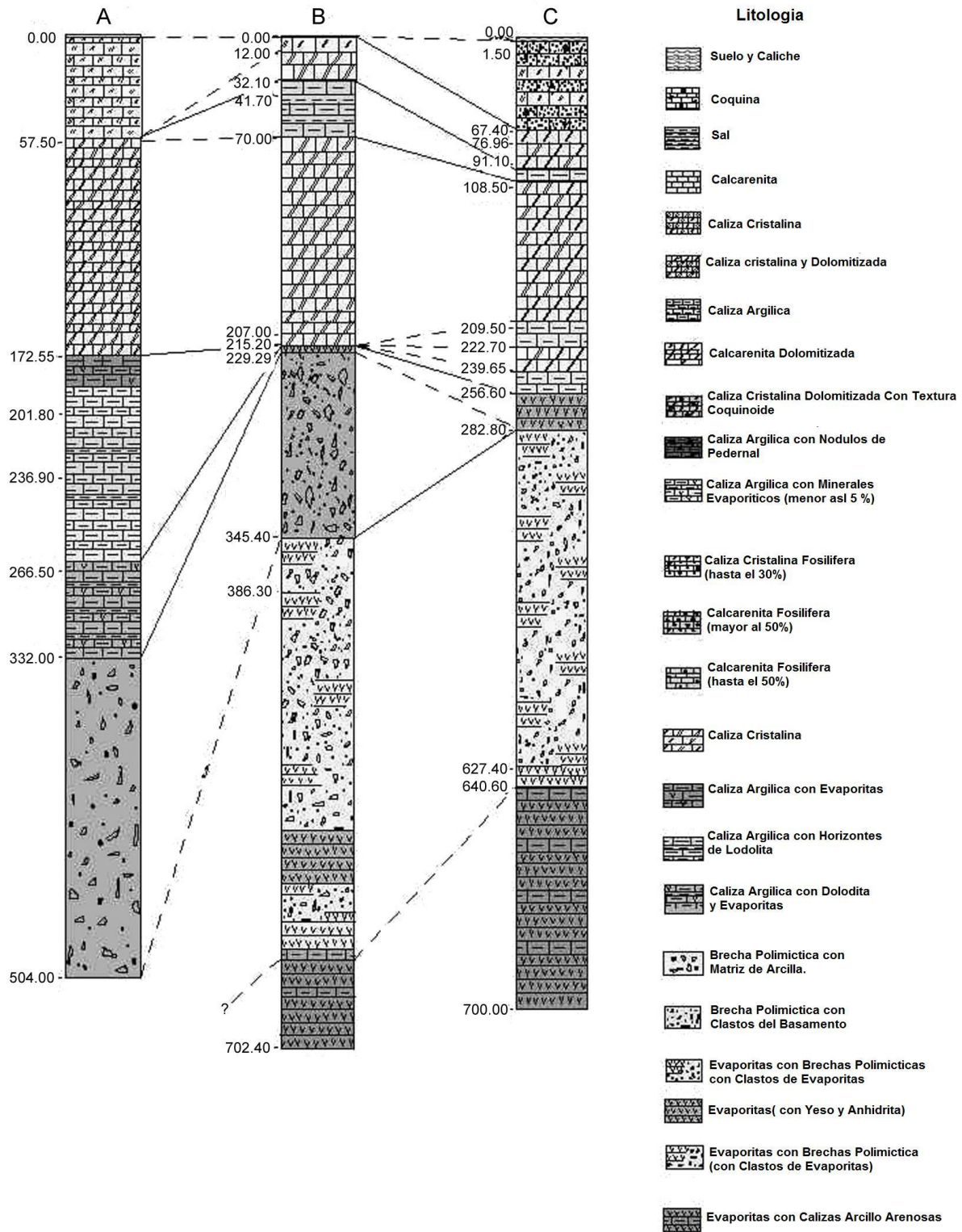


Figura. 2.11. Correlación litológica de los tres pozos de sondeo. A. UNAM -5, Santa Elena. B. UNAM -7, Tekax. C. UNAM -6, (Urrutia et al., 2000).

### **Aspectos de Perforación del Pozo Tekax.**

El pozo Tekax está localizado a 126 kilómetros del centro de la estructura, al sureste del Puerto de Chicxulub, en el municipio de Tekax (unos 2.5 [km] del centro de Tekax en dirección a Ticum), se han identificado el contacto entre la secuencia carbonatada y las unidades de brecha a una profundidad de 222.2 [m]. En el intervalo adyacente al contacto, -entre los 207 y los 215.2 [m].- se observan horizontes de calizas arcillosas y entre los 215.2 y los 222.2 [m] se tiene la presencia de yesos y anhidritas. La unidad de brecha puede separarse en dos unidades mayores; la unidad superior, por abundancia de clastos de rocas de basamento y la unidad inferior gracias a abundantes clastos de anhidrita e intercalaciones de horizontes anisotrópicos de evaporitas. Los contrastes en susceptibilidad magnética permiten diferenciar y caracterizar las diferentes litologías. Los contrastes más marcados se encuentran asociados al contacto entre las calizas arcillosas y horizontes de evaporitas y la brecha polimíctica.

Algunos trabajadores han desafiado la interpretación de la estratigrafía que conservan las descripciones iniciales de López Ramos (1975), quien propuso que las unidades ígneas de textura representan una secuencia volcánica del Cretácico Superior. Otros han objetado que las brechas en el sector sur-sureste de las estructuras fueron producidas por el impacto. La zona es ideal para los estudios geofísicos y permite un excelente resolución, lo cual es difícil de lograr en otras regiones. La topografía es casi plana, con buenas vías de acceso que parten de la ciudad de Mérida. Las unidades carbonatadas aparecen en gran parte sin



deformar y yacen planas. Hay un gran contraste de las propiedades físicas (densidad, magnetismo, susceptibilidad etc) entre los carbonatos y las brechas de las unidades de rocas fundidas. A pesar de la gran cantidad de información disponible sobre la estructura del cráter, fueron propuestos varios modelos contrastantes geofísicos, por ejemplo, el diámetro del cráter donde las estimaciones oscilan entre unos 170 [km] y hasta los 300 [km].

Un problema importante con los modelos geofísicos es la escasez de datos sobre las propiedades físicas, restricción común en los estudios de las cuencas de impacto.

Como parte del proyecto para investigar la estructura de impacto del Chicxulub, los científicos de la UNAM están llevando a cabo un programa de perforación científica con la recuperación continua de núcleos. Siete pozos ubicados en el sector sur de la estructura ya fueron completados durante 1994 y 1995 y los estudios sobre este material están en marcha.

El pozo UNAM-7 alcanzó una profundidad de 702.4 metros y penetró en la secuencia de carbonatos y la brecha de impacto. El pozo UNAM-7 se encuentra a 2.5 km del centro de la ciudad a lo largo de la carretera federal a 184 a Ticum. El sitio está en el centro recreativo de Tekax, a unos 200 metros de la carretera (una losa de concreto con un tubo marca el sitio de perforación), y alrededor de 126 [km] del centro de reunión de la estructura del cráter, cerca del puerto Chicxulub (Véase. Figura. 2.12.).



Se encuentra en el sector sur-sureste, entre los anillos 3 y 4 del estudio de gravedad, mucho más allá del anillo de cenotes y al este del rango Ticul.

La perforación se realiza con un equipo JKS Boyles BBS-37 y se completó entre el 24 y el 2 de julio de 1995. La profundidad máxima fue de 702.4 [m] (referido a la superficie del terreno local). Tres diferentes diámetros se utilizaron para la perforación, correspondientes a los intervalos de 3 a 114.7 m, 114.7 a 426.1 [m] y 426.1 a 702.4 [m]. La recuperación de la muestra fue 99.01%, 99.55% y 99.34% para estos tres intervalos.

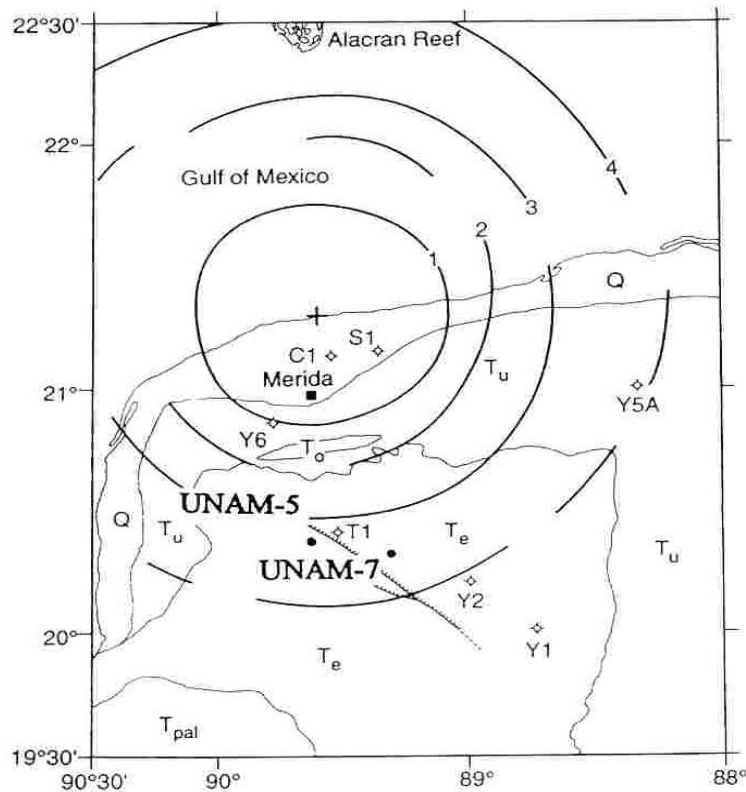


Figura. 2.12. Ubicación del sitio de perforación UNAM-7 Tekax se encuentra en el sector sur de la estructura hacia el este de la gama de Ticul. También se muestran los sitios de perforación de PEMEX: C1, Chicxulub-1; S1, Sacapuc-1, T1, ticul-1, Y1-Yucatan-1, Y2-Yucatan-2, Y5A, Yucatán-5<sup>a</sup> y Y6, Yucatán 6, (Urrutia et al., 1996).

### **Litologías y Propiedades Magnéticas del Pozo Tekax.**

Una columna litológica simplificada es mostrada en la figura 2.13. Desde la superficie al fondo, la columna se compone de una capa de suelo fino (alrededor de 0.2 m) seguido por >200 [m] de espesor de la secuencia de carbonatos del Terciario y una secuencia de 400-500 [m] de espesor de brechas en la parte superior de los sedimentos cretácicos. La secuencia del carbonato del Terciario consiste en calizas cristalinas dolomitizadas e incluye intercalaciones de calizas dolomitizadas, calizas arcillosas, lutitas carbonosas, calizas y margas cristalinas. El contacto con la brecha se produce alrededor de 222.2 [m].

Las unidades por encima del contacto incluyen evaporitas, entre 215.2 y 222.2 [m] y margas, entre 207 y 215.2 [m]. La unidad de brechas se pueden dividir en: unidad superior, caracterizada por la presencia de basamentos y una unidad inferior, que posee abundantes clastos de anhidrita intercalados con horizontes anisotrópico de evaporitas (posiblemente representan grandes clastos). El límite entre las dos unidades de brecha se produce alrededor de los 384.4 [m]. La unidad más baja de una brecha se clasifica dentro de una secuencia de anhidrita intercalada con marga.

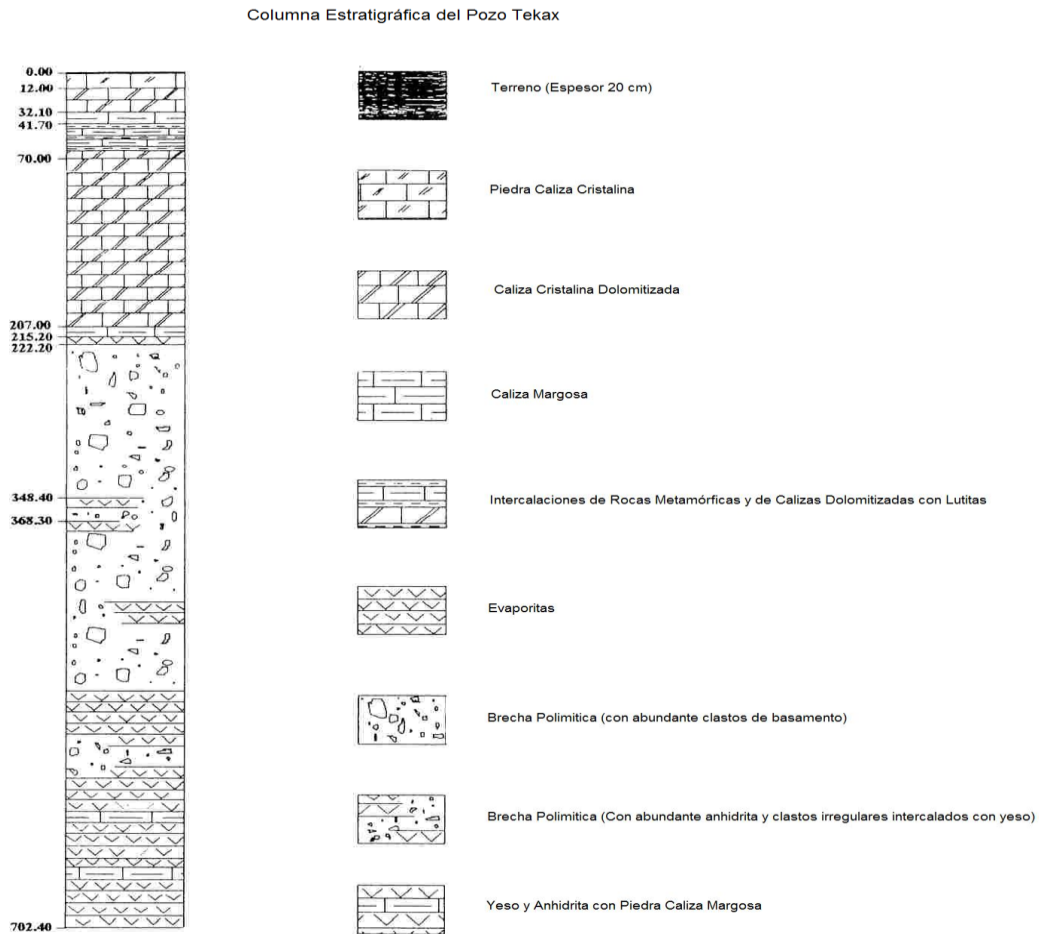


Figura.2.13. Columna Litológica del pozo UNAM-7 Tekax. La posición estratigráfica se encuentra en metros por debajo del nivel de suelo. Tenga en cuenta que el límite Cretácico/Terciario se encuentra entre la secuencia de carbonatos y brechas en los 222.2 [m], (Urrutia et al., 1996).

**Capítulo 3. Métodos.**

En el capítulo se describen los métodos de las técnicas implementadas para el análisis de densidad y composición química en los núcleos de los pozos Yaxcopoil-1 y Tekax, ubicados en la plataforma carbonatada de Yucatán.

**Análisis de Densidad Pozo Yaxcopoil-1.**

Para el análisis de densidad, se selecciono un intervalo de interés a partir de la información de pozo y columna litológica. Se extrajeron y revisaron algunas cajas con núcleos del pozo Yaxcopoil-1. La profundidad de los núcleos seleccionados oscilan entre los 543 y los 608 [m]. Dicho intervalo fue elegido por que muestra un segmento representativo del Paleógeno.

Se obtuvieron muestras más pequeñas (llamadas *taponas*) del pozo Yaxcopoil-1. El tapón se extrae mediante el corte de un núcleo convencional, tomando un pequeño tapón de 1 o de 1.5 pulgadas de diámetro. En este caso, el diámetro utilizado fue de 1 [pg], lo que facilitó su análisis.

Las cajas con los núcleos del pozo Yaxcopoil-1 se encuentran almacenadas en una nucleoteca, en el Instituto de Geofísica de la UNAM.



Figura. 3.1. Nucleoteca del pozo Yax-1 donde se obtuvieron las muestras para el análisis.

Los núcleos se cortaron previamente a la obtención de los tapones. Este procedimiento ocupó una cortadora especial marca Delta (véase figura 3.2).



Figura. 3.2. Cortadora de núcleos marca Delta.

Sólo 120 tapones fueron seleccionados dentro de un margen de profundidad preestablecido (de los 400 hasta los 520 [m]) para el análisis de densidad. Lo primero fue medir su altura con un vernier *Caliper*. Y en seguida, se prosiguió a pesarlas en una báscula digital de laboratorio.

El siguiente paso fue obtener el volumen con la siguiente formula. Cabe señalar el empleo de la masa, las alturas y diámetros de los *tapones* 1[pg], en la operación:

$$V = \pi r^2 h \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.1.}$$

Donde

- V = Volumen
- $\pi = 3.1416$
- $r^2$  = Radio
- h = Altura

Se obtuvo la densidad a partir del cálculo del cociente entre la masa y el volumen de las 120 muestras:

$$\rho = \frac{m}{v} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.2.}$$

Donde:

- $\rho$  = Densidad
- m = Masa
- V = Volumen



**Método de Sumergencia.**

Otro método para obtener la densidad consistió en cambiar la forma de medir el volumen con una probeta de laboratorio marca PYREX de 100 [ml] de capacidad y agua como el fluido para la determinación del volumen.

Se llena la probeta con agua hasta los 30 [ml]. Después, se introduce un tapón en la probeta y se observa el volumen de agua desplazada por el tapón. La medición arrojada será considerada como el volumen del tapón. Esta técnica se realizó para 40 tapones a profundidades de los 540 a 560 [m].



Figura. 3.3. Prueba de sumergencia para obtener el volumen de los tapones.

Se ocupó de nuevo la fórmula 3.2 para obtener la densidad con las medidas de los 40 tapones y con los datos de la masa previamente calculados:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Todos los resultados obtenidos se archivaron en un documento de Excel para su posterior análisis.



### Análisis Químico Pozo Tekax.

Un estudio de fluorescencia de rayos X fue realizado para el análisis químico en el pozo Tekax. Con un aparato portátil de fluorescencia de rayos X y Espectroscopia (XRF) llamado Niton XL3t. El equipo en cuestión pertenece a la marca Thermo Scientific.

Éste analizador de multi-elementos químicos no destruye las rocas, minerales, sedimentos o líquidos. Permite el análisis simultáneo de hasta 25 elementos, algunos de los elementos son aluminio, sílice, calcio, titanio, fierro etc, incluyendo metales pesados. Puede realizar análisis de suelos y sedimentos, control de medio ambiente, cartografía geoquímica, análisis forense y pruebas de pintura de plomo.

Cuenta con un coprocesador matemático, que proporciona una mayor velocidad de prueba y una mayor precisión.



Figura. 3.4. Instrumento Portátil de Fluorescencia de rayos X Niton XL3t, (Tomada de <http://www.panatec.net/ficha-analizadores-xl3t700ss.php>, 1998).

En primer lugar, se seleccionaron algunas cajas de núcleos del pozo Tekax para el análisis. Los núcleos no rebasan los 233 [m] de profundidad ya que en ese intervalo se encuentra la secuencia de carbonatos. Se limpiaron de manera adecuada con agua ya que se encontraban un poco sucios y esto podría afectar los resultados del equipo.



Figura. 3.5. Nucleoteca del Pozo Tekax.

Las cajas menores a ese parámetro de profundidad también fueron ocupadas, pues entre los intervalos de 0 a 233 [m] se encuentra la secuencia de carbonatos del Paleógeno. Otra razón se debió a que se encontraban en mejores condiciones.

En algunos casos, por el paso del tiempo o por el traslado de las cajas para diferentes estudios, los núcleos se dañan o se rompen y ya no sirven. En este estudio, los núcleos dentro del rango de profundidad seleccionado se encontraban en muy buenas condiciones.



Figura. 3.6. Caja de núcleos número 66 del pozo Tekax profundidad entre (229.85 - 232.95) [m].

La manera de utilizar el equipo no requiere un procedimiento complejo. Primero, los núcleos se miden con un flexómetro cada 15 [cm] y se marcan con una pequeña cruz, siguiendo la secuencia de profundidad (de 314 a 325 [m]). Cada marca sirve como señal para el aparato, que funciona de manera similar a un escáner manual; se presiona un botón durante 30 segundos, se registran en la pantalla del mismo y posteriormente se guardan en una computadora.

Los elementos químicos que se registraron en estas mediciones son los siguientes: Calcio, Azufre, Titanio, Manganeso, Cromo, Hierro, Estroncio y Zirconio.



Figura. 3.7. Pantalla donde se registran los elementos medidos, (Tomada de <http://www.panatec.net/ficha-analizadores-xl3t700ss.php>, 1998).

Teniendo los datos ya cargados en la computadora se pueden guardar en un archivo de Excel para su posterior interpretación.

#### **Capítulo 4. Resultados y Discusión.**

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis y se describen los datos y gráficas de las determinaciones de densidad y análisis geoquímicos en los núcleos del pozo Yaxcopoil-1 y los análisis geoquímicos en los núcleos del pozo Tekax. Las mediciones de propiedades físicas y químicas en los núcleos aportan información para la caracterización de las formaciones, en forma complementaria a los datos de los registros geofísicos de pozo. Los datos de densidad han sido empleados para caracterizar secuencias carbonatadas, estudiar contenidos relativos de carbonatos y terrígenos, fracturamiento, relleno de vetillas, procesos de dolomitización. Los datos geoquímicos han sido menos utilizados, principalmente debido a las dificultades técnicas de determinación. Los registros geofísicos han estado limitados a los registros gamma, con mediciones de uranio, torio y potasio; los cuales por otro lado aportan información sobre las litologías y correlación lateral entre pozos. En este estudio, los análisis geoquímicos se amplían para mediciones directas en los núcleos de otros elementos, proporcionando información más completa y detallada sobre los cambios litológicos y la caracterización de las formaciones.

