



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**CARACTERIZACIÓN DE CARBONATOS EN
NÚCLEOS DE POZO EN LA PLATAFORMA DE
YUCATÁN - POZO TECOH**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

**CHRISTIAN BAUTISTA GONZÁLEZ
FRANCISCO PARANA SELVAS GONZÁLEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI**

MÉXICO D.F.

SEPTIEMBRE 2015

CONTENIDO.

RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	vi
1. Rocas Sedimentarias – Carbonatos.....	1
1.1 Rocas Sedimentarias.....	1
Distribución de las Rocas Sedimentarias.....	1
Sedimentación.....	2
Litificación.....	4
Propiedades de las Partículas Sedimentarias.....	5
1.2 Clasificación de las Rocas Sedimentarias.....	6
Rocas Sedimentarias Detríticas o Clásticas.....	6
Areniscas.....	8
Rocas Sedimentarias no Detríticas.....	9
Rocas Sedimentarias Químicas.....	9
Rocas Sedimentarias Orgánicas (Organógenas).....	10
1.3 Yacimientos Carbonatados (Calizas y Dolomías).....	12
Clasificación de Rocas Carbonatadas.....	13
Orígenes del Material Intergranular.....	13
Diagénesis en Rocas Carbonatadas.....	18
Micritización.....	19
Compactación.....	19
Disolución.....	21
Recristalización.....	21
Dolomitización.....	22
Clasificación de Folk (Composicional).....	23
Clasificación de Dunham (Textural).....	25
1.4 Plataforma Carbonatada de Yucatán.....	28
Pozo Tecoh.....	30
2. Registros Geofísicos.	32

2.1 Definición, Uso y Ventajas de su Aplicación.....	32
2.2 Clasificación de Registros Geofísicos.....	34
Clasificación de Registros Geofísicos de Pozos con Respecto al Principio Físico de la Herramienta.....	34
Tipos de Registros de Resistividad.....	35
Registros Acústicos.....	36
Registros Radiactivos.....	36
Registros Mecánicos.....	36
2.3 Tipos de Registros Geofísicos.....	37
Registro de Potencial Espontaneo.....	37
Registro de Resistividad.....	38
Registro de Inducción.....	39
Registro de Micro Resistividad.....	40
Registro Sonico.....	41
Registro de Densidad.....	42
Registro de Neutrones.....	44
2.4 Registro de Susceptibilidad Magnética.....	45
Propiedades Magnéticas de la Materia.....	45
Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo.....	45
Diamagnetismo.....	45
Diamagnetismo en las rocas.....	37
Paramagnetismo.....	46
Ferromagnetismo.....	47
Ferromagnetismo en las rocas.....	49
Superparamagnetismo (SP).....	50
Minerales Magnéticos.....	50
Tipos de Magnetización Remanente.....	52
Susceptibilidad Magnética.....	54
2.5 Registro Químico.....	55

Ácido Clorhídrico.....	56
Alcance.....	57
3: Toma de Registros.....	58
3.1 Toma de Registros en el Pozo Tecoh.....	58
Adquisición de Datos.....	58
3.2 Registro de Imágenes Digitales.....	59
Descripción de los Intervalos Nucleados.....	59
Intervalo 1 de 0 a 35.20 Metros de Profundidad (Caja 1-10).....	60
Intervalo 2 de 35.20 a 74.44 Metros de Profundidad (Caja 10-20).....	60
Intervalo 3 de 74.44 a 105.25 Metros de Profundidad (Caja 20-30).....	63
Intervalo 4 de 105.25 a 143.25 Metros de Profundidad (Caja 30-40).....	63
3.3 Registro Químico.....	66
3.4 Registro de Susceptibilidad Magnética.....	69
4. Interpretación de Registros.....	74
4.1 Interpretación de Registros de Laboratorio (Fotográfico, Químico y Susceptibilidad Magnética).....	74
4.2 Interpretación del Registro Fotográfico.....	75
Intervalo 1 de 0 a 35.20 m. (Caja 1-10).....	76
Intervalo 2 de 35.20 a 73.20 m. (Caja 11-20).....	78
Intervalo 3 de 73.20 a 105.25 m. (Caja 21-30).....	80
Intervalo 4 de 105.25 a 143.25 m. (Caja 31-40).....	82
4.3 Interpretación del Registro Químico.....	84
4.4 Interpretación del Registro de Susceptibilidad Magnética.....	90
Intervalo 1 de 0 32.27 Metros.	90
Intervalo 2 de 32.27 a 67.31 Metros.	92
Intervalo 3 de 67.31 a 95.56 Metros.	94
Intervalo 4 de 95.56 a 138.48 Metros.	96
Intervalo 5 de 138.48 a 145.9 Metros.	98
Conclusiones.....	100