##### ***Resultados de los Análisis al Pozo Yaxcopoil-1.***

Los núcleos estudiados están a profundidades entre los 543 y los 608 [m]. Este intervalo fue seleccionado para investigar un segmento representativo de la secuencia carbonatada del Paleógeno. En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de las distintas mediciones tomadas tales como masa, volumen y densidad.

En caso del volumen, se logra a partir de la fórmula 3.1. El radio considerado para todos los tapones fue de 1.25 [cm].

Tabla 4.1. Mediciones de las propiedades físicas del pozo Yaxcopoil-1.

# Tapón	Altura. [cm]	Volumen. [cm <sup>3</sup> ]	Profundidad. [m]	Masa. [gr]	$\bar{\delta}$ [gr/cm <sup>3</sup> ]
Yax-181A	1.9	9.33	608.74	22.19	2.38
Yax-181B	2.3	11.29	608.79	28.76	2.55
Yax-182A	2.1	10.31	608.81	19.04	1.85
Yax-182B	2.1	10.31	608.96	20	1.94
Yax-183B	2.2	10.80	607.58	28.17	2.61
Yax-184A	2.1	10.31	606.32	20.83	2.20
Yax-184B	2.13	10.46	606.47	20.52	1.96
Yax-185B	2.2	10.80	605.77	25.01	2.32
Yax-186A	2.1	10.31	604.7	22.71	2.20
Yax-186B	2.1	10.31	604.85	23.99	2.33
Yax-187A	2.1	10.31	603.06	17.78	1.72
Yax-187B	2.2	10.80	603.21	17.62	1.63
Yax-188A	2.3	11.29	602.34	29.03	2.57
Yax-189A	2.1	10.31	600.23	24.92	2.42
Yax-189B	2.2	10.80	600.38	26.55	2.46
Yax-190A	2.2	10.80	599.1	19.69	1.82
Yax-190B	2.1	10.31	599.25	20.86	2.02
Yax-191A	2.2	10.80	598.31	20.03	1.85
Yax-191B	2.1	10.31	598.46	17.62	1.71
Yax-192A	2.2	10.80	597.09	21.35	1.98
Yax-192B	2.1	10.31	597.24	17.17	1.67
Yax-193A	2.2	10.80	596.61	27.19	2.52
Yax-193B	2.18	10.70	596.76	27.16	2.54
Yax-194A	2.15	10.55	594.98	19.71	1.87
Yax-194B	2.15	10.55	595.13	19.43	1.84
Yax-195B	2.15	10.55	594.13	17.95	1.70
Yax-196A	2.1	10.31	592.65	17.04	1.65
Yax-196B	2.1	10.31	592.8	19.16	1.86
Yax-197A	2.1	10.31	591.55	20.23	1.96
Yax-197B	2.1	10.31	591.7	19.41	1.88
Yax-198A	2.3	11.29	590.25	26.98	2.39
Yax-198B	2.1	10.31	590.4	18.04	1.75
Yax-199A	2.33	11.44	589.55	29.16	2.55
Yax-199B	2.3	11.29	589.7	24.36	2.16

# Tapón.	Altura. [cm]	Volumen. [cm <sup>3</sup> ]	Profundidad. [m]	Masa. [gr]	$\delta$ . [gr/cm <sup>3</sup> ]
Yax-200A	2.25	11.04	587.41	26.32	2.38
Yax-201B	2.1	10.31	586.25	18.91	1.83
Yax-202A	2.1	10.31	584.73	21.39	2.08
Yax-203B	2.15	10.55	583.66	20.62	1.95
Yax-205A	2.1	10.31	580.86	18.92	1.84
Yax-205B	2.14	10.50	581.01	19.96	1.90
Yax-206A	2.1	10.31	580.02	18.77	1.82
Yax-207A	2.18	10.70	578.82	20.55	1.92
Yax-207B	2.17	10.65	578.97	18.8	1.76
Yax-208A	2.1	10.31	577.74	18.93	1.84
Yax-209A	2.1	10.31	576.95	16.5	1.60
Yax-209B	2.18	10.70	577.1	17.31	1.62
Yax-210A	2.1	10.31	575.82	18.21	1.77
Yax-210B	2.1	10.31	575.97	16.41	1.59
Yax-212A	2.13	10.46	573.85	24.5	2.34
Yax-213A	2.12	10.41	572.5	27.4	2.63
Yax-213B	2.15	10.55	572.65	27.49	2.60
Yax-214A	1.8	8.84	571.42	21.84	2.47
Yax-214B	1.6	7.85	571.57	19.16	2.44
Yax-215A	1.16	5.69	570.77	12.63	2.22
Yax-216A	2.3	11.29	569.1	25.21	2.23
Yax-217A	1.8	8.84	568.38	20.24	2.29
Yax-217B	2.15	10.55	568.53	26.28	2.49
Yax-218A	2.1	10.31	567.34	18.48	1.79
Yax-219B	2.1	10.31	565.6	17.58	1.71
Yax-220A	2.1	10.31	565.23	19.72	1.91
Yax-220B	2.1	10.31	565.38	17.24	1.67
Yax-221A	2.1	10.31	562.85	24	2.33
Yax-221B	2.1	10.31	563	24.01	2.33
Yax-222A	2.1	10.31	563.09	20.51	1.99
Yax-222B	2.1	10.31	563.24	17.17	1.67
Yax-223A	2.1	10.31	562.02	19.16	1.86
Yax-223B	2.1	10.31	562.17	19.74	1.91
Yax-224A	2.2	10.80	561.13	28.22	2.61
Yax-224B	2.2	10.80	561.28	27.53	2.55
Yax-225A	2.3	11.29	559.61	18.09	1.60
Yax-225B	2.1	10.31	559.76	16.02	1.55
Yax-226A	1.9	9.33	558.51	23.71	2.54
Yax-226B	1.9	9.33	558.66	25.44	2.73
Yax-227A	2	9.82	557.06	18.02	1.84
Yax-227B	2	9.82	557.21	18.71	1.91
Yax-228A	2	9.82	555.93	17.36	1.77



# Tapón	Altura. [cm]	Volumen. [cm <sup>3</sup> ]	Profundidad. [m]	Masa. [gr]	$\delta$ [gr/cm <sup>3</sup> ]
Yax-228B	2.1	10.31	556.08	17.62	1.71
Yax-229A	2.2	10.80	554.75	18.64	1.73
Yax-229B	2	9.82	554.9	18.22	1.86
Yax-230A	1.9	9.33	553.59	16.46	1.76
Yax-230B	1.9	9.33	553.74	15.98	1.71
Yax-231A	2	9.82	552.33	21.42	2.18
Yax-231B	1.9	9.33	552.48	20.93	2.24
Yax-232A	1.9	9.33	551.22	16.97	1.82
Yax-232B	1.9	9.33	551.37	15.98	1.71
Yax-233A	1.9	9.33	550.52	17.66	1.89
Yax-233B	1.9	9.33	550.67	15.48	1.66
Yax-234A	1.9	9.33	549.3	20.84	2.23
Yax-234B	1.9	9.33	549.45	21.62	2.32
Yax-235A	1.9	9.33	548.26	17.13	1.84
Yax-235B	2	9.82	548.41	17.31	1.76
Yax-236A	1.9	9.33	547.3	19.78	2.12
Yax-236B	1.9	9.33	547.45	20.81	2.23
Yax-237A	1.9	9.33	546.63	17.07	1.83
Yax-237B	1.9	9.33	546.78	16.01	1.72
Yax-238B	1.9	9.33	545.8	16.77	1.80
Yax-239A	1.9	9.33	544.64	17.31	1.86
Yax-239B	1.9	9.33	544.79	16.09	1.73
Yax-240A	2	9.82	543.48	15.07	1.54
Yax-240B	1.9	9.33	543.63	15.97	1.71



En la Tabla 4.2 se muestran los resultados las mismas propiedades físicas que en la Tabla 4.1, exceptuando las mediciones del volumen que fueron obtenidas con el método de sumergencia, previamente explicado en el capítulo 3.

Tabla 4.2. Mediciones por el método de sumergencia.

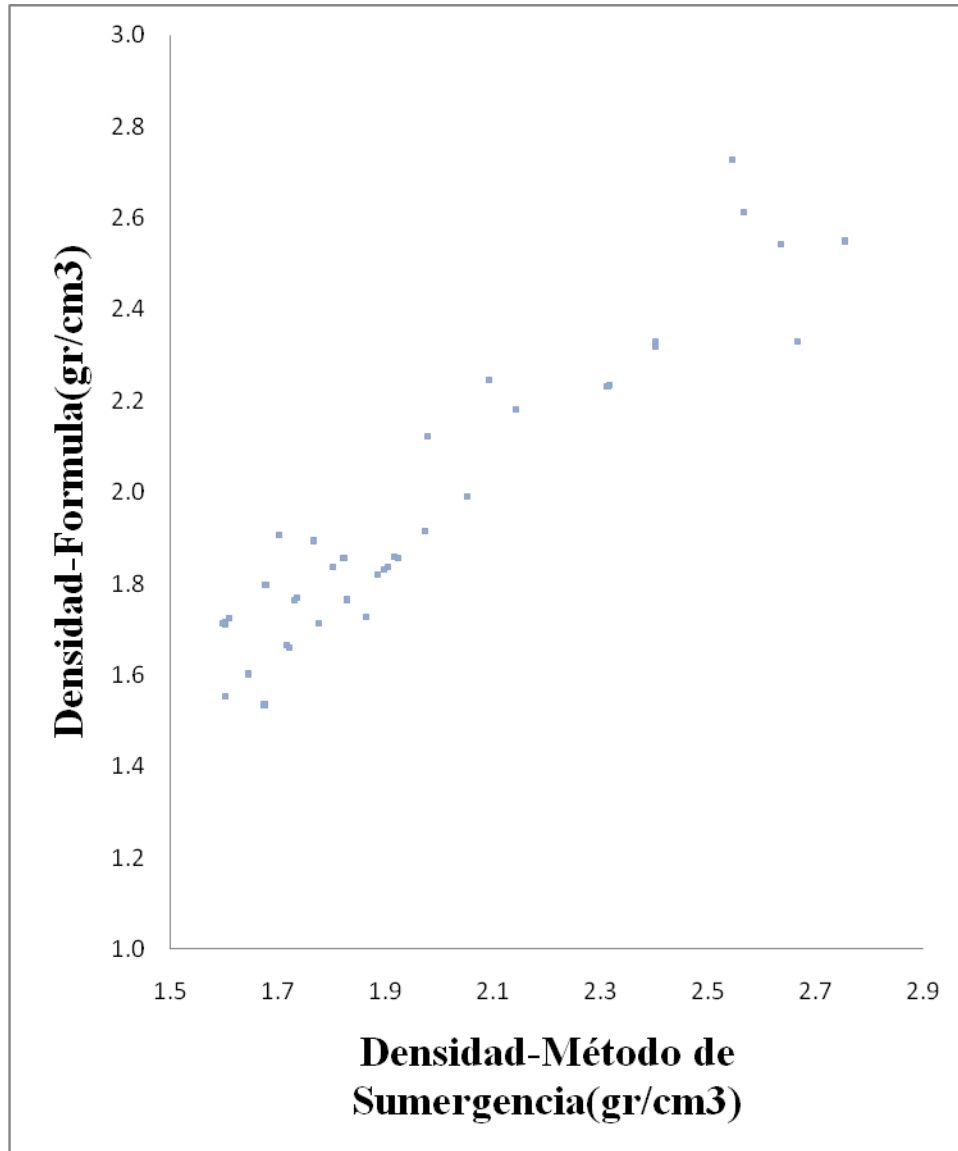
# Tapón.	Altura. [cm]	Volumen. [cm <sup>3</sup> ]	Profundidad. [m]	Masa. [gr]	$\bar{\delta}$ . [gr/cm <sup>3</sup> ]
Yax-221A	2.1	9	562.85	24	2.67
Yax-221B	2.1	10	563	24.01	2.40
Yax-222A	2.1	10	563.09	20.51	2.05
Yax-222B	2.1	10	563.24	17.17	1.72
Yax-223A	2.1	10	562.02	19.16	1.92
Yax-223B	2.1	10	562.17	19.74	1.97
Yax-224A	2.2	11	561.13	28.22	2.57
Yax-224B	2.2	10	561.28	27.53	2.75
Yax-225A	2.3	11	559.61	18.09	1.64
Yax-225B	2.1	10	559.76	16.02	1.60
Yax-226A	1.9	9	558.51	23.71	2.63
Yax-226B	1.9	10	558.66	25.44	2.54
Yax-227A	2	10	557.06	18.02	1.80
Yax-227B	2	11	557.21	18.71	1.70
Yax-228A	2	10	555.93	17.36	1.74
Yax-228B	2.1	11	556.08	17.62	1.60
Yax-229A	2.2	10	554.75	18.64	1.86
Yax-229B	2	10	554.9	18.22	1.82
Yax-230A	1.9	9	553.59	16.46	1.83
Yax-230B	1.9	9	553.74	15.98	1.78
Yax-231A	2	10	552.33	21.42	2.14
Yax-231B	1.9	10	552.48	20.93	2.09
Yax-232A	1.9	9	551.22	16.97	1.89
Yax-232B	1.9	10	551.37	15.98	1.60
Yax-233A	1.9	10	550.52	17.66	1.77
Yax-233B	1.9	9	550.67	15.48	1.72
Yax-234A	1.9	9	549.3	20.84	2.32
Yax-234B	1.9	9	549.45	21.62	2.40
Yax-235A	1.9	9	548.26	17.13	1.90
Yax-235B	2	10	548.41	17.31	1.73
Yax-236A	1.9	10	547.3	19.78	1.98
Yax-236B	1.9	9	547.45	20.81	2.31

---

# Tapón.	Altura. [cm]	Volumen. [cm <sup>3</sup> ]	Profundidad. [m]	Masa. [gr]	δ. [gr/cm <sup>3</sup> ]
Yax-237A	1.9	9	546.63	17.07	1.90
Yax-237B	1.9	10	546.78	16.01	1.60
Yax-238A	1.9	9	545.65	16.56	1.79
Yax-238B	1.9	10	545.8	16.77	1.68
Yax-239A	1.9	9	544.64	17.31	1.92
Yax-239B	1.9	10	544.79	16.09	1.61
Yax-240A	2	9	543.48	15.07	1.67
Yax-240B	1.9	10	543.63	15.97	1.60

---

El objetivo de obtener la densidad con el método de sumergencia es compararlo con la densidad obtenida con la fórmula 3.2. De esta manera analizar las diferencias que pueden presentarse al utilizar la fórmula, ya que al utilizar el método de sumergencia se introducen partículas de agua en los poros de tapón lo que afectaría el volumen desplazado que es menor al obtenido con la fórmula 3.1 y de este modo afecta el valor de la densidad que se obtuvo con la fórmula 3.2 dando como resultado un valor mayor. Las diferencias esperadas son pequeñas, dada la baja porosidad y permeabilidad en los carbonatos.



Gráfica. 4.1. Densidad Método de Sumergencia [gr/cm<sup>3</sup>] VS Densidad por Formula.

Los valores de densidad por el método de sumergencia varían aproximadamente de 1.5 a 2.7 [gr/cm<sup>3</sup>], mientras que el rango de valores de densidad por fórmula oscilan entre 1.5 a 2.8 [gr/cm<sup>3</sup>] (Gráfica 4.1). Se puede apreciar que existe una correlación lineal entre ambos conjuntos de datos debido a que los valores son muy semejantes.

### Discusión Sobre el Análisis de Densidad en el Pozo Yaxcopoil-1.

Un análisis de densidad en la formación está directamente relacionado con los siguientes 6 puntos, los cuales nos permiten caracterizar la secuencia carbonatada.

- 1) Mineralogía y Densidad.
- 2) Tamaños de granos.
- 3) Porosidad y Permeabilidad Primarias.
- 4) Porosidad Secundaria.
- 5) Relleno de Fracturas y Cavidades.
- 6) Procesos Diagenéticos y de Alteración.

#### 1) Mineralogía y Densidad.

La densidad de una sustancia es un valor absoluto que se refiere a la cantidad de masa de dicha sustancia que hay en una unidad de volumen de la misma. La unidad de volumen utilizada es el centímetro cúbico, y la masa viene dada en gramos. Por tanto, la densidad es una característica de la materia que se mide en  $[g/cm^3]$ .

En mineralogía se utiliza más frecuentemente el peso específico de un mineral. Este peso es un valor relativo que permite comparar las densidades entre diferentes minerales. El peso específico expresa la relación entre el peso de un mineral y el peso de un volumen igual de agua, esto es:

$$\text{peso específico} = \frac{\text{peso del mineral}}{\text{peso de un volumen igual de agua}}$$

El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que la constituyen y con la proximidad y densidad relativa del apretamiento en que estén arreglados en la estructura cristalina.

La mayoría de los minerales que forman rocas tienen un peso específico de alrededor de  $2.7 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ , aunque el peso específico medio de los minerales metálicos es aproximadamente de  $[5 \text{ g/cm}^3\text{}]$ .

Los minerales pesados son los que tienen un peso específico más grande que  $2.9 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ , por ejemplo zircón, pirita, piroxeno, granate.

Tabla. 4.3. Densidad de algunos Minerales.

Densidad en $\text{g/cm}^3$	Mineral
2.65	Cuarzo
2.5	Feldespato
2.6-2.8	Plagioclasa
4.47	Baritina
4.9	Magnetita
5.0-5.2	Pirita
19.3	Oro

## 2) Tamaños de Grano.

Los granos que conforman la matriz de la roca se encuentran unidos entre sí por material cementante, el cual se encuentra compuesto principalmente por sílice, carbonato de calcio y arcilla. La presencia de material cementante afecta la firmeza y compactación de la roca, por lo tanto afecta la porosidad de la misma.

Dependiendo del ambiente depositacional en el cual se originó la roca, los granos que la conforman presentarán una determinada distribución en su tamaño. Esta variación en el tamaño de los granos se conoce como escogimiento y es un factor que afecta la porosidad de la roca.

Cuando la distribución del tamaño de los granos de una roca es homogénea (buena clasificación o selección), la porosidad de la roca es alta. A medida que aumenta la heterogeneidad en el tamaño de los granos, la porosidad de la roca disminuye.

La forma de los granos también afecta la porosidad de la roca. Un sistema compuesto por granos perfectamente redondeados presentará una porosidad mayor que un sistema formado por granos alargados.

El tamaño de grano son parámetros de textura, donde la porosidad es independiente del tamaño de grano para arenas no consolidadas de la misma clasificación, pero el tamaño de grano si afecta la permeabilidad ya que mientras más fina sea la arena menor será la permeabilidad. Una baja permeabilidad

produce un flujo de fluidos lento, lo cual promueve la cementación, mientras que un flujo alto promueve la disolución.

Podemos tener granos redondeados y no redondeados. Se tiene mejor porosidad cuando los granos son redondeados. Los cambios en los granos se deben a procesos de compactación y diagénesis.

### 3) Porosidad Primaria y Permeabilidad.

#### Porosidad Primaria.

De acuerdo a su origen, la porosidad puede ser clasificada en primaria o intergranular. La porosidad primaria o intergranular es aquella que se origina durante el proceso de deposición de material que da origen a la roca.

En general las rocas con porosidad primaria presentan características más uniformes que aquellas que presentan parte de su porosidad secundaria.

#### Porosidad Intercristalina.

Se refiere a los espacios existentes entre los planos de un cristal o espacios vacíos entre cristales. Muchos de estos poros son sub-capilares, poros menores de 0.002 [mm] de diámetro. La porosidad que se encuentra entre cristales o partículas tamaño lodo se llama comúnmente "microporosidad".

#### Porosidad Intergranular.

Es función del espacio vacío entre granos, es decir, de los espacios intersticiales de toda clase en todo tipo de roca. Esta porosidad comprende tamaño sub-capilar

a súper-capilar. Generalmente, los espacios tienen un diámetro mayor de 0.5 [mm].

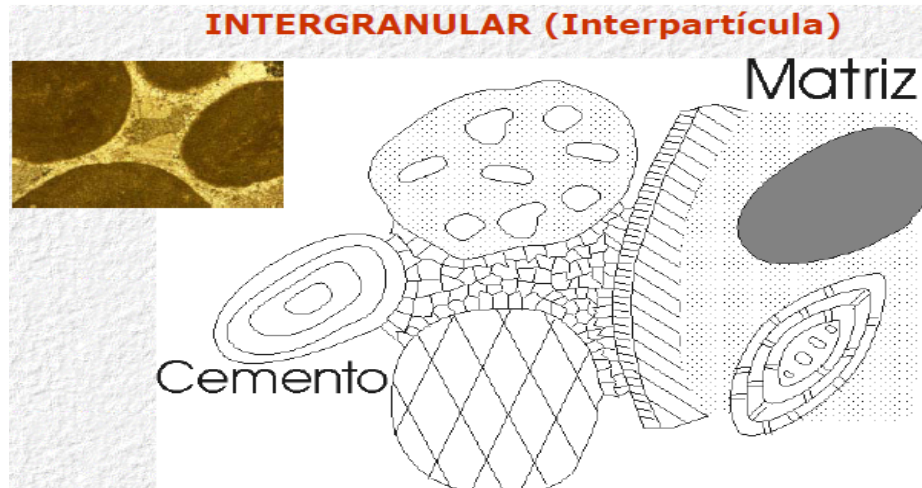


Figura.4.1. Porosidad Intergranular (Interpartícula). (Tomada de [http://gmg.unizar.es/gmgweb/Asignaturas/Exogenall/TranspaMicroscopio/Pr%C3%A1ctica\\_6\\_Carbonatadas\\_matriz\\_cemento\\_porosidad.pdf](http://gmg.unizar.es/gmgweb/Asignaturas/Exogenall/TranspaMicroscopio/Pr%C3%A1ctica_6_Carbonatadas_matriz_cemento_porosidad.pdf), 2000).