Recomendaciones.....	102
Referencias.....	103

Resumen

Como parte de la investigación en México sobre yacimientos naturalmente fracturados y su importancia en los procesos de explotación de estos sistemas rocosos complejos, se presenta la aplicación de una familia de registros geofísicos no convencionales para la caracterización macroscópica y microscópica de secuencias carbonatadas en núcleos de pozo, los núcleos fueron extraídos en la plataforma carbonatada de Yucatán, el pozo en estudio es el pozo Tecoh, el método aplicado es práctico y de bajos costos de operación comparado con los altos costos de los registros convencionales, de una manera practica se presenta el potencial de los métodos magnéticos. Siendo esto una herramienta adecuada para resolver problemas en la caracterización de carbonatos.

En este trabajo se presenta las bases teóricas y conceptos fundamentales necesarios para la caracterización de carbonatos, los fenómenos sedimentarios mediante los cuales se forman este tipo de rocas y sus características específicas que son la base para su identificación y clasificación. De igual manera se hace mención sobre la geología y descripción de la plataforma carbonatada de Yucatán de donde se extrajeron los núcleos en estudio para entender y tener un panorama mas claro de la formación analizada y el objetivo del núcleo en este pozo, tomando en cuenta la gran importancia de la toma de núcleos para la caracterización de formaciones.

Se hace referencia al estado del arte de los registros geofísicos aplicados en la industria petrolera para caracterizar yacimientos y la descripción de la familia de registros aquí aplicados (fotografico, químico y susceptibilidad magnética) para la identificación de la secuencia estratigráfica del pozo Tecoh, como parte complementaria del marco teórico que nos introduzca más en el entendimiento y la aplicación práctica de esta metodología.

En la adquisición de datos se describen las técnicas y métodos de registros geofísicos aplicados, para un análisis minucioso que permitan la discretización de calizas y dolomías del intervalo en estudio, se documentan los trabajos realizados en los núcleos y las anomalías presentes en la adquisición de información, así como el primer reconocimiento físico y visual de las muestras.

En la fase culminante de este proyecto se interpretan los datos y la información de las muestras objetivo, para dar una clasificación de las diferentes secuencias y discretizar el intervalo analizado de la formación, se identifican los diferentes tipos de carbonatos interpretados caracterizando las zonas de calizas y dolomías presentes en la formación, con lo cual se construyen columnas estratigráficas representativas de la formación.

Como conclusión se muestran los resultados mas representativos y la factibilidad de la aplicación de esta técnica en la caracterización estática de yacimientos carbonatados, con lo cual se puede contribuir a mejorar la caracterización de formaciones y la construcción de modelos estáticos que sean más precisos que permitan tener un mejor panorama de los fenómenos presentes en la explotación de los hidrocarburos generando mejores pronósticos de producción en estos tan complejos yacimientos.

Introducción

En la investigación acerca de la movilidad de los fluidos que se presenta en los yacimientos carbonatados se concluye que es de suma importancia identificar las anomalías, heterogeneidades y características del sistema rocoso, una buena caracterización estática permite entender mejor la producción de los fluidos en estos sistemas y con esto aplicar el método óptimo de explotación, garantizando el aumento del factor de recuperación de los yacimientos.

La utilidad actual de los registros geofísicos es proporcionarle a los geocientíficos y petrofísicos una herramienta práctica para interpretar las características de las formaciones productoras de aceite y gas de una manera más exacta, con lo cual se realizan mejoras y ajustes al primer modelo estático obtenido de la sísmica y otros métodos geofísicos aplicados.

Para una buena caracterización de formaciones, es indispensable conocer las características geológicas, sedimentarias y petrofísicas de las rocas, esto solo se puede lograr con la toma de núcleos de fondo de pozo, aquí se presenta el potencial y las ventajas del muestreo de núcleos para la caracterización de secuencias, esto nos permite entender las heterogeneidades de los yacimientos y comprender las anomalías en los procesos de explotación.

Con las muestras de núcleos se pueden aplicar múltiples técnicas de laboratorio para la caracterización de formaciones, tales como análisis de muestras en láminas delgadas, análisis de elementos mayores y traza, pruebas de desplazamiento entre las más populares, en este trabajo se presenta un método de registros en laboratorio para caracterizar un intervalo de núcleos del pozo Tecoh.