Permeabilidad (K).

Es una medida de capacidad de una roca para permitir el paso de un fluido a través ella. La permeabilidad puede ser absoluta, efectiva o relativa.

Permeabilidad absoluta.

Es la propiedad de la roca que permite el paso de un fluido, cuando se encuentra saturada al 100% de ese fluido.

Permeabilidad efectiva ( $K_o$ ,  $K_g$ ,  $K_w$ ).



La permeabilidad efectiva a un fluido es la permeabilidad del medio a ese fluido cuando su saturación es menor del 100%.

$K_o$  =permeabilidad efectiva al aceite.

$K_g$  =permeabilidad efectiva al gas.

$K_w$  =Permeabilidad efectividad al agua.

Permeabilidad relativa ( $K_{ro}$ ,  $K_{rg}$ ,  $K_{rw}$ ).

La permeabilidad relativa a un fluido es la relación de la permeabilidad efectiva a ese fluido a la permeabilidad absoluta.

#### 4) Porosidad Secundaria.

Se debe a procesos posteriores que experimentan el mismo medio poroso, como disolución del material calcáreo por corrientes submarinas, acidificación, fracturamiento, etc.

La propiedad se expresa en fracción, pero ya es común también expresarla en por ciento.

La propiedad varía normalmente en los yacimientos entre el 5 y el 30 %.

La porosidad puede obtenerse directamente de núcleos en el laboratorio o indirectamente a partir de los registros geofísicos de explotación.

##### 5) Relleno de Fracturas y Cavidades.

La porosidad de las rocas en los yacimientos naturalmente fracturados se agrupan en tres patrones geométricos: fracturas, cavidades y la combinación de ambos, denominados el patrón mixto. La morfología de estos patrones, así como las dimensiones de fracturas y cavidades, no siempre son fácilmente cuantificables, en parte debido a la extensión y compleja distribución de la porosidad en el espacio Euclidiano. La geometría de los patrones de porosidad determina, por un lado, la intensidad de los flujos superficiales de las substancias a través de los yacimientos naturalmente fracturados y por el otro su capacidad de almacenamiento de hidrocarburos. La apertura, distribución y conectividad de los patrones de fractura y cavidades, conjuntamente con la permeabilidad de las rocas, son de importancia primordial para la intensidad de flujo, mientras que la morfología, el diámetro efectivo y la continuidad de los poros, son rasgos decisivos para la capacidad de almacenamiento.

##### 6) Procesos Diagenéticos y de Alteración.

Los yacimientos carbonatados pueden ser colosales, aunque sus poros pueden ser microscópicos, su permeabilidad es muy baja, mientras que los fluidos fluyen a través de las fracturas.

Las rocas sedimentarias carbonatadas se diferencian de las rocas sedimentarias siliciclásticas de varias maneras. Las rocas siliciclásticas se forman a medida que los sedimentos son desplazados, se depositen y litifican, o se compactan y cementan en roca sólida. La mayor parte de los carbonatos se desarrollan a partir

de los sedimentos biogénicos formados por actividad biológica, como la creación de arrecifes y la acumulación de restos de organismos en el fondo marino.

Las rocas carbonatadas se diferencian de las rocas clásticas por factores como la textura, los tipos de grano o de poro, la composición de la roca, o la diagénesis a que las clásticas se pueden distinguir por su composición y el tamaño de los granos. La diagénesis de los carbonatos puede modificar de manera significativa la permeabilidad y el espacio entre los poros.

Las rocas carbonatadas presentan, desde el punto de vista diagenético, una característica muy importante en su alta diagenetibilidad, fruto de la rápida inestabilidad de sus componentes con el enterramiento. Dentro de los procesos diagenéticos están:

- Micritización.
- Compactación
- Cementación
- Disolución.
- Recristalización.
- Dolomitización.

#### Micritización

Es un proceso que tiene lugar por la acción conjunta de la erosión biológica (factor más importante) y la abrasión mecánica, dando lugar a unas envueltas micríticas que van destruyendo la textura interna de las partículas (total o parcial). La erosión biológica la llevan a cabo microorganismos que perforan la estructura de la partícula, rellenándose posteriormente por barro calcáreo. Éste proceso se considera típicamente como de diagénesis temprana.

Compactación.

Es producto del aumento de la presión o carga sedimentaria al incrementarse la profundidad de soterramiento y se expresa como una disminución del volumen del sedimento, esto hace que disminuya la porosidad por el reacomodo de los granos, deformación plástica, presión de la solución y fracturas.

Cementación.

Es la formación de minerales autigénicos por la precipitación directa de las soluciones intersticiales, la cual ocurre por una sobresaturación del fluido de poro en ciertas sustancias, originando la formación de minerales de distinta composición química. La cementación destruye el espacio poroso.

Disolución

La disolución de los materiales sedimentarios involucra partículas sedimentarias detríticas, materiales previamente precipitados, reemplazados, recristalizados, etc. La disolución de los granos crea espacio poroso.

Recristalización.

La recristalización es el paso de micrita (menor de 4 micras) a microesparita (entre 4 y 10 micras) y posteriormente a pseudoesparita (mayor a 10 micras, de tal forma que el producto final son cristales de gran tamaño (pseudoesparita) que se pueden confundir con los cristales de cementación (esparita). La distinción entre unos y otros resulta fundamental dada la absoluta diferencia entre ambos procesos.

Dolomitización.

Es el proceso mediante el cual la caliza se transforma en dolomita según la siguiente reacción.

Algunas rocas carbonatas están constituidas solamente por calizas. Si el agua circulante a través del espacio poroso contiene suficientes cantidades de magnesio disuelto, el calcio en la roca puede intercambiarse por el magnesio en solución. Como el magnesio es considerablemente más pequeño que el calcio,

El análisis de textura de dolomitización puede hacerse considerando dos casos reemplazamiento parcial o reemplazamiento total.

Reemplazamiento total

Podemos encontrarnos diferentes situaciones.

- a) Conservación de la textura deposicional.
- b) Conservación parcial de la textura deposicional.
- c) Sin conservación de la textura deposicional.

Reemplazamiento parcial.

El reemplazamiento parcial suele llevar, generalmente, un orden selectivo de tal forma que lo primero en dolomitizarse es la matriz micrítica y posteriormente los bioclásticos. En otras ocasiones la selectividad se establece a través de fracturas, bioturbación, estructuras sedimentarias, etc.

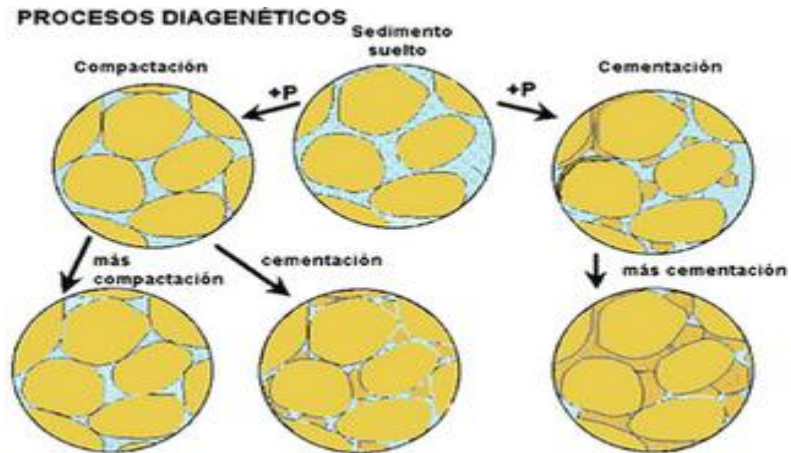
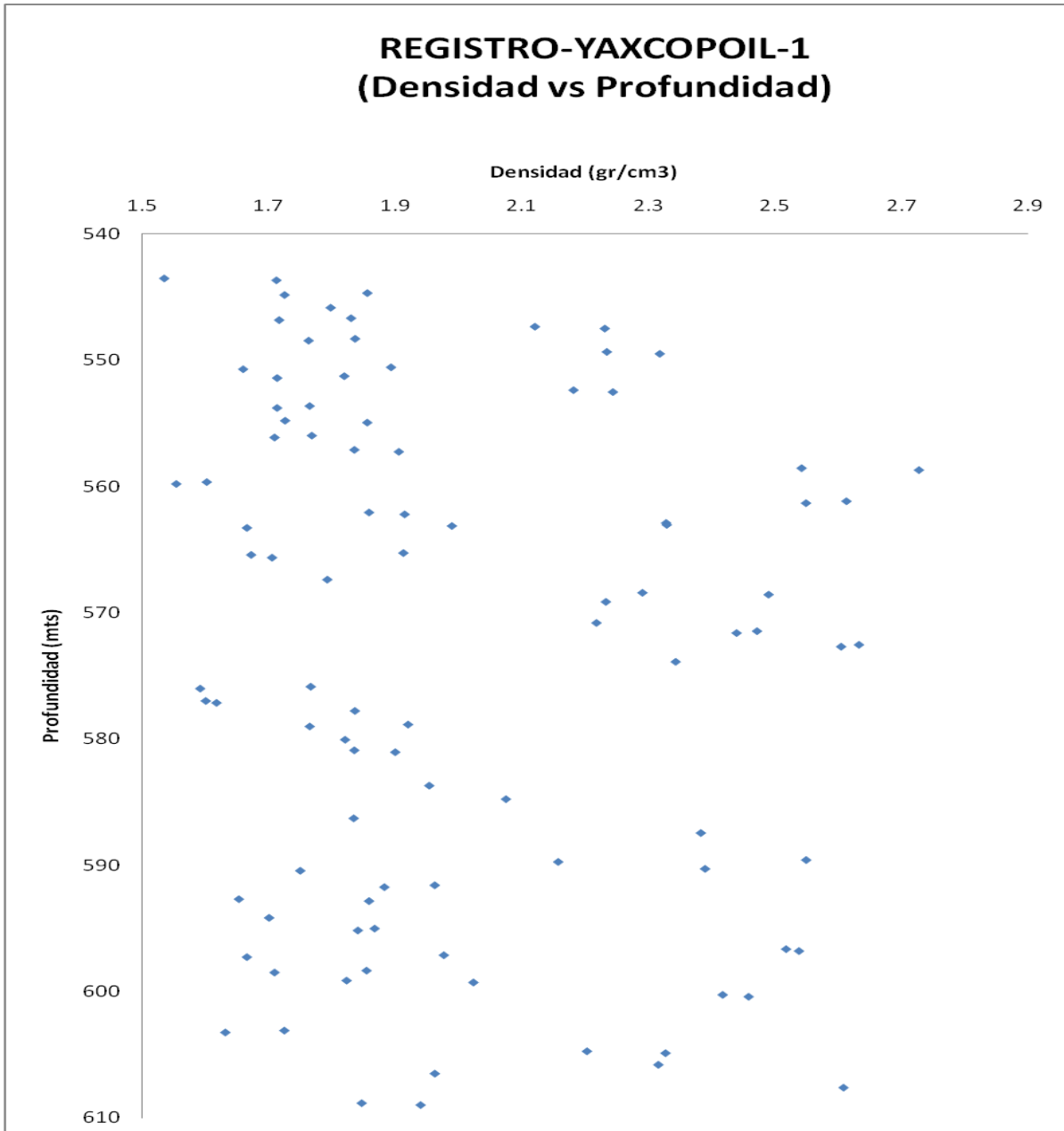


Figura. 4.2. Procesos Diagenéticos (Tomada de [http://personales.ya.com/geopal/g-b\\_1bach/ejercicios/act2tema5.htm](http://personales.ya.com/geopal/g-b_1bach/ejercicios/act2tema5.htm).2004).



Gráfica. 4.2. Registro de densidad del pozo Yaxcopoil-1.

Los valores de densidad verían entre 1.5 a 2.7 [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ], presentándose de densidades menores a 2 [ $\text{gr}/\text{cm}^3$ ] en parte de la secuencia (Véase. Gráfica 4.2). Los valores presentan alta dispersión, con tres intervalos con densidades más altas. Para analizar los factores involucrados en las variaciones de densidad

dentro de esta parte de la secuencia carbonatada, se realizaron comparaciones y correlaciones con la caracterización litológica y los resultados de determinaciones de composición química.

### Resultados del Análisis Químico del Pozo Yaxcopoil-1.

En el pozo Yaxcopoil-1 se realizó un análisis químico a partir de un estudio de fluorescencia de rayos X con un aparato portátil llamado Niton XLet marca Thermo Scientific. El dispositivo y el procedimiento fueron los mismos que se ocuparon en el pozo Tekax, los cuales fueron previamente explicados en el Capítulo 3. Para este análisis las mediciones fueron cada 30 [cm] y los elementos químicos medidos en por ciento peso [wt%] son Aluminio, Sílice, Calcio, Titanio y Hierro, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 4.4.

Tabla. 4.4. Mediciones del Análisis Químico del Pozo Yaxcopoil-1

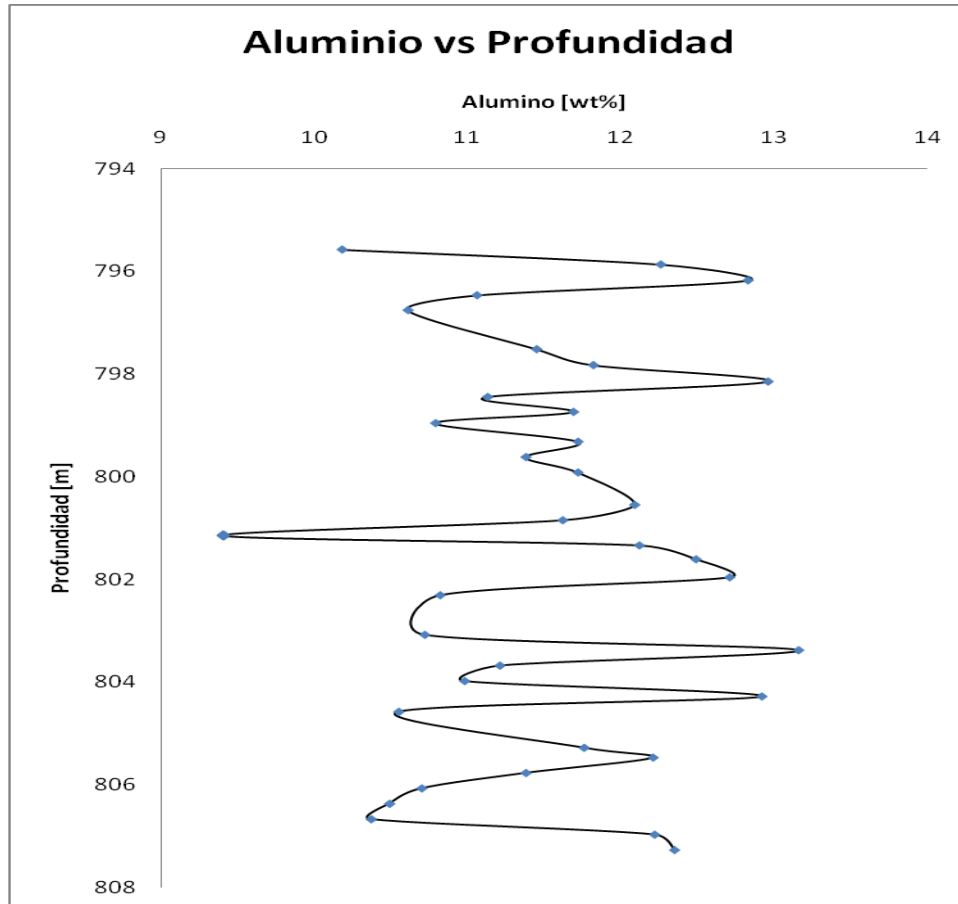
Profundidad. (m)	Aluminio. (wt%)	Sílice. (wt%)	Calcio. (wt%)	Titanio. (wt%)	Hierro. (wt%)
795.58	10.18	37.33	18.54	0.44	4.59
795.87	12.26	44.54	9.49	0.54	5.64
796.18	12.83	46.81	10.71	0.53	5.58
796.47	11.06	40.67	9.32	0.51	5.16
796.76	10.61	39.03	20.5	0.46	4.39
797.52	11.45	40.19	11.15	0.5	5.18
797.83	11.82	49.36	6.83	0.61	6.17
798.15	12.96	49.46	7.61	0.59	5.78
798.45	11.13	40.89	15.5	0.49	4.96
798.74	11.69	45.4	8.59	0.56	5.62
798.96	10.79	43.58	10.22	0.53	5.75
799.32	11.72	40.47	16.57	0.46	4.92
799.62	11.38	43.56	10.79	0.52	5.33
799.92	11.72	49	7.36	0.56	6
800.55	12.09	44.2	6.77	0.53	5.69
800.85	11.62	41.63	10.81	0.51	5.23
801.15	9.41	33.68	20.29	0.41	4.23
801.34	12.12	46.39	8.17	0.53	5.54



---

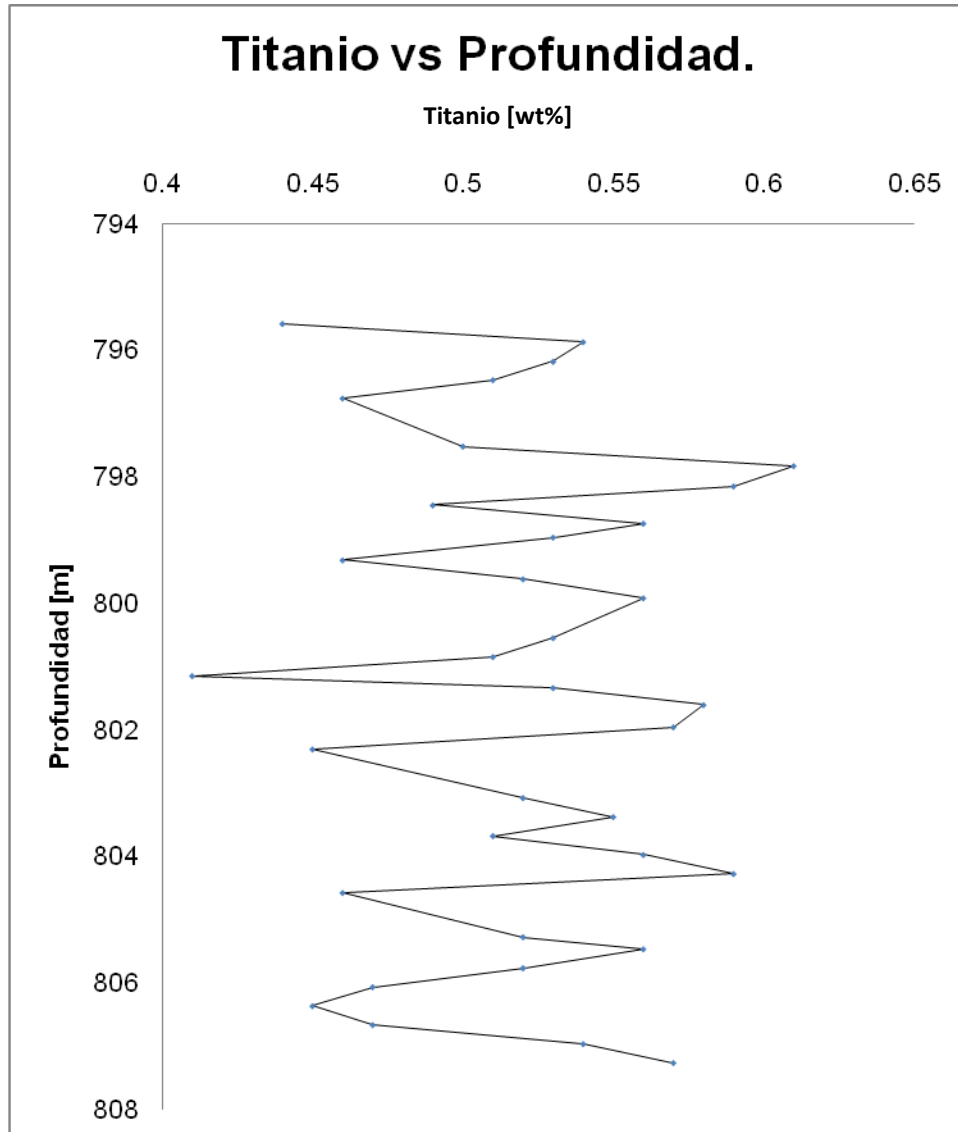
Profundidad. (m)	Aluminio. (wt%)	Sílice. (wt%)	Calcio. (wt%)	Titanio. (wt%)	Fierro. (wt%)
801.61	12.49	47.15	6.66	0.58	5.94
801.96	12.71	47.98	6.78	0.57	5.88
802.31	10.82	35.19	22.17	0.45	4.03
803.08	10.72	38.71	17.79	0.52	4.4
803.38	13.16	44.46	11.98	0.55	5.09
803.68	11.21	43.08	13.54	0.51	5.21
803.98	10.98	45.21	8.7	0.56	5.67
804.28	12.92	49.19	7.82	0.59	5.87
804.58	10.55	37.04	19.21	0.46	4.87
805.28	11.76	43.91	11.7	0.52	5.48
805.47	12.21	46.41	7.87	0.56	6.1
805.77	11.38	44.56	8.97	0.52	5.5
806.07	10.7	38.03	21.26	0.47	4.59
806.37	10.49	38.89	16.92	0.45	4.49
806.67	10.37	37.68	15.16	0.47	4.5
806.97	12.22	46.09	8.54	0.54	5.68
807.27	12.35	47.11	8.42	0.57	5.91