Se presenta una caracterización en muestras de manos para determinar las características texturales y estructurales de las muestras, con esto es posible realizar una clasificación y pronosticar los posibles fenómenos de depositación, esto muestra característica y variaciones claras de porosidad que se ven reflejadas en la permeabilidad.

La utilidad de la susceptibilidad magnética ha tenido gran impacto en las últimas décadas para caracterizar carbonatos, se presenta como un indicador de la evolución diagenética en sedimentos, la susceptibilidad magnética depende de múltiples factores, entre los que se destacan la procedencia y origen los sedimentos como los más importantes para nuestra caracterización, con lo cual se puede identificar los principales minerales paramagnéticos (calcio y magnesio) que constituyen las rocas carbonatas.

Las mediciones de las propiedades magnéticas de los sedimentos proporcionan datos muy importantes acerca de la sedimentación de los sistemas de almacenamiento de hidrocarburos, así como de los posibles cambios en las condiciones paleoclimáticas y paleoambientales durante los últimos cientos de miles de años.

La utilidad de este tipo de mediciones reside en que son relativamente prácticas y rápidas, aportan información acerca de la composición y concentración de los minerales magnéticos presentes en el sedimento, otra característica importante que nos permite visualizar este tipo de mediciones es el cambio en el tamaño de grano.

El estudio de los minerales magnéticos del sedimento se establece su procedencia. También este tipo de estudios permite extraer información acerca de la evolución postsedimentaria del sedimento a partir de transformaciones diagenéticas que afectan a los minerales magnéticos durante el sepultamiento.

La variación de la susceptibilidad magnética está controlada principalmente por la textura, teniendo las fracciones de arena y fango unas características magnetomineralógicas claramente diferentes. Los sedimentos más gruesos poseen porcentajes elevados de CaCO₃ biogénicos. La naturaleza diamagnética del carbonato, unida a una menor concentración de otros minerales de tipo paramagnético y ferromagnéticos en este tipo de sedimentos, hace que la susceptibilidad sea por lo general negativa y muy baja.

Comprender la naturaleza de las facies magnéticas en cada una de las fracciones y las razones de su variabilidad es fundamental para poder construir un modelo que contenga implicaciones sedimentológicas y diagenéticas.

Las propiedades magnéticas del sedimento están controladas por la concentración, mineralogía y tamaño de grano de los minerales magnéticos implicados. El estudio Químico, textural y magnético en este trabajo va a permitir establecer su clasificación, procedencia y ambiente de sedimentación.

Además del estudio de susceptibilidad magnética como se mencionó también se realizó un estudio químico donde se determinó la concentración y contenido de calcita en la formación, este estudio se realizó principalmente para poder determinar la mineralogía característica de las muestras.

El análisis químico ha jugado un papel muy importante en la exploración y producción de petróleo por las diversas técnicas, basadas en la aplicación de ácidos débiles y su reacción con las rocas, resultados que se derivan de ella para este fin, uno de los ejemplos más sobresalientes son los estudios químicos en programas de exploración para correlacionar rocas carbonatadas y diferenciar calizas de dolomías.

La geoquímica se centra, fundamentalmente, en la caracterización de rocas, la relación con el medio sedimentario, el conocimiento de la composición orgánica y su grado de transformación diagenética o de maduración. La aparición de técnicas diseñadas para el estudio de rocas contribuyó de manera decisiva a la expansión de este tipo de investigaciones tanto por parte de las compañías de petróleo como por parte de los centros públicos de investigación.

La importancia de la aplicación de este método radica en que algunos procesos físicos y químicos provocan alteraciones en la mineralogía y composición de los sedimentos. La estabilidad de varios minerales esta determina por varios factores, tales como la energía libre de sus reacciones, el pH, la temperatura y la actividad de varios iones. La geoquímica de las rocas sedimentarias puede complementar datos petrográficos, especialmente cuando estos últimos resultan ser ambiguos.

La concentración de los elementos químicos en una roca sedimentaria dependerá de su reactividad con respecto a los procesos de formación de la roca: depositación, condiciones físico químicas del ambiente, diagénesis y litificación, la movilidad de los elementos describe los cambios químicos que ocurren en la roca después de su formación, por lo general, la movilidad ocurrirá durante el intemperismo, diagénesis y metamorfismo, o por la interacción por algún fluido hidrotermal.