---



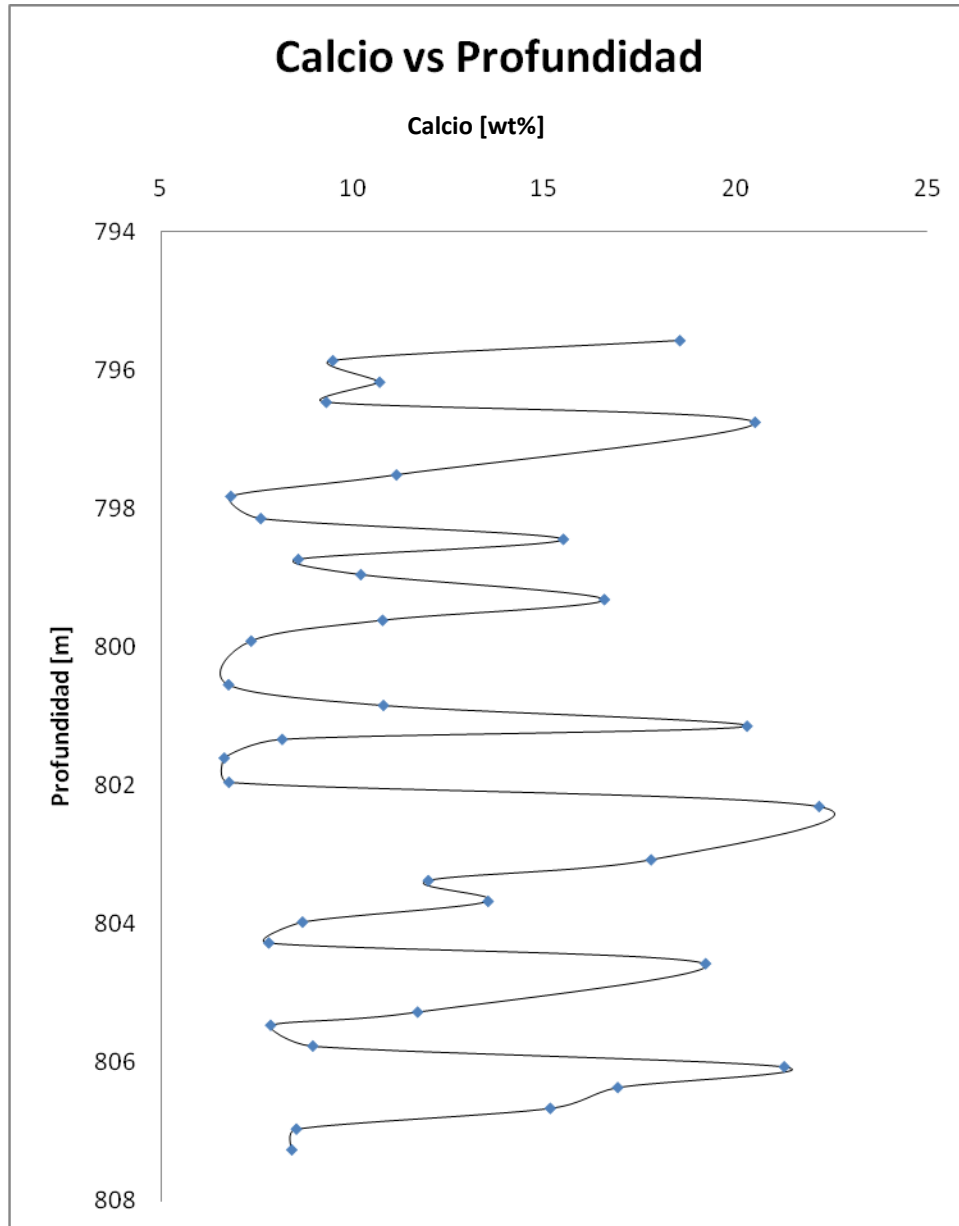
Gráfica. 4.3. Registro Aluminio vs Profundidad del Pozo Yaxcopoil-1.

Los contenidos de óxidos de aluminio varían alrededor de un 11-12% con un rango entre 9 y 13%(Gráfica 4.3). El contenido de aluminio en secuencias carbonatadas estaría relacionado a aportes de terrígenos en la cuenca, lo que debe reflejarse en las variaciones de otros elementos, tales como titanio, etc. En el caso del pozo Yaxcopoil-1, el intervalo analizado está arriba del contacto con la secuencia de brecha de impacto y los contenidos elementales de aluminio, titanio, etc, están asociados a aporte de las brechas, que presentan contenidos altos en estos elementos.



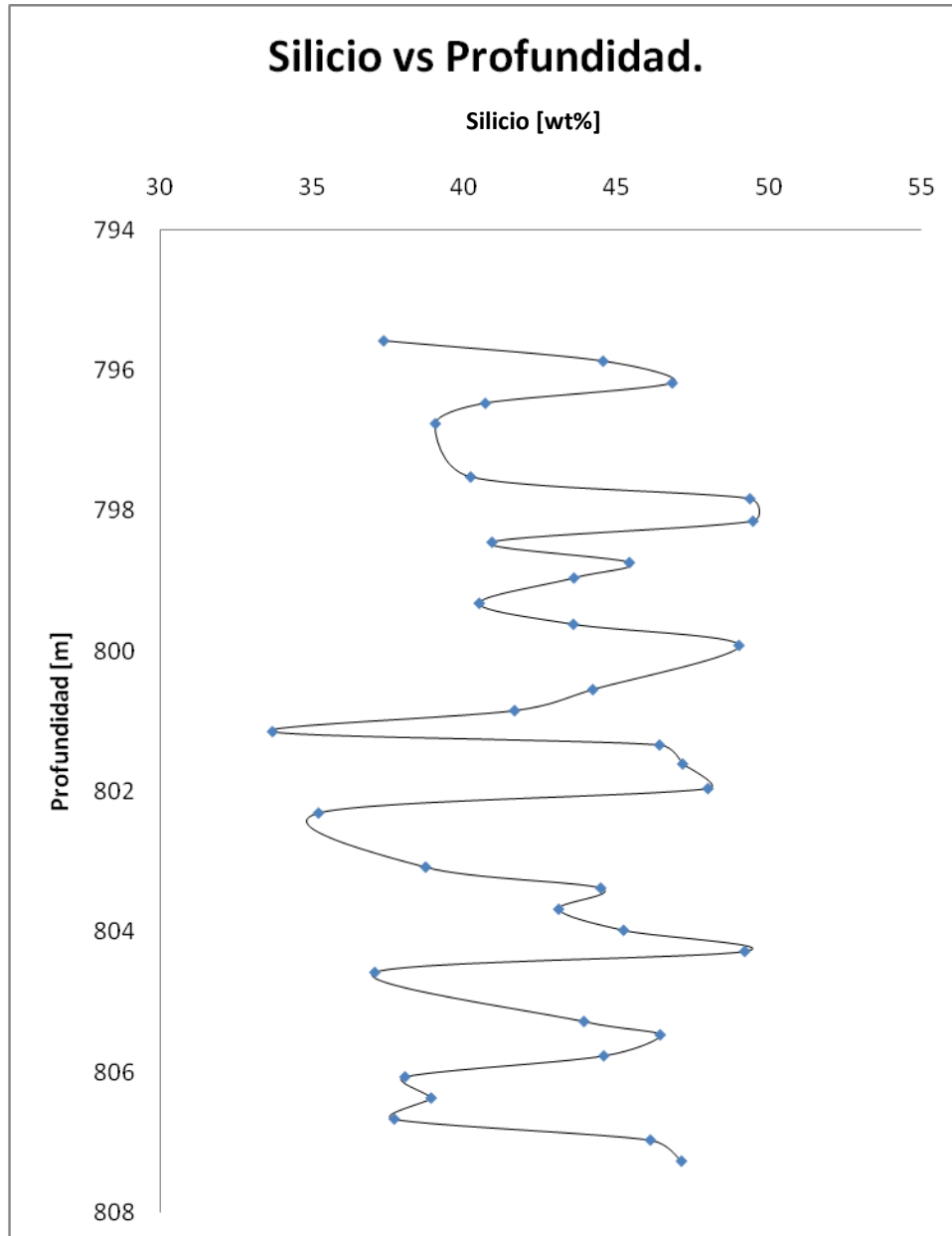
Gráfica.4.4. Registro Titanio vs Profundidad del Pozo Yaxcopoil-1.

Los contenidos relativos de titanio están en el rango de 0.4 a 0.6%, con contenidos alrededor de un 0.5-0.55% (Véase Gráfica 4.4). El registro geoquímico se caracteriza por varios picos, que correlacionan con el patrón observando en otros elementos, tales como los contenidos de aluminio.



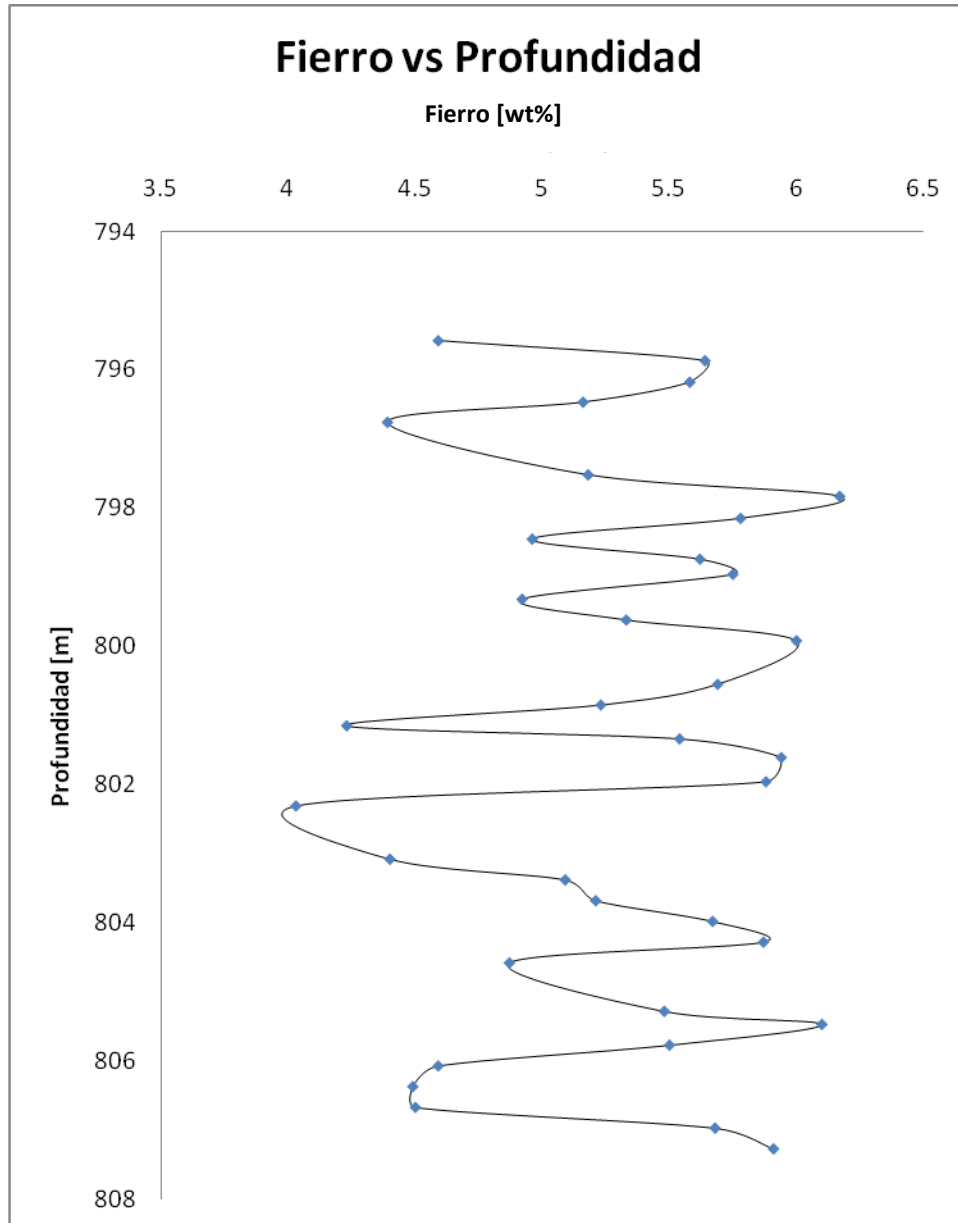
Gráfica. 4.5. Registro Calcio vs Profundidad del Pozo Yaxcopoil-1.

Los contenidos relativos de calcio varían entre 6 y 22%, con concentraciones medias en el intervalo analizando menores a un 12-13% (Véase Gráfica 4.5).



Gráfica. 4.6. Registro Silicio vs Profundidad del Pozo Yaxcopoil-1.

Los contenidos de silicio en la secuencia son relativamente altos, con contenidos variado entre 34 y casi 50% (Véase Gráfica 4.6). En el intervalo, los valores de óxido de silicio están del orden de 42-50% y que refleja un aporte de material síliceo, de parte de la brecha de impacto.



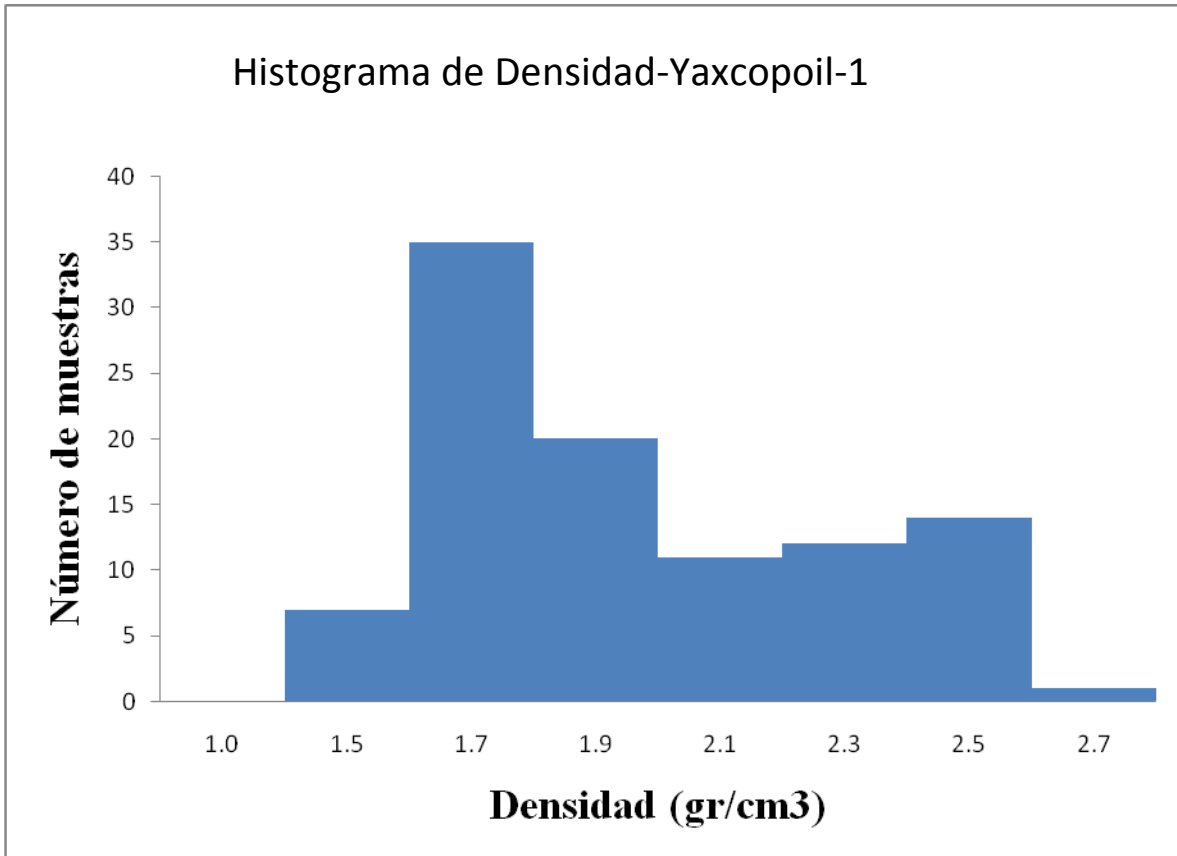
Gráfica. 4.7. Registro Fierro vs Profundidad del Pozo Yaxcopoil-1

Los contenidos de hierro en la secuencia varía entre 4 y 6 %, con un rango relativamente estrecho indicando baja variación en este intervalo (Véase Gráfica 4.7). Los contenidos de hierro son de orden de 5-5.5% y parecen estar relacionados a los aportes de material de brecha de impacto.

**Histograma del Pozo Yaxcopoil-1.**

Para el Pozo Yaxcopoil-1 se realizó un análisis estadístico y un histograma. Un histograma es una grafica de la distribución de un conjunto de medidas. Un histograma es un tipo especial de gráfica de barras que ilustra la variabilidad estadística de valores dentro de un proceso. Un histograma toma datos variables (tales como alturas, pesos, densidades, tiempo, temperaturas, etc.), y despliega su distribución en términos de frecuencia, con curvas uni-modales tipo gaussianas o bien curvas multi-modales. Los patrones inusuales pueden indicar que un proceso necesita investigación para determinar su grado de estabilidad. Para los datos de densidades, parte del interés fue observar si había una o más poblaciones de datos, que pudieran relacionarse con cambios en litología o aporte de terrígenos en los carbonatos.

Desde un sistema estable, se pueden hacer predicciones sobre el desempeño futuro del sistema. Un estudio para efectuar mejoras utiliza un histograma para evaluar la situación actual del sistema y para estudiar resultados. La forma del histograma y la información de estadísticas le ayudaran al equipo a saber cómo mejorar el sistema. Después de que una acción por mejorar es tomada, el equipo continua recogiendo datos y haciendo histogramas para ver si la teoría ha funcionado.



Gráfica. 4.8. Histograma del pozo Yaxcopoil-1.

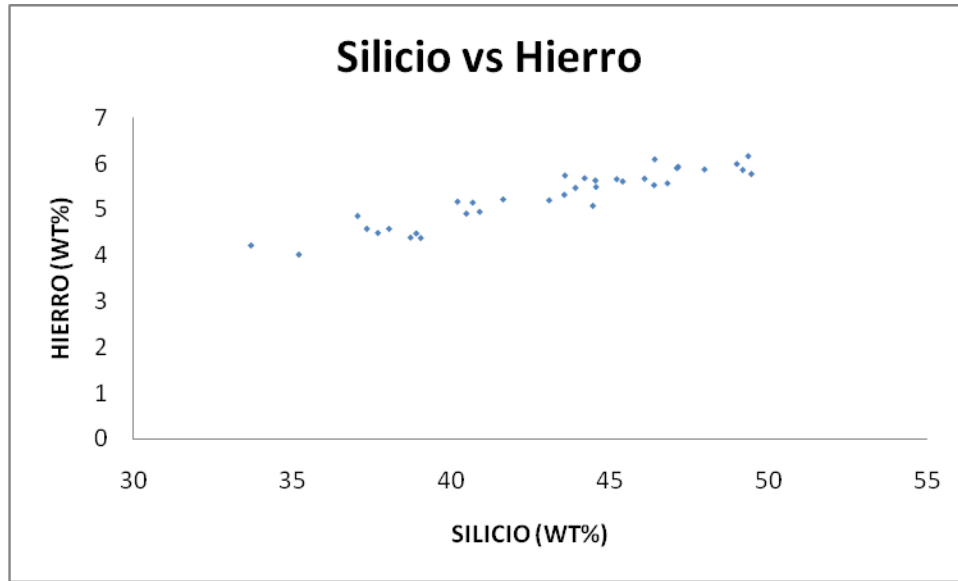
En la Gráfica 4.8 se muestra el histograma del Pozo Yaxcopoil-1 realizado con los 120 tapones del mismo pozo. En el eje Y se encuentra el número de muestras (los tapones) y en el eje X la variable medida es la densidad en  $[\text{gr/cm}^3]$ . La mayor parte de las muestras cayeron en los valores 1.7 y 1.9 de densidad. Por otro lado la menor cantidad de datos se presentó en valores por arriba de 2.5  $[\text{gr/cm}^3]$ . Esta gráfica permitió evaluar y estudiar los datos de una manera más adecuada, que presentan una buena correlación entre los resultados de los dos métodos utilizados.



### **Discusión Sobre los Análisis en el Pozo Yaxcopoil-1.**

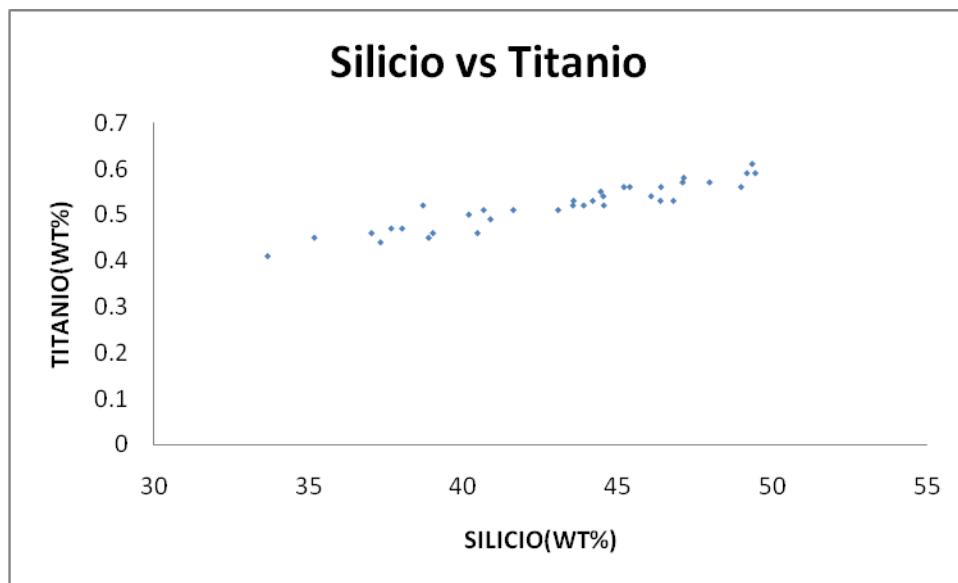
Los análisis de propiedades petrofísicas permiten caracterizar las formaciones y aportan datos para interpretación de los estudios geofísicos y registros de pozo. Las propiedades petrofísicas, generalmente se estiman a partir del procesado y modelado de los datos de los distintos registros de pozo, que proporcionan información sobre la densidad, porosidad, permeabilidad, velocidades de ondas P y S, parámetros elásticos, etc. La caracterización litológica se realiza generalmente a partir de los estudios en los recortes e intervalos de núcleo y con referencia a algunos de los registros de pozo, entre ellos los registros de rayos gama. Los registros de rayos gama permiten estudiar las variaciones en contenidos de los elementos radioactivos uranio, torio y potasio. Uno de los objetivos del trabajo de tesis es la evaluación del empleo potencial de registros geoquímicos multi-elementales, analizados por fluorescencia de rayos x en los núcleos y su correlación con otros parámetros de petrofísica, que permitan una caracterización de mayor detalle de las formaciones.

Las relaciones entre los elementos y los contenidos relativos aportan información sobre el origen de los materiales. En el caso de las brechas analizadas en el Pozo Yaxcopoil-1, las relaciones indican una fuente asociadas a las rocas del basamento y las rocas fundidas. Son ricas en sílice, hierro, aluminio y titanio. Las Gráficas de estos elementos se presentan de la figuras 4.9 a la 4.11.



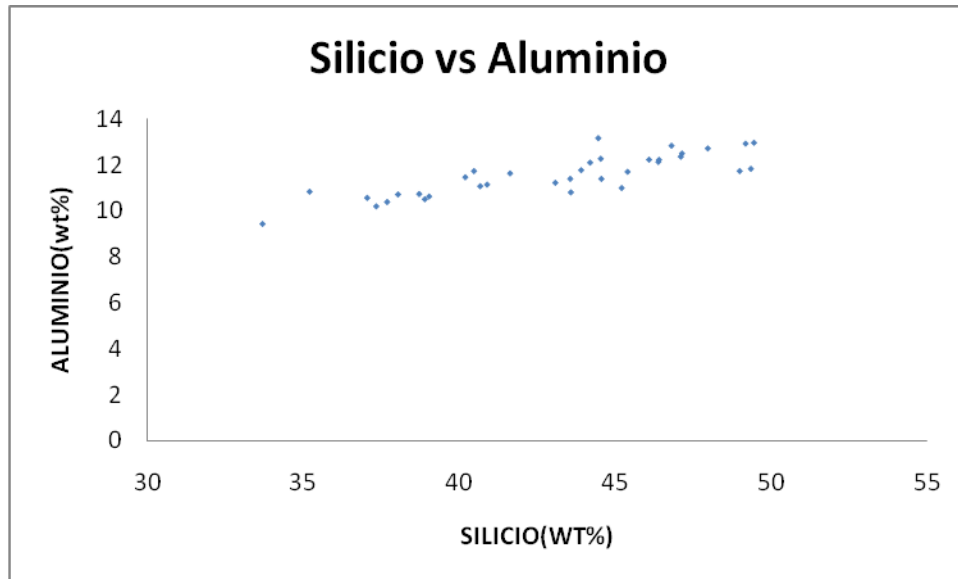
Gráfica. 4.9. Silicio vs Hierro del Pozo Yaxcopoil-1.

Las mediciones de hierro se encuentran entre 4 y 6 [wt%] aproximadamente mientras los valores de silicio oscilan entre el 35 y 50 [wt%]. La tendencia es de un comportamiento ascendente.



Gráfica. 4.10. Silicio vs Titanio del Pozo Yaxcopoil-1.

En la grafica 4.10 los valores de titanio están alrededor de 0.4 a 0.6 [wt%] mientras que los de silicio se encuentran del orden de 34 a 50 [wt%]. La tendencia es creciente.



Gráfica. 4.11. Silicio vs Aluminio del Pozo Yaxcopoil-1.

En la Gráfica 4.11 los valores de contenidos de aluminio fluctúan de 9 a 13 [wt%], mientras que los de silicio están entre 34 y 50 [wt%]. Los valores se presentan en forma ascendente, mostrando una tendencia con correlación positiva.

Los contenidos de Hierro, Titanio y Aluminio tienden a incrementarse con el contenido de Sílice. Estos elementos provienen de la mezcla de materiales de roca fundida y fragmentos de rocas ígneas del basamento, incorporadas en las brechas.

**Resultados del Análisis Químico del Pozo Tekax.**

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados del análisis químico en el pozo Tekax los elementos medidos son Calcio, Azufre, Titanio, Manganeso, Cromo, Hierro, Estroncio, Zirconio, Bal (Resto de elementos no separados específicamente en el análisis geoquímico). Los datos marcados con LOD indican concentraciones debajo del límite de detección instrumental.

Tabla. 4.5. Mediciones del Análisis Químico del Pozo Tekax.

Profundidad (m)	Fe (wt%)	Mn (wt%)	Cr (wt%)	Ti (wt%)	Ca (wt%)	K (wt%)	S (wt%)	Bal (wt%)
314.12	1.156	0.021	0.007	0.109	19.706	0.741	16.516	61.635
314.23	1.239	0.031	0.008	0.117	19.048	0.717	13.595	65.135
314.27	0.058	< LOD	< LOD	0.014	22.874	< LOD	35.695	41.223
314.34	1.133	< LOD	0.005	0.091	19.261	0.494	17.309	61.582
314.475	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD				< LOD
314.56	1.168	< LOD	0.009	0.118	19.403	0.556	18.223	60.318
314.69	1.455	0.032	0.012	0.139	13.882	0.82	11.001	72.566
314.83	1.275	< LOD	< LOD	0.101	18.382	0.477	14.779	64.859
314.935	2.124	0.027	< LOD	0.226	12.249	0.912	7.896	76.461
315.105	1.397	0.031	0.007	0.099	18.28	0.548	10.827	68.689
315.155	1.277	0.024	0.006	0.127	19.678	0.688	15.857	62.25
315.315	1.696	0.024	0.006	0.172	16.831	0.741	21.426	58.986
315.425	0.914	< LOD	0.006	0.082	19.962	0.475	18.71	59.724
315.545	1.08	< LOD	0.006	0.096	20.295	0.49	17.855	60.046
315.655	2.624	0.022	0.012	0.302	11.638	1.437	9.372	74.502
315.765	1.642	0.053	0.007	0.133	8.539	1.243	3.679	84.649
315.905	0.76	< LOD	< LOD	0.083	22.822	0.55	19.281	56.366
316.015	1.392	0.029	0.009	0.134	19.618	0.545	9.116	69.017
316.07	1.305	< LOD	0.01	0.118	19.064	0.624	9.07	69.652
316.125	2.359	< LOD	0.008	0.239	10.903	1.037	5.542	79.823
316.225	1.059	< LOD	0.007	0.074	20.086	0.492	14.981	63.144
316.335	1.448	< LOD	0.008	0.111	16.998	0.725	12.357	68.224
316.435	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD				< LOD
316.58	1.632	< LOD	0.008	0.147	16.543	0.71	12.494	68.305
316.69	1.391	0.03	0.008	0.162	19.17	0.704	13.638	64.768

Profundidad (m)	Fe (wt%)	Mn (wt%)	Cr (wt%)	Ti (wt%)	Ca (wt%)	K (wt%)	S (wt%)	Bal (wt%)
316.79	0.143	0.156	< LOD	< LOD	36.484	0.167	< LOD	61.833
316.895	1.942	0.025	0.007	0.231	14.315	1.139	6.301	75.946
317.005	0.776	< LOD	0.006	0.083	22.922	0.494	23.991	51.601
317.045	1.139	0.059	0.008	0.089	20.738	0.728	5.392	71.728
317.11	4.01	0.029	0.018	0.294	2.838	1.952	1.781	89.027
317.19	1.971	< LOD	0.008	0.187	15.862	0.7	10.522	70.635
317.315	0.908	< LOD	0.007	0.052	19.871	0.478	10.982	67.596
317.425	0.943	0.027	0.006	0.095	19.021	0.658	14.731	64.405
317.535	1.426	< LOD	0.008	0.139	15.276	0.65	10.181	72.204
317.66	0.884	< LOD	0.006	0.07	20.504	0.377	18.481	59.545
317.765	0.611	< LOD	< LOD	0.063	22.343	0.36	30.316	46.193
317.875	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD				< LOD
317.965	1.76	0.022	0.008	0.157	16.783	0.671	11.893	68.59
318.13	1.276	< LOD	0.005	0.102	19.075	0.406	14.295	64.703
318.205	2.065	< LOD	0.011	0.171	12.42	0.794	9.657	74.788
318.335	1.533	0.02	0.007	0.207	14.085	1.303	5.453	77.291
318.445	2.004	< LOD	0.008	0.196	11.424	1.276	6.642	78.332
318.555	1.766	< LOD	0.008	0.193	16.419	0.998	10.186	70.319
318.655	0.967	< LOD	0.007	0.079	18.749	0.35	6.119	73.656
318.765	0.675	< LOD	0.005	0.061	22.424	0.349	24.543	51.823
318.9	1.545	< LOD	0.008	0.178	15.289	0.659	8.675	73.507
319.01	1.444	< LOD	0.007	0.148	18.105	0.623	12.72	66.805
319.12	1.796	0.03	0.009	0.184	17.842	0.887	11.509	67.62
319.23	1.715	< LOD	0.006	0.152	16.649	0.357	21.584	59.407
319.33	1.469	< LOD	0.007	0.137	15.984	0.538	13.303	68.446
319.44	0.941	< LOD	0.006	0.074	21.154	0.453	23.506	53.725
319.535	3.076	< LOD	0.008	0.226	7.174	1.025	9.074	79.36
319.625	1.361	< LOD	0.007	0.139	18.527	0.702	17.658	61.488
319.665	2.938	< LOD	0.01	0.253	11.17	0.875	8.181	76.456
319.775	3.022	< LOD	0.009	0.382	1.781	3.766	1.211	89.733
319.865	1.148	< LOD	0.006	0.096	22.436	0.404	10.889	64.902
319.915	1.658	< LOD	0.006	0.138	16.368	0.63	9.65	71.44
320.02	6.258	0.069	0.014	1.08	4.785	1.817	2.025	83.824
323.03	0.954	< LOD	0.007	0.09	22.436	0.327	23.258	52.796
322.92	1.726	< LOD	0.009	0.175	14.778	0.669	8.932	73.621
322.81	0.599	0.026	0.007	0.044	16.17	0.198	17.229	65.59
322.71	0.629	0.026	0.006	0.061	21.406	0.289	14.437	63.007
322.62	0.543	< LOD	0.008	0.055	12.443	0.262	22.033	64.531
322.5	2.203	0.031	0.007	0.244	15.015	0.565	10.467	71.373
322.38	1.271	< LOD	0.007	0.115	18.149	0.52	10.712	69.099

Profundidad (m)	Fe (wt%)	Mn (wt%)	Cr (wt%)	Ti (wt%)	Ca (wt%)	K (wt%)	S (wt%)	Bal (wt%)
322.16	1.708	< LOD	0.009	0.187	14.37	2.321	10.493	70.767
322.05	1.035	< LOD	< LOD	0.082	20.753	0.348	15.398	62.24
321.95	1.567	< LOD	0.008	0.144	16.936	0.65	19.867	60.714
321.82	0.087	< LOD	0.007	0.011	25.115	0.109	39.464	35.05
321.74	0.561	< LOD	0.007	0.039	23.913	0.299	17.455	57.565
321.63	0.229	< LOD	0.008	0.031	24.715	0.172	35.494	39.218
321.525	2.812	< LOD	0.012	0.252	11.176	0.752	9.625	75.249
321.435	0.887	< LOD	0.005	0.058	17.178	0.324	18.2	63.197
321.31	1.118	< LOD	0.007	0.106	19.069	0.422	14.66	64.479
321.185	0.066	< LOD	0.01	0.011	25.211	0.106	39.484	34.985
321.105	0.709	< LOD	0.009	0.111	20.708	0.353	17.198	60.766
321.035	1.253	0.028	0.008	0.134	16.283	0.545	12.547	69.099
320.965	0.052	< LOD	0.006	0.013	25.558	< LOD	39.518	34.71
320.905	1.025	0.028	0.008	0.119	20.485	0.699	17.605	59.913
320.82	0.724	< LOD	0.009	0.078	16.843	0.373	17.69	64.151
320.78	2.397	< LOD	0.01	0.172	10.961	0.496	14.862	70.984
320.73	0.689	< LOD	0.005	0.055	22.12	0.38	15.252	61.354
320.67	3.435	0.072	0.009	0.246	10.07	1.263	5.365	79.448
320.63	1.51	< LOD	0.014	0.34	5.638	0.297	1.784	89.69
320.54	1.308	< LOD	0.008	0.118	17.944	0.427	15.972	64.072
320.45	2.891	< LOD	0.006	0.203	5.949	0.515	6.9	83.433
320.39	1.101	< LOD	0.011	0.075	19.427	0.392	14.257	64.614
320.325	1.873	< LOD	0.008	0.171	17.228	0.539	11.716	68.348
320.205	0.844	< LOD	0.006	0.068	18.503	0.401	16.656	63.421
320.17	2.034	< LOD	0.007	0.132	9.879	1.037	21.342	65.473
320.13	2.935	< LOD	0.015	0.197	7.581	1.969	15.772	71.432
320.07	0.194	< LOD	0.007	0.015	25.801	0.132	37.927	35.82
320.04	1.075	< LOD	< LOD	0.081	19.569	0.413	15.976	62.753
323.01	0.326	< LOD	0.007	0.028	24.683	0.174	30.656	44.002
323.115	1.205	< LOD	0.007	0.098	18.754	0.361	15.2	64.245
323.165	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD				99.16
323.22	0.97	0.028	< LOD	0.102	21.361	0.366	18.44	58.6
323.27	3.172	< LOD	< LOD	< LOD				84.049
323.355	0.855	< LOD	0.007	0.062	20.667	0.243	13.865	64.138
323.425	0.793	< LOD	0.008	0.088	22.431	0.394	28.454	47.698
323.49	3.175	0.025	0.02	0.304	10.002	1.193	7.565	77.581
323.545	2.376	< LOD	0.006	0.181	16.798	0.573	15.543	64.402
323.575	1.384	< LOD	0.012	0.201	13.527	0.739	8.033	75.97
323.695	0.664	< LOD	0.006	0.041	21.875	0.272	25.378	51.636

Profundidad (m)	Fe (wt%)	Mn (wt%)	Cr (wt%)	Ti (wt%)	Ca (wt%)	K (wt%)	S (wt%)	Bal (wt%)
323.745	1.209	0.025	0.009	0.125	18.307	0.579	10.767	68.839
323.835	4.146	< LOD	0.008	0.312	3.065	1.311	3.713	87.36
323.905	1.39	< LOD	0.008	0.135	18.623	0.598	22.515	56.615
323.955	0.983	< LOD	0.008	0.065	18.872	0.285	20.58	59.052
324.015	4.375	< LOD	0.007	0.183	2.907	0.58	3.572	88.309
324.06	2.69	< LOD	0.011	0.258	2.959	1.193	2.875	89.948

### Discusión sobre los análisis geoquímicos del pozo Tekax.

Un análisis químico en la formación está directamente relacionado con los siguientes puntos los cuales nos permite caracterizar la secuencia carbonatada.

- 1) Composición química y mineralógica de las calizas y dolomías.
- 2) Registros de pozos que se emplean para identificar la litología.

#### 1) Composición química y mineralógica de las calizas y dolomías.

Las calizas son rocas carbonatadas, compuestas por lo general de calcita; aunque la dolomita puede, a veces, ser un constituyente importante. El carbonato de calcio en la gran mayoría de los casos se ha extraído del agua del mar por agencia de organismos diminutos y luego depositado en capas que finalmente se consolidan en rocas. Estas rocas son, por general, de estructura de grano fino y uniforme y algunas veces bastantes densas. Algunas calizas son casi calcita pura, mientras que otras contienen materiales parecidos a la arcilla y varios óxidos, como impurezas.

Su composición química consta de cristales romboédricos, escalenoédricos y prismáticos, a veces combinaciones de estas; normalmente concrecionada estalactita, psolífica, fibrosas y laminares; frecuentemente maclas y variadas.

CaO 56%, Co<sub>2</sub> 44%. El manganeso y el hierro pueden sustituir al calcio, y una serie isomorfa completa se extiende hasta la rodocrosita, mientras que sólo es parcial hasta la siderita. El magnesio sustituye al calcio en pequeñas cantidades. Cuando mucho manganeso está presente la tendencia es la forma dolomítica, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Las calizas ya consolidadas son poco resistentes a los esfuerzos de tensión y cizalladura, muchas veces por ligeras deformaciones estructurales se forman grietas verticales, esto facilita la movilización de los fluidos como aguas meteóricas; estos movimientos producen un agrandamiento de las fisuras, desarrollo de los poros y aún de cavernas de clase muy irregular no siendo uniforme a lo largo del yacimiento.

Composición química de las dolomías.

Roca sedimentaria de carbonato de calcio y magnésico (dolomita), generalmente de origen químico. Con frecuencia contienen restos de fósiles y a veces con oolitos. En función del tamaño de los cristales se define la esparita (mayor de 5 micras) y micrita (menor de 5 micras).



Su composición química contiene 30.41% de CaO, 21.86% y el 47.73% de CO<sub>2</sub>.

Se forman en cuencas sedimentarias marinas y continentales por metabolismo magnésico de calizas de origen hidrotermal.

La composición química y mineralógica tiene relación directa con los ambientes de depósito, procesos de diagénesis y de alteración. Los cuales han sido descritos en la parte de densidad del pozo Yaxcopoil-1.

2) Registros de pozos que se emplean para identificar la litología.

Los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidos espontáneamente por algunos elementos radiactivos. Es por lo tanto útil en la detección y evaluación de minerales como Potasio (K) y Uranio (U).

En formaciones sedimentarias, que se caracterizan porque sus estratos se han formado por el traslado de material a la superficie formando una capa encima de la otra refleja el contenido de lutita, esto se debe a que los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas.

Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad, a menos que contaminantes radioactivos como cenizas volcánicas o residuos de granito estén presentes o que las aguas de formación contengan sales radioactivas disueltas.

Los registros de rayos gamma son frecuentemente usados como sustitutos del registro de potencial espontáneo (SP) en los pozos entubados, donde es imposible

obtener un SP, ó en pozos abiertos cuando el SP no es satisfactorio. En ambos casos es útil en la ubicación de capas no arcillosas y para correlaciones.

En formaciones sedimentarias se encuentran normalmente Potasio (K) en las arcillas o lutitas, lo que se hace más fácil la evaluación ya que el K sólo emite radiación gamma en un solo nivel energético de 1.44 eV.