En este trabajo se documenta y reporta la aplicación de este conjunto de técnicas de análisis para la caracterización de secuencias en la plataforma carbonatada de Yucatán con la cual se identifican la litología presente el pozo Tecoh. Es un una aplicación práctica no convencional que puede ser introducida como un análisis más en caracterización estática de yacimientos

1. ROCAS SEDIMENTARIAS - CARBONATOS

1.1 Rocas Sedimentarias

Estas se forman en la superficie de la tierra, por la acumulación y consolidación de minerales, rocas, organismos, vegetación, y la solución de precipitados. Su origen se debe a los sedimentos provenientes de la meteorización y erosión de rocas preexistentes. Se asocian a los yacimientos de hidrocarburos, siendo así la fuente de petróleo que proporciona tanto la roca yacimiento como las trampas para mantener el petróleo en la corteza terrestre. Estas son las rocas menos abundantes, lo que representan aproximadamente el 7,9% de la corteza terrestre. ² (Ver Fig. 1.1)

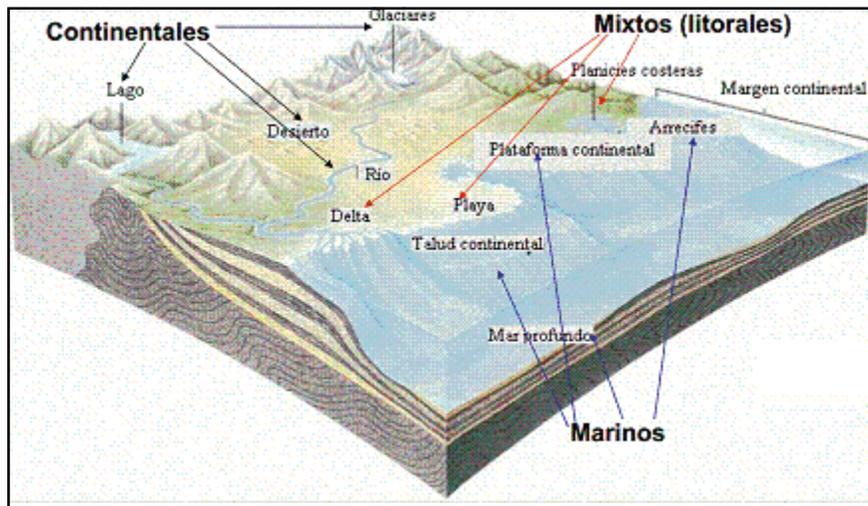


Fig. 1.1 Ambientes sedimentarios (formación de rocas sedimentarias).

Distribución de las Rocas Sedimentarias.

La distribución y abundancia de rocas sedimentarias en la corteza terrestre se presenta como lo muestran las gráficas en la Figura 1.2.

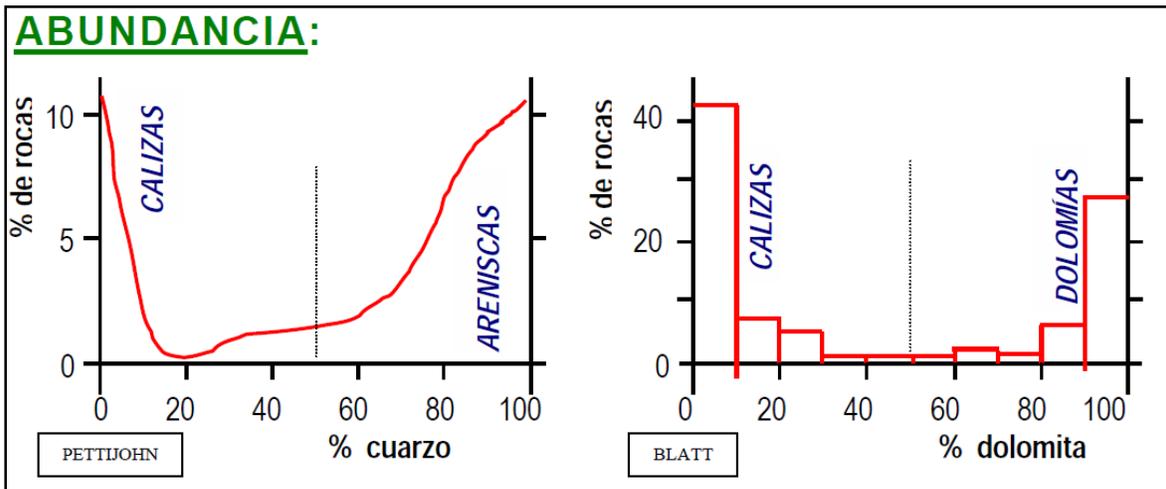


Fig. 1.2 Abundancia de rocas sedimentarias en la corteza terrestre

Las calizas y dolomitas constituyen el 25% del volumen total de roca sedimentaria en la corteza terrestre (Ver Tabla 1) ²