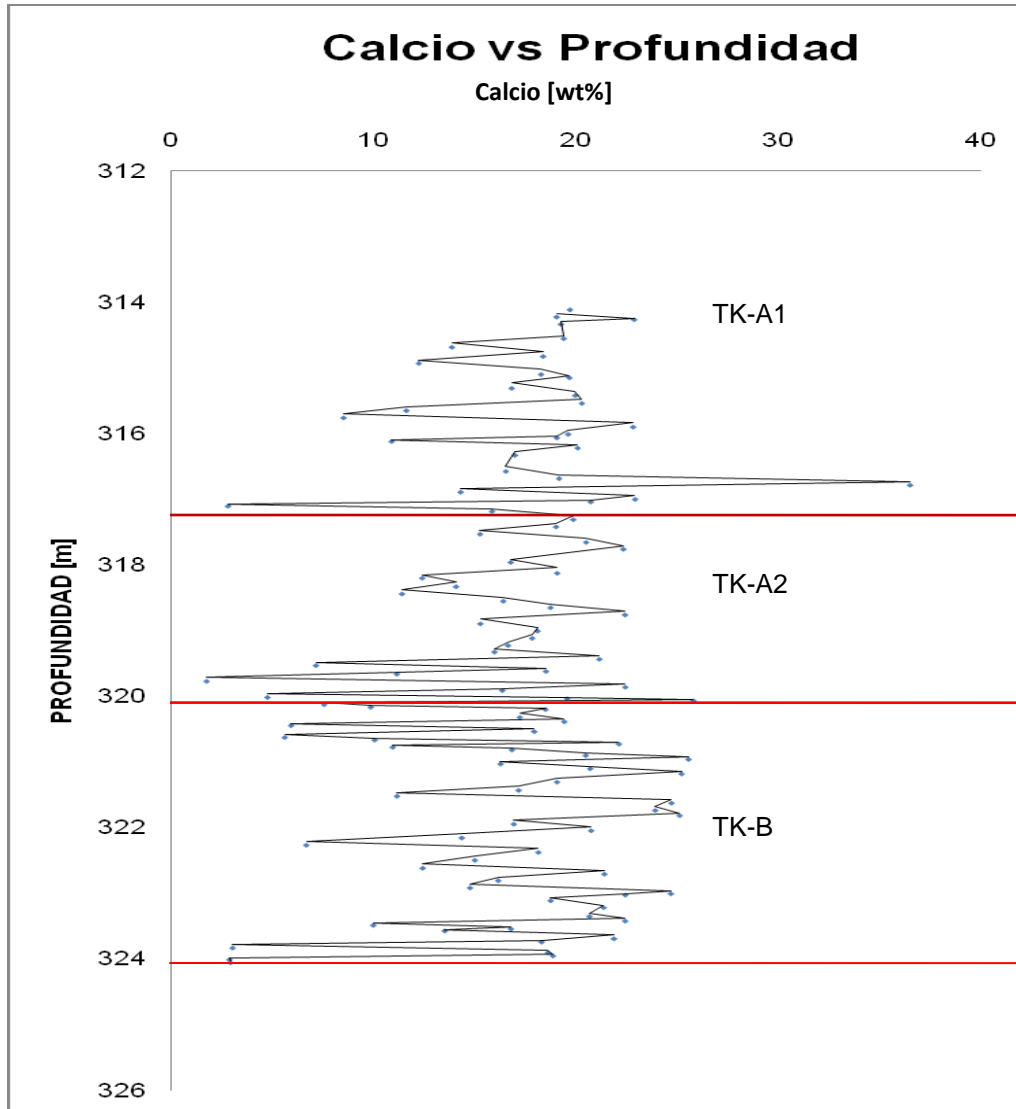
Registro Sónico.

El registro sónico mide la velocidad del sonido a través de las formaciones. La herramienta consiste de un transmisor y dos receptores. El transmisor emite ondas de sonido que viajan hacia la formación y retornan a los receptores. La velocidad de la formación (tiempo de transito) es determinada por la diferencia en los tiempos de arribo a los dos receptores.

El tiempo de tránsito es dependiente de varios parámetros como la litología, la densidad del medio a través del cual el sonido viaja y de la porosidad. Ya que en formaciones más densas o consolidadas, el tiempo de transito es menor y un incremento en el tiempo de transito indica un incremento en la porosidad.

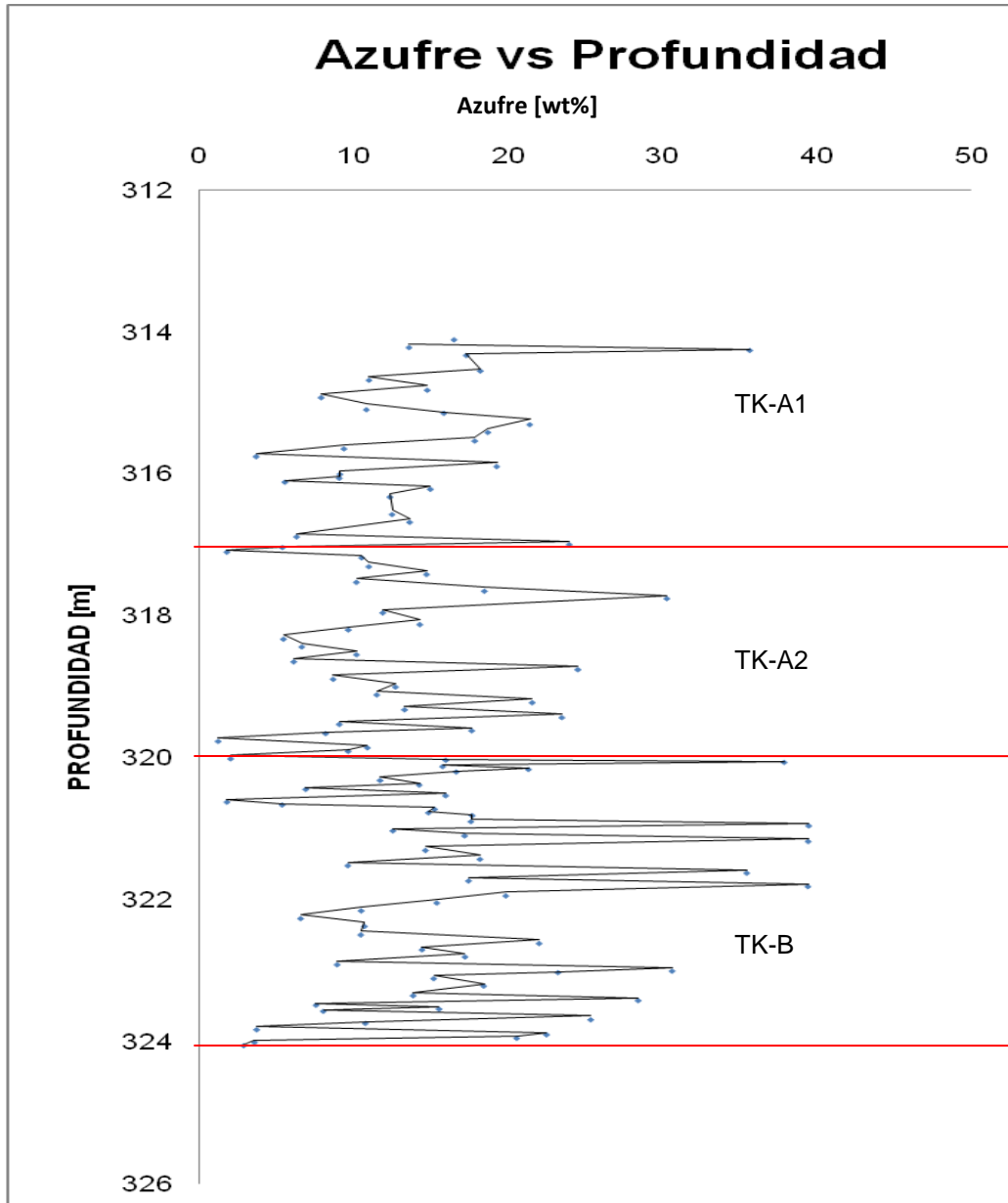
El registro sónico puede ayuda a determinar la porosidad, tipo de roca y identificar el límite de capas.

La porosidad de las rocas puede obtenerse a partir del registro sónico, el registro de densidad o el registro de neutrones. Todas estas herramientas ven afectada su respuesta por la porosidad los fluidos y matriz de formación.



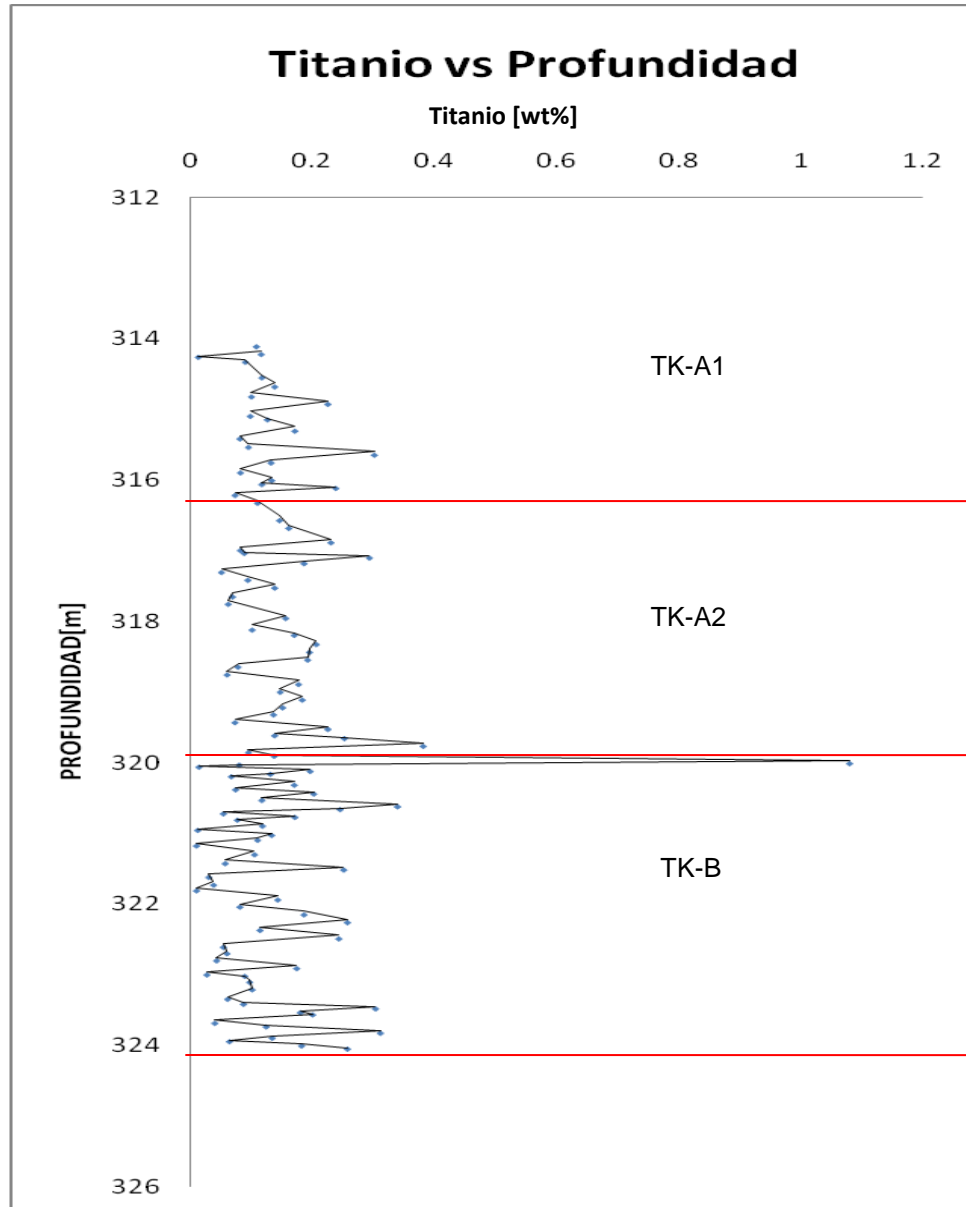
Gráfica. 4.12. Registro Calcio vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de Calcio varían entre 10 y 20%, con un rango amplio entre 2 y 35% (véase Gráfica 4.12). Las variaciones relativas definen dos zonas dentro del intervalo estudiado, marcadas por los patrones de variabilidad, entre los 314 y 319 [m], con menor variación y entre los 319.5 y 324 [m], con mayores fluctuaciones.



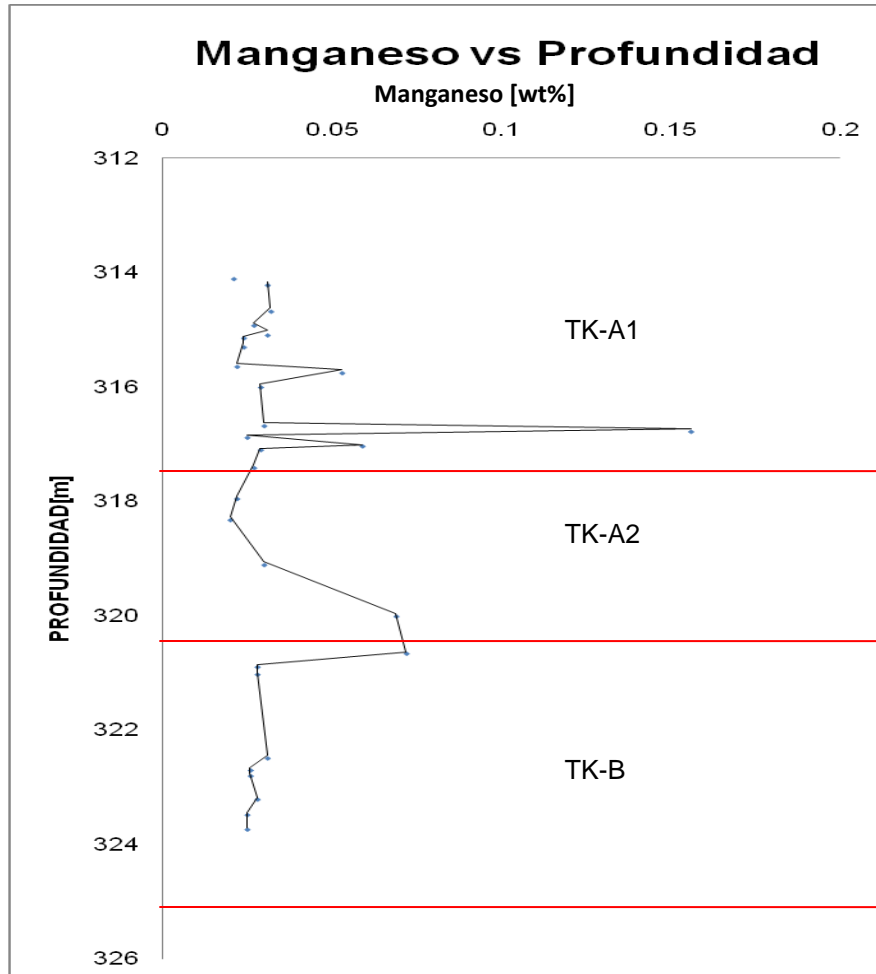
Gráfica. 4.13. Registro Azufre vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de azufre varían entre 2 y 40%, con un rango amplio entre 2 y 35 % (Véase Gráfica 4.13). Las variaciones relativas definen dos zonas dentro del intervalo estudiado, marcadas por los patrones de variabilidad, entre 315 y 319 [m], con menor variación entre 320 y 322 [m], con mayores fluctuaciones.



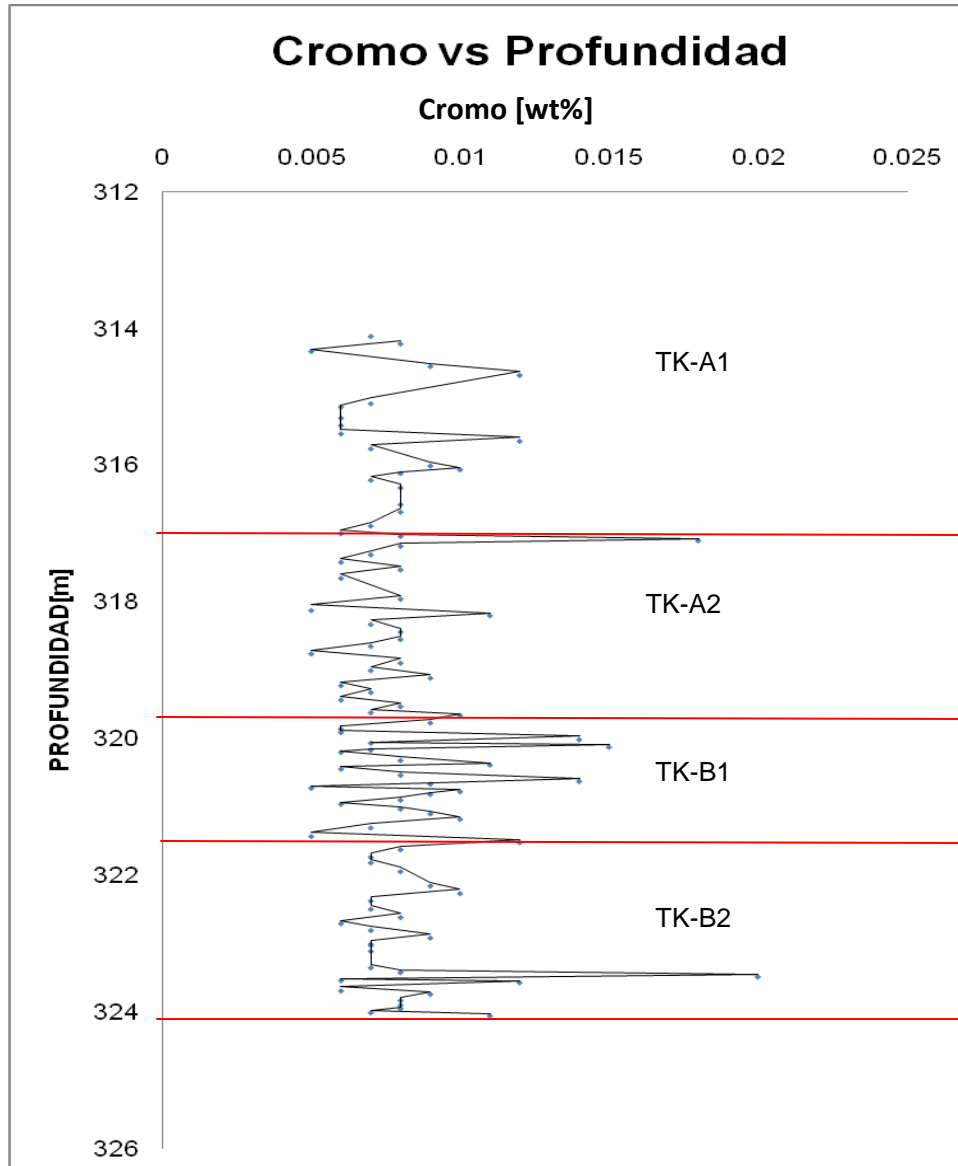
Gráfica. 4.14. Registro Titanio vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de titanio en la secuencia varían entre 0.1 y 1.1% con un rango amplio de 0.1-0.4% (Véase Gráfica 4.14).



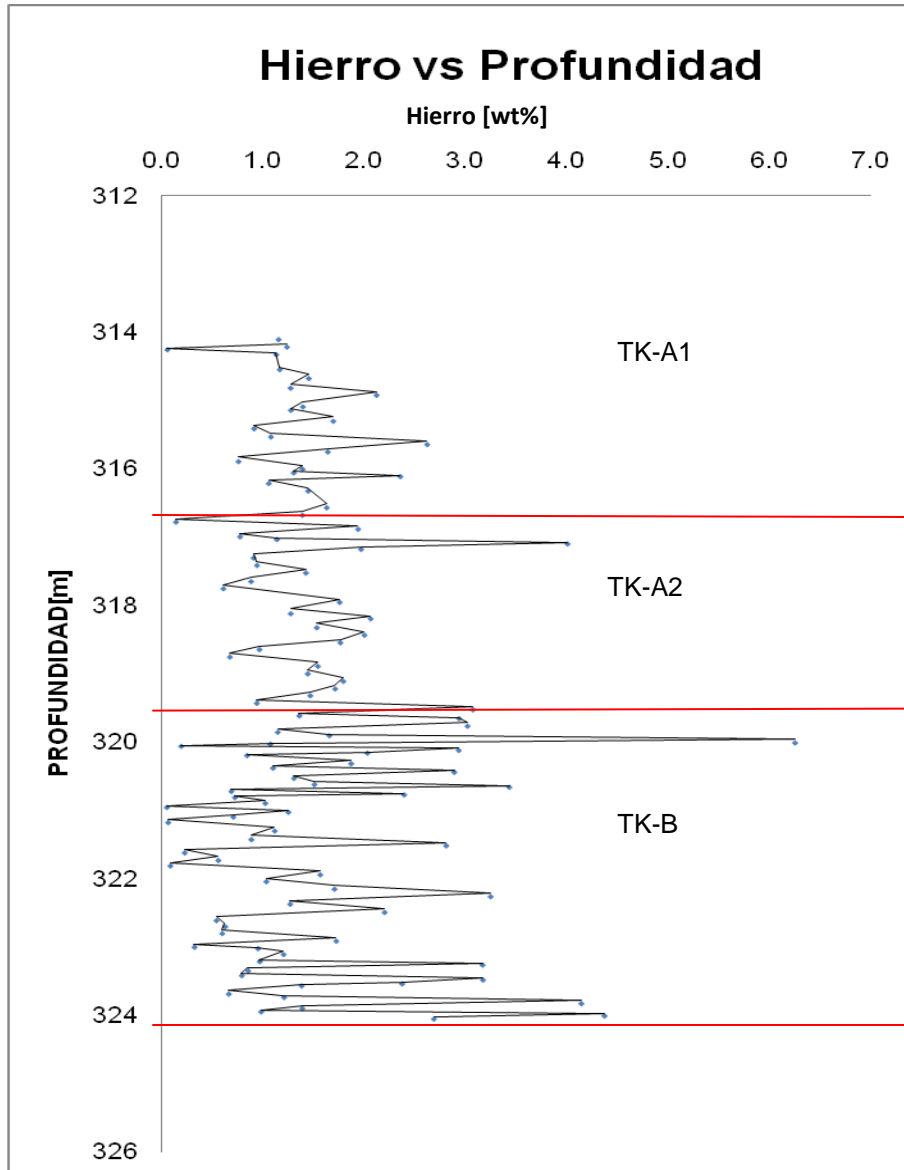
Gráfica. 4.15. Registro Manganeseo vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de manganeso son relativamente bajos, con contenidos variando entre 0.03 y 0.16% (véase Gráfica 4.15). La mayor concentración de manganeso son del orden de 0.03-0.05%, con una ligera fluctuación entre los 316.5 y 317 [m]. El registro de variación de manganeso muestra valores con menor fluctuación que otros elementos siguiendo con un aporte relativamente constante en la sección.



Gráfica. 4.16. Registro Cromo vs Profundidad del Pozo Tekax.

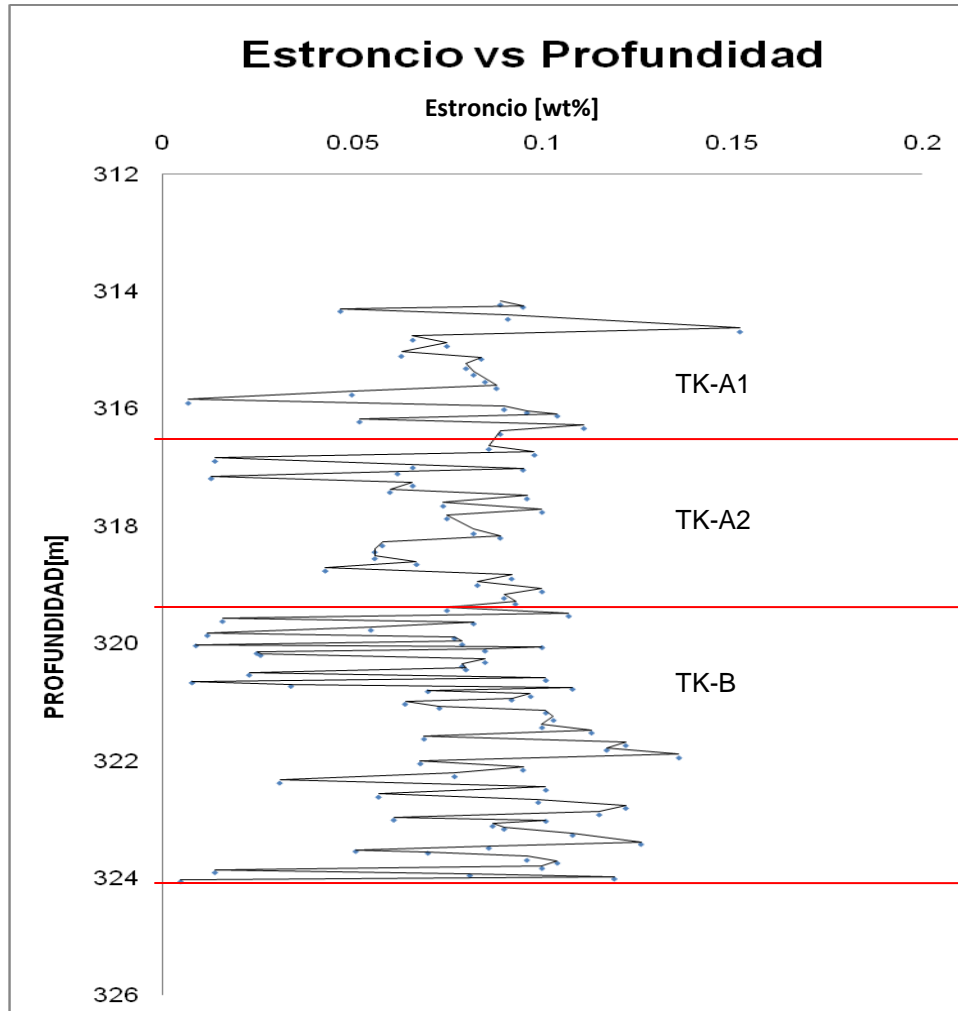
Los contenidos de cromo en la secuencia son relativamente bajos, variando entre 0.004 y 0.012%, la mayor concentración de cromo están alrededor de un 0.004-0.012% (Véase Gráfica 4.16). Existen dos variaciones a 317 y 323 [m], con mayores fluctuaciones.



Gráfica. 4.17. Registro Hierro vs Profundidad del Pozo Tekax.

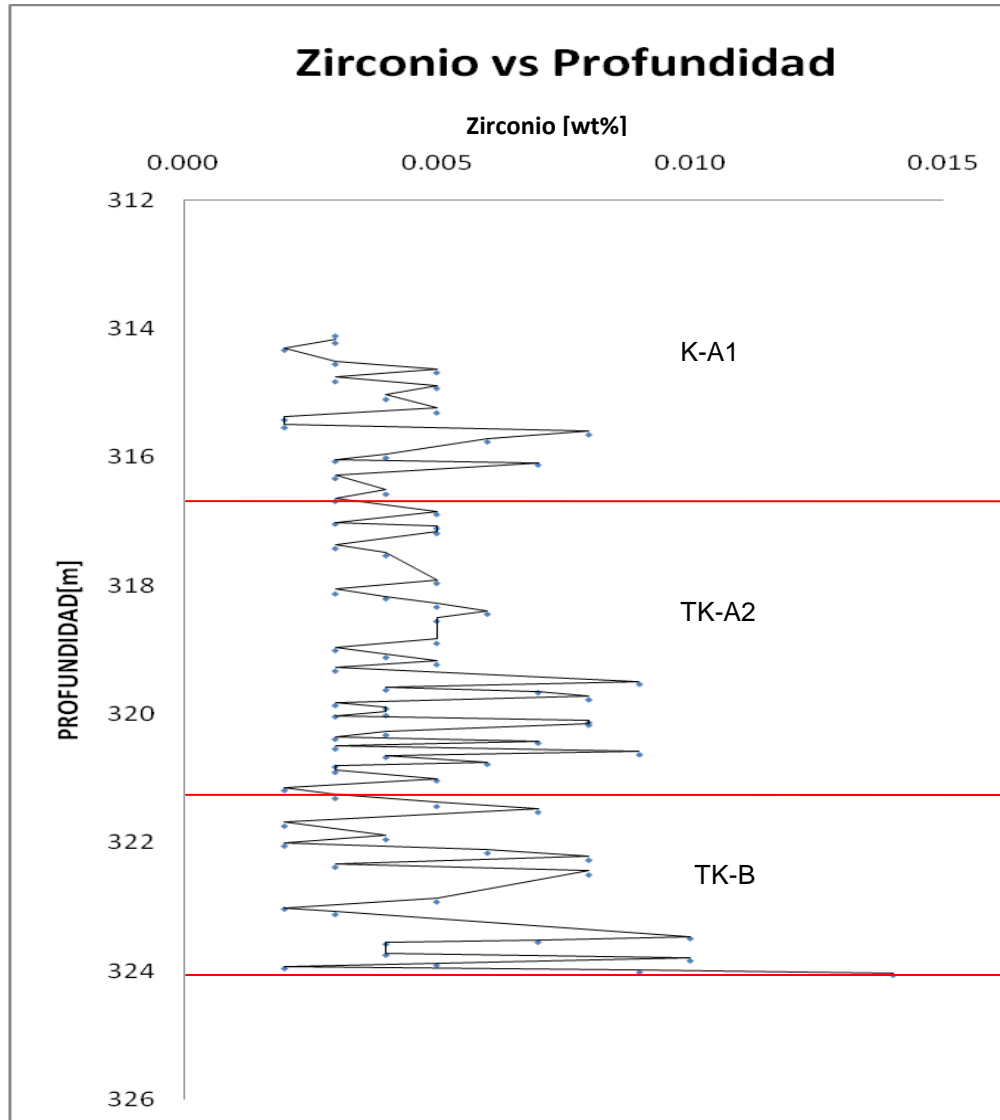
Los contenidos de hierro varían entre 0.1 y 6.0%, con un rango amplio entre 0.1 y 2.5% (Véase Gráfica 4.17). Las variaciones relativas definen dos zonas dentro del intervalo estudiado, marcadas con patrones de variabilidad, entre los 316.5 y 317 [m], con menor variación y entre los 319.5 y 320.5 [m] con mayores fluctuaciones.





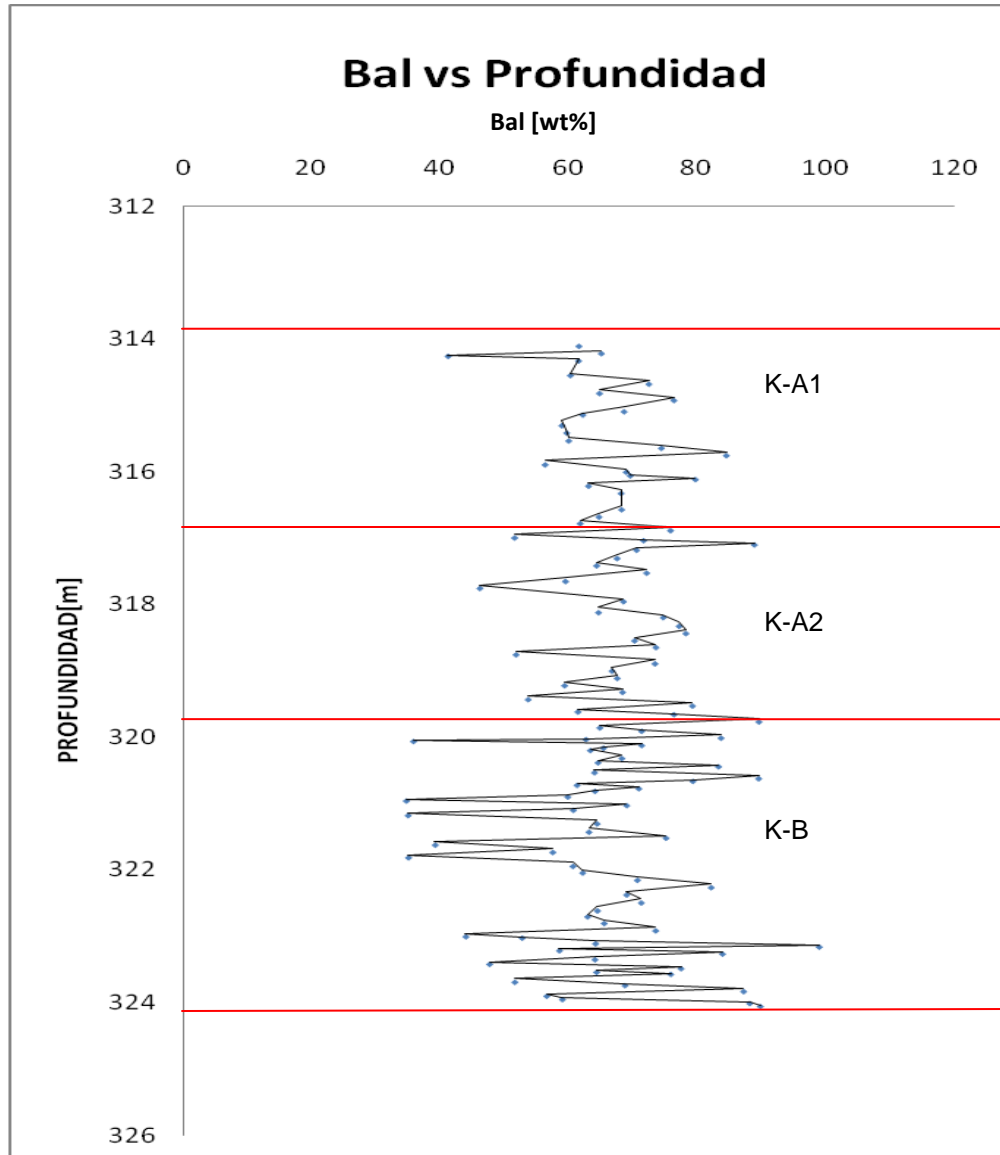
Gráfica. 4.18. Registro Estroncio vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de estroncio en la secuencia varían entre 0.1-0.15%, con un rango amplio de estroncio del orden de 0.05-0.5% (Véase Gráfica 4.18). Con una variación en el intervalo estudiado, marcado por un patrón de variabilidad entre 3.19 y 3.21 [m]. Las concentraciones de estroncio varían a lo largo de la sección con algunos intervalos mostrando mayores rangos. Las concentraciones de Estroncio se relacionan con los parámetros climáticos y se asocian al agua de mar y su incorporación en los carbonatos biogénicos.



Gráfica. 4.19. Registro Zirconio vs Profundidad del Pozo Tekax.

Los contenidos de zirconio varían entre 0.002-0.014%, con un rango amplio entre 0.03 y 0.09% (Véase Gráfica 4.19). Con una notable variación entre 323.9 - 324.1 [m] donde se nota una mayor fluctuación. En el registro se observan intervalos con rangos mayores de variación, definiendo paquetes de carbonatos con mayores concentraciones.



Los contenidos del resto de elementos no separados en el análisis químico varían entre 30 y 97%, con un rango amplio entre 45 y 85% (véase Gráfica 4.20). Estos valores representan los porcentajes de elementos no determinados en los análisis químicos por fluorescencia de rayos-X. Los elementos trazas en su mayoría están bajo el nivel de detección del equipo de registro (Tabla 4.5). En el caso de los

óxidos mayores el equipo empleado requiere de calibraciones adicionales y estándares adicionales para la cuantificación de elementos adicionales. Cabe mencionar que el equipo aporta datos de composición química que amplían los datos proporcionados en los registros Gama de Potasio Uranio y Torio.

### **Discusión Sobre los Análisis en el Pozo Tekax.**

La incorporación de programas de recuperación continua de núcleos, en los casos analizados del Pozo Tekax y del Pozo Yaxcopoil-1 permite empleo de métodos de registro de alta resolución espacial. Las mediciones de propiedades físicas y químicas en los núcleos de pozo proveen datos para una caracterización detallada de las formaciones, en forma complementaria a los datos de los registros geofísicos. Los datos de densidad han sido empleados para caracterizar secuencias carbonatadas y estudiar contenidos relativos de carbonatos y terrígenos, fracturamiento y relleno de vetillas y procesos de dolomitización. Como se menciona en la introducción, los datos geoquímicos han sido menos utilizados, principalmente debido a las dificultades técnicas de determinación. Los registros geofísicos han estado limitados a los registros gamma, con mediciones de uranio, torio y potasio; los cuales por otro lado aportan información sobre las litologías y correlación lateral entre pozos. En la caracterización de los núcleos, los análisis geoquímicos se amplían para mediciones directas en los núcleos de otros elementos, proporcionando información más completa y detallada sobre los cambios litológicos y la caracterización de las formaciones.

Las gráficas de composición química en función de la profundidad proporcionan información complementaria a los registros de pozo. Los registros geoquímicos permiten una caracterización de las unidades en la columna, relacionadas a cambios litológicos. Los registros combinados aportan datos adicionales para correlaciones laterales y para caracterizar la secuencia.

Con el objetivo de analizar las variaciones en composición e investigar sobre procesos de alteración o diagénesis, se construyeron gráficas de correlación entre elementos. Para los análisis se usa el calcio para investigar las distribuciones y tendencias de los otros elementos analizados. En varios casos es posible observar la ocurrencia de tendencias lineales entre los elementos. Por ejemplo, en el caso de la variación de estroncio, que tiende a incrementarse con los contenidos de calcio. Esta tendencia lineal puede estar relacionada a aporte de agua marina en el depósito de carbonatos. La producción de carbonatos en las capas de aguas superficiales y el depósito de estos carbonatos en los sedimentos de fondo determina las cantidades de carbonato que llegan al fondo marino. Las características de los carbonatos se reflejan en la composición química del agua marina y las condiciones de temperatura y salinidad en la columna de agua. En términos generales, la columna de agua está sobresaturada en carbonato de calcio. Los procesos subsecuentes de acumulación, disolución, compactación, extracción de agua de poro y diagénesis resultan en cambios de composición de los carbonatos. Los resultados de los análisis se presentan en las siguientes gráficas. Varios de los elementos asociados a terrígenos tales como titanio, hierro, zirconio, muestran correlaciones negativas con el contenido de calcio, indicando

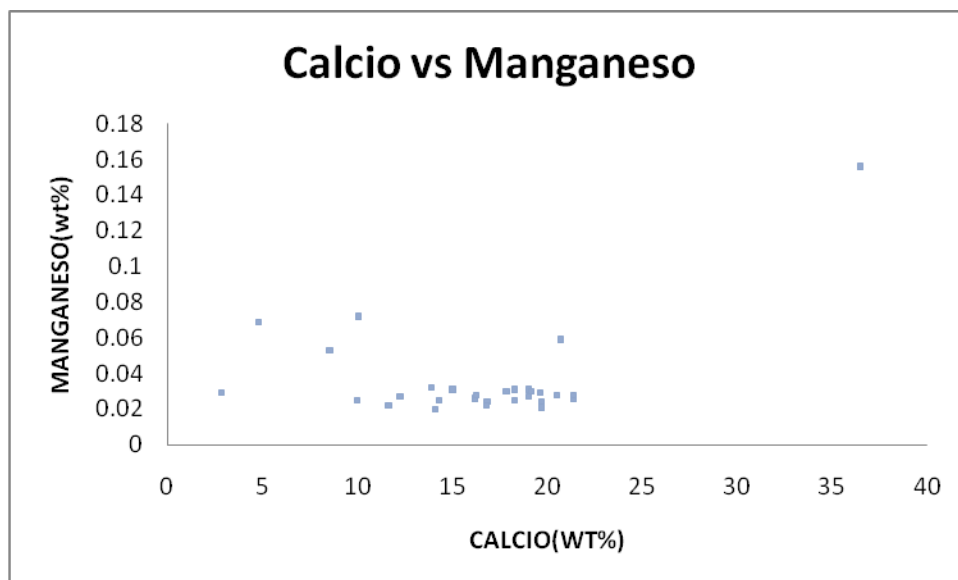
tendencias decrecientes. En el caso particular de la secuencia estudiada en el pozo Tekax, las variaciones en hierro, titanio y zirconio pueden estar asociados al aporte de material de las unidades de brecha de impacto, que son ricas en estos elementos. Los elementos asociados a agua marina, tales como el estroncio indican correlaciones positivas, mostrando tendencias lineales incrementando con el contenido de calcio.

Los registros de composición química en función de la profundidad indican, para algunos elementos, relativa poca variación, sugiriendo aporte estable o efectos de diagénesis en los sedimentos durante la compactación y entierro. Los registros que muestran mayor variación en función de la profundidad sugieren cambios en la posición relativa de los sedimentos carbonatados en su producción, con los cambios correspondientes en la composición de agua y la generación de carbonatos biogénicos.

Los registros muestran distintas variaciones de concentraciones respecto a cada elemento en función de la estratigrafía en el núcleo. Las cuales se separan informalmente como TK-A1, TK-A2, TK-B1 y TKB2, dependiendo del comportamiento de variación de los elementos.

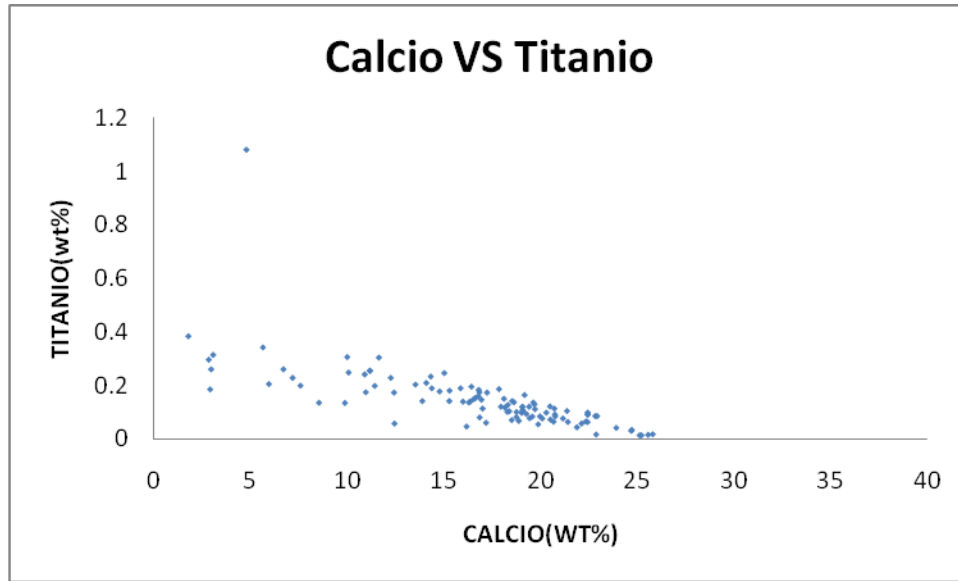
Las gráficas de variación de composición en función de la profundidad muestran que los datos geoquímicos aportan información adicional, que puede utilizarse en combinación con los registros de pozo en la caracterización de las formaciones y para correlación lateral. Los datos aportan información sobre la génesis de los carbonatos y sobre los procesos de diagénesis y alteración. Dentro de los

registros de pozo, los registros de rayos gama aportan información sobre la química de los sedimentos, pero limitada a los elementos radiactivos. En este caso, al emplearse los métodos de fluorescencia de rayos X, se tiene información detallada sobre un mayor número de elementos, permitiendo una caracterización más amplia de la composición y variaciones en la secuencia.



Gráfica. 4.21. Calcio vs Manganeso del Pozo Tekax.

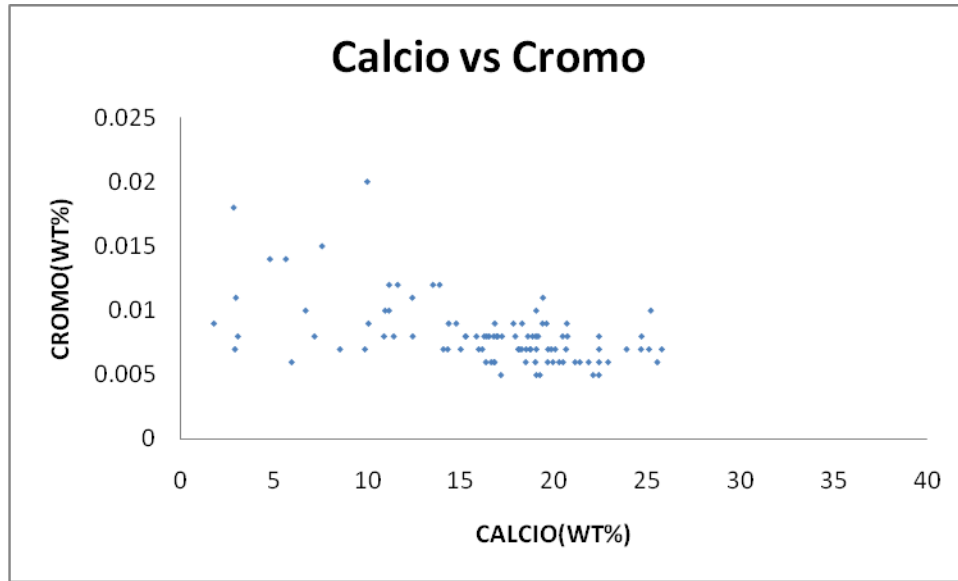
Los valores de calcio varían del 3 al 22[wt%]. La mayor concentración se encuentra entre 10 y 20 [wt%](Véase Gráfica 4.21). Los valores del manganeso oscilan entre 0.02 y 0.08 y su mayor conglomeración esta entre 0.02 y 0.04 [wt%]. La tendencia es constante en los intervalos de mayor concentración, mostrando concentraciones constantes en los óxidos de manganeso, cuyas concentraciones en la sección estudiada son bajas; estando en los elementos traza.



Gráfica 4.22. Calcio vs Titanio del Pozo Tekax.

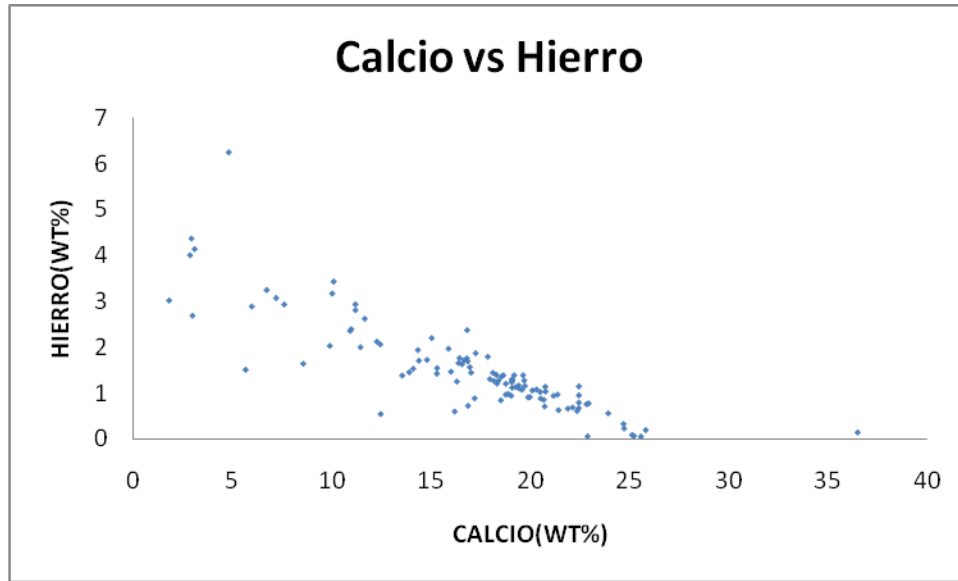
Los valores de calcio oscilan de 3 a 26 [wt%]. La mayor concentración se encuentra de 14 a 26 [wt%] (Véase Gráfica 4.22). Los valores del titanio varían del 0.1 al 0.04 [wt%]. Las mediciones tienden a decrecer por el 13 o 15 [wt%] de calcio, presentando una correlación negativa. Los óxidos de titanio provienen de la entrada de terrígenos en los carbonatos.





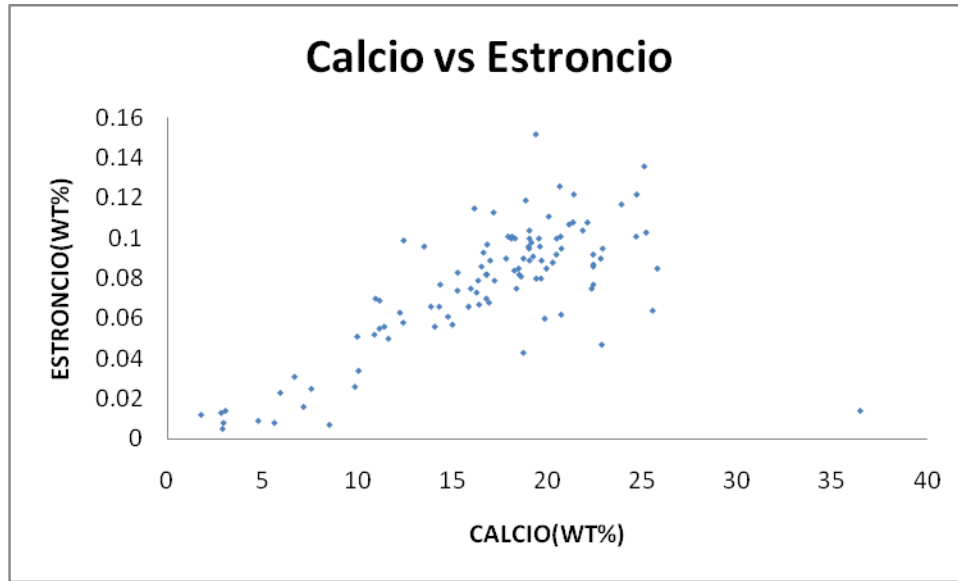
Gráfica 4.23. Calcio vs Cromo del Pozo Tekax.

En la Gráfica 4.23. Las mediciones de calcio oscilan del 2 al 26 [wt%] teniendo sus mayores concentraciones de 15 a 25 [wt%]. Los valores de cromo varían de 0.004 a 0.02 [wt%]. Los valores de cromo son dispersos de 2 a 10 [wt%] pero se vuelven constantes por arriba del 10 [wt%]. Los óxidos de cromo están asociados a material terrígeno. En la sección analizada los contenidos son bajos, del orden de 0.01%.



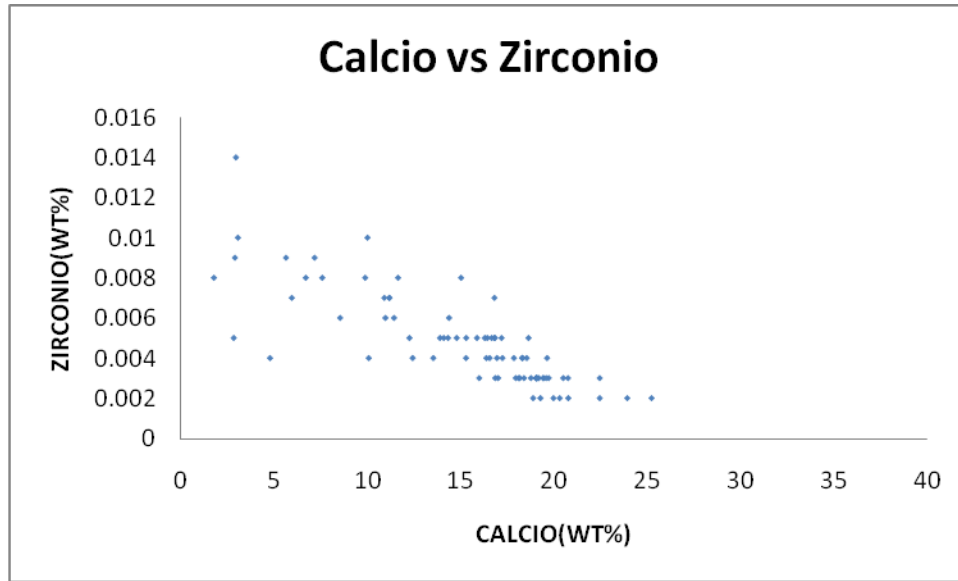
Gráfica 4.24. Calcio vs Hierro del Pozo Tekax.

En la Gráfica 4.24 los valores de calcio oscilan entre 2 y 26 [wt%] su mayor presencia se encuentra en el intervalo de 14 a 26 [wt%]. Los valores de hierro llegan hasta el 6 [wt%]. La tendencia de los valores comienza a decrecer por el valor de 10 [wt%], presentando una correlación negativa. Los óxidos de hierro están relacionados a material terrígeno o estar asociados a los carbonatos biogénicos que incorporan elementos de agua de mar.



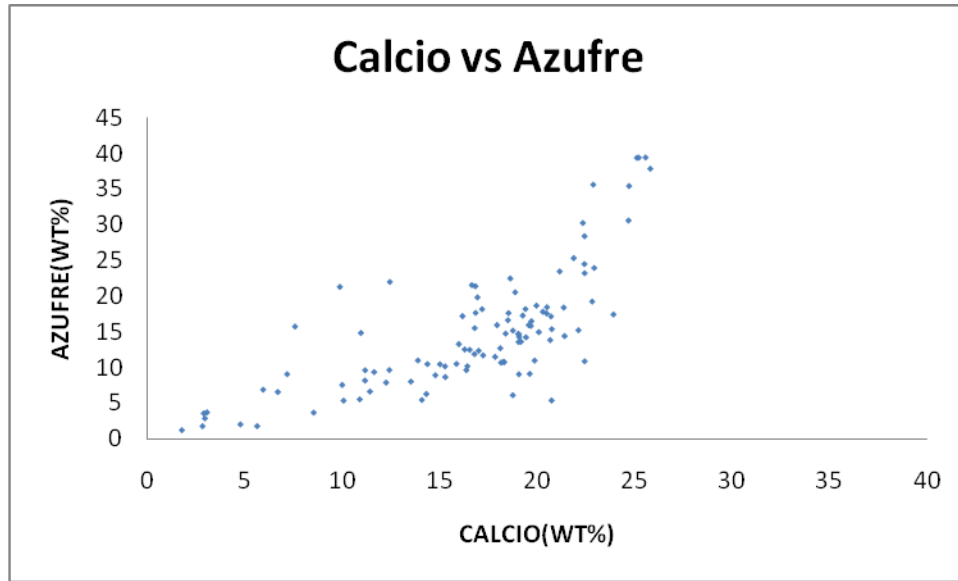
Gráfica. 4.25. Calcio vs Estroncio del Pozo Tekax.

En la Gráfica 4.25 los valores de calcio varían desde 2 hasta 26 [wt%], teniendo mayor presencia en el intervalo que va de 15 a 25[wt%]. Los valores de estroncio van de 0.01 hasta 0.16. Los valores son dispersos antes del 15 [wt%] después tienen un comportamiento ascendente hasta llegar a 14[wt%]. Los contenidos de estroncio correlacionan positivamente con el calcio. El estroncio proviene del agua de mar, incorporado en los carbonatos. Las relaciones de estroncio a su vez tienen una relación con los parámetros climáticos en particular con la temperatura superficial del mar y el nivel de compensación de carbonatos.



Gráfica.4.26. Calcio vs Zirconio del Pozo Tekax.

En la Gráfica 4.26. Los valores de calcio varían de 3 a 26 [wt%] mientras que los de zirconio se representan de 0.002 hasta 0.014. La mayor parte de los valores se encuentran dispersos en toda la grafica aun que existe una presencia mayor en el intervalo de 15 a 20 [wt%]. Los contenidos de zirconio forman parte de los elementos en concentraciones de trazas, con valores bajos menores al 0.01%. Los contenidos de zirconio muestran una correlación negativa con el contenido de carbonato de calcio.



Gráfica. 4.27. Calcio vs Azufre del Pozo Tekax.

En la Gráfica 4.27 los valores de calcio varían de 2 a 26 [wt%], la mayor presencia de calcio oscilan entre los 15 y 20 [wt%]. Los valores de azufre van de 1 a 40 [wt%]. La tendencia de la Gráfica es ascendente a partir del 10 [wt%], mostrando una correlación positiva. Los contenidos de azufre están relacionados con los sulfuros y reacciones de la materia orgánica en los sedimentos.

En la caracterización y evaluación de formaciones carbonatadas se analizan los contenidos relativos de arcillas y silicatos, empleando datos de los registros gama y de las determinaciones de muestras en laboratorio. En general, los análisis de laboratorio se hacen en un número limitado de muestras. La técnica empleada en esta tesis ofrece la posibilidad de hacer análisis más detallados y tener una documentación de los núcleos y las formaciones cortadas en el pozo.

### Capítulo 5. Conclusiones.

El estudio y evaluación de los yacimientos carbonatados constituye una de las áreas prioritarias para la industria petrolera. Alrededor del 60% de las reservas mundiales de petróleo se encuentran en secuencias de carbonatos (Ahr y colaboradores, 2005; Akbar y colaboradores, 2001). En nuestro país, los yacimientos en el sureste, incluyendo la sonda de Campeche, son yacimientos carbonatados naturalmente fracturados. En esta tesis presentamos resultados del estudio de la estructura Chicxulub, en la plataforma carbonatada de Yucatán. El estudio ha incluido un programa de perforación con recuperación continua de núcleos, que permite estudios de caracterización a partir de mediciones y observaciones en laboratorio.

Con base en el estudio sobre la evaluación y análisis de núcleos de perforación en la plataforma carbonatada de Yucatán podemos concluir lo siguiente.

- 1) La perforación es una de las herramientas principales en la industria petrolera, como parte de los programas de exploración y de explotación.
- 2) Los programas de perforación con fines exploratorios generalmente incluyen solo recuperación parcial de núcleos, debido al incremento de tiempo y costos en la perforación. Sin embargo, una alta recuperación de núcleos en un programa de perforación provee información detallada de la estratigrafía y características de las unidades litológicas. El tipo de programa de recuperación de núcleos depende de los objetivos en el proyecto.

- 3) Con los estudios realizados de exploración geofísica, geológica y perforación de pozos en la península de Yucatán se logró documentar la presencia de un cráter de grandes dimensiones conocido como el Cráter Chicxulub. Las investigaciones realizadas indican que el impacto que forma el cráter Chicxulub está asociado a los depósitos Cretácico-Terciario (K/T) y la posible causa de la extinción de los dinosaurios y otras especies a fines del Cretácico.
- 4) Los registros geofísicos de pozo, tales como los registros (Sónico y Gama) sirven como herramientas para determinar las propiedades físicas de las rocas.
- 5) En un programa de perforación, los análisis de núcleos proveen datos valiosos, que tienen relación con la industria petrolera como por ejemplo la litología, porosidad, permeabilidad, interfaces petróleo-agua, gas petróleo y saturación de fluidos.
- 6) Los estudios hechos en recortes e intervalos de núcleos con ayuda de algunos registros geofísicos entre ellos los rayos gama sirven como referencia para la caracterización litológica de la formación.
- 7) La composición química y mineralógica está directamente relacionada con la estructura, texturas predominantes y origen y tipos de las secuencias sedimentarias.

- 8) Los estudios realizados en los núcleos de los pozos Yaxcopoil.1 y Tekax aportan datos para la caracterización de propiedades petrofísicas de las formaciones. Los datos han permitido construir los registros geofísicos de densidad y geoquímica.
- 9) En este estudio, se evaluó una nueva técnica de análisis químico por fluorescencia de rayos x, empleando un detector portátil directamente en los núcleos de perforación. Esta técnica ofrece varias ventajas sobre métodos convencionales, que requieren de submuestreo y preparación de muestras, ya que son análisis no-destructivos, requieren de menos tiempo de medición y se tiene un mejor control estratigráfico de las mediciones.
- 10) El estudio geoquímico proporcionan información sobre un mayor número de elementos mayores y trazas, que el empleado convencionalmente en los registros geofísicos de rayos gama. Los resultados proveen una mejor caracterización de las formaciones y datos sobre el origen y procesos de alteración diagenética de las rocas.
- 11) Estudiar y conocer las características geomorfológicas específicas de la península de Yucatán es fundamental, las formaciones superficiales están constituidas en su mayor parte de rocas kársticas que se caracterizan por su alta permeabilidad.



- 12) El estudio de fluorescencia de rayos X realizado al Pozo Tekax proporcionó información sobre variaciones de concentraciones para cada elemento en función de la estratigrafía del núcleo, permitiendo una separación de las formaciones.

### **Bibliografía.**

Akbar Mahmood, Vissapragada Badarinadh, Primavera de 2001."Evaluación de Yacimientos Carbonatados".OilfieldRev2001.P 20-40.

Arroyo Carrasco Francisco,1985 "Apuntes de Registros Geofísicos de Pozos". División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Departamento de Geofísica. p 52-104.

Bassols, B.A. 1982. "Recursos Naturales de México". Ed. Nuestro Tiempo México.

Beddows Patricia, Blanchon Paul, Escobar Elva, Torres - Talamante Olmo, 2000 "Los Cenotes de la Península de Yucatán". Lagos y Presas de México, p.32-35.

Contreras, A Enrique , y García M Pablo."Importancia de las actividades de planificación, corte, manejo y análisis de los núcleos de perforación de pozos petroleros". Boletín IIE , julio-septiembre del 2007P 75-85.

D.Roy Eccles and Ed Murphy, March 2005 "Comparison of Field-Portable X-Ray Fluorescence Analyzer and Conventional Geochemical Analysis". EUB/AGS Geo-Note.

De la Fuente, Gaelo; Ceballos, J.A.; Terán, Benito. "Principios de Ingeniería de Yacimientos" .I.M.P.

Ellington and Associates Ing. "Well Logging and Chemostratigraphy From Cuttings and Cores". Wellbore Mineralogy.

Escobar-Sanchez .J.E., Urrutia- Fucugauchi Jaime, 2010 " Chicxulub crater post-impact hydrothermal activity-evidence from Paleocene carbonates in the Santa Elena borehole". Geofísica Internacional 49(2). p 97-106.

Facultad de Ingeniería, UNAM. "Apuntes de Ingeniería de Yacimientos".

García Avendaño Alberto, 2010 "Estudio de Núcleos de Roca del Activo Integral Cantarell de la Sonda de Campeche". Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería.

Guerrero Hernández Cirilo Joaquín, 2001"Rocas Calizas: Formación, Ciclo del Carbonato, Propiedades". Temas de Ciencia y Tecnología, Vol. 5, Número 14. P. 3-14.

Instituto de Geografía Atlas Nacional de México: Tomos I-III: México, DF., UNAM.

López Ramos Ernesto, 1953, "Distribución de la Porosidad, en las Calizas del Cretácico Medio de la Región de Tampico-Poza Rica". Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, p.31-56.

López-Ramos, E, 1973, "Estudio geológico de la Península de Yucatán: Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros", Boletín, v. 25, p. 23-76.

Michael M.Herron, 1986. "Mineralogy From Geochemical Well Logging". Schlumberger-Doll Research, Old Quarry Road, Ridgefield, Connecticut 06877.

Ortiz Alemán Carlos, Urrutia Fucugauchi Jaime, Rebolledo Vierya Mario, 2002 "Investigaciones geofísicas sobre cráteres de impacto y el cráter de Chicxulub". Cuadernos del instituto de geofísica, p.7-11.

Peña Vázquez Alonso, 2009 "Análisis de la Perforación del Pozo Yaxcopoil-1, Plataforma Carbonatada de Yucatán". Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería.

Perry, E., Marin, L., McClain J., and Velázquez, G., 1995, "Ring of cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: Its hydrologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater: Geology", v. 23, p. 17-20.

Rebolledo-Vieyra, M., J.Urrutia-Fucugauchi, L.E. Marín, A.Trejo-García.,2000, "UNAM Scientific Shallow-Drilling Program of the Chicxulub Impact Crater". International Geology Review. Vol 42, p. 928-940.

Urrutia Fucugauchi Jaime and Chavez Aguirre José María, 1 November 2008. "Impact Ejecta and Carbonate Sequence in the Eastern Sector of the Chicxulub Crater". Science Direct.

Urrutia Fucugauchi Jaime, Morgan Joanna, Stöffler Dieter and Claeys Philippe, 2004 "The Chicxulub Scientific Drilling Project". Meteoritics y Planetary Science 39, Nr 6. P 787-790.

Urrutia Fucugauchi Jaime, Trejo García Alberto, 1996 " Initial results of the UNAM scientific drilling program on the Chicxulub impact structure: rock magnetic properties of UNAM-7 Tekax borehole". Geofísica Internacional. Vol.35, Num 2, p.125-133.

Vazquez Castro Gabriel, 2010 "Algunas características geoquímicas y litológicas de fragmentos basales de la brecha del Crater Chicxulub". Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Wohlgemuth Lothar, Birtakies Eckhard, Kück Jochem, Conze Ronald and Harms Ulrich, 2004 "Integrated deep drilling, coring, downhole logging, and data management in the Chicxulub Scientific Drilling Project, Mexico". *Meteoritics y Planetary Science* 39, Nr 6. P 791-797.