Tabla 1. Distribución de las rocas sedimentarias		
Tipo de roca	% de la Corteza Terrestre	% de las Rocas sedimentarias
Arcilla	4.2	53
Arenisca	1.7	22
Piedra caliza y dolomita	2.0	25

Sedimentación

Es el proceso mediante el cual se acumulan los fragmentos de rocas, estando éstas formados por material rocoso proveniente de la erosión, se fragmentan y acumulan en las zonas más bajas del relieve terrestre en estratos. Estas capas están sobre un basamento. Los procesos de la sedimentación son: pérdida de velocidad del agente de transporte, evaporación y/o reacciones químicas, como se pueden observar en la Fig. 1.3.



Fig. 1.3 Proceso de sedimentación de rocas

Los estratos forman series estratigráficas y sus características dependen de los materiales que se depositaron, condiciones de sedimentación y deformaciones a las que han sido sometidos. Cada estrato significa una interrupción en la sedimentación, un periodo de erosión o un cambio en el tipo de material depositado. (Ver Fig. 1.4)

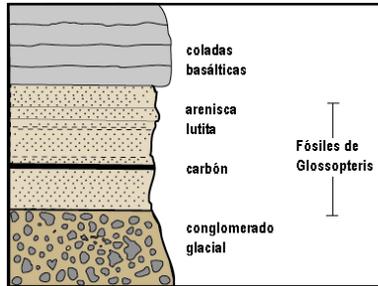


Fig. 1.4 Serie estratigráfica

Los sedimentos pueden ser:

Detríticos si los estratos están formados por fragmentos de otras rocas preexistentes (Fig. 1.5).

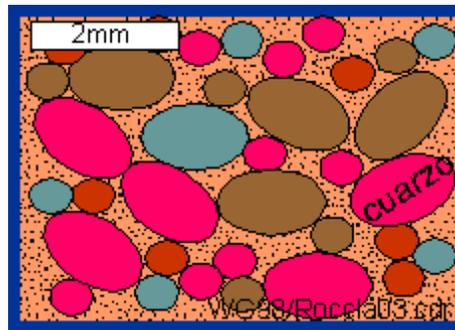


Fig. 1.5 Detritos de roca

Calizas, si se originan cuando se produce la precipitación de carbonato de calcio (Fig. 1.6)

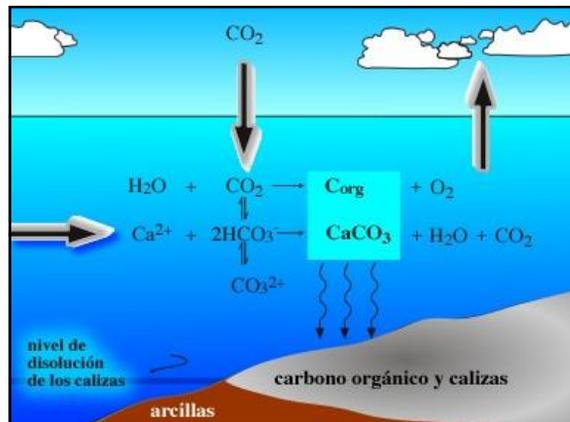


Fig. 1.6 Precipitación de calizas.

Salinos, si su origen es la evaporación del agua donde estaban disueltas las sales. (Fig. 1.7)



Fig. 1.7 Sedimentos salinos

Los procesos geológicos de sedimentación, se producen en una escala gradual y están relacionados con las propiedades físicas de las rocas, tales como la densidad, la velocidad de transmisión del sonido, compresión, y las propiedades de los líquidos como la mojabilidad, son consecuencia de la composición mineral de las rocas.

Los depósitos sedimentarios son alterados por la actividad tectónica, resultando las capas profundas de sedimentos en zonas de hundimiento. El movimiento continuo y las colisiones de las placas continentales, causan plegado y fallamiento de bloques grandes de depósitos sedimentarios. Esta actividad forma trampas naturales donde se acumulan los hidrocarburos que migran desde las rocas fuente³.

Litificación

Es resultado de una serie de procesos diagenéticos que transforman los sedimentos en roca, incluyendo la compactación, cementación, desecación y cristalización. Tienen lugar cerca de la superficie, a temperaturas y presiones bajas, liberando gases y agua. (Ver Fig.1.8)³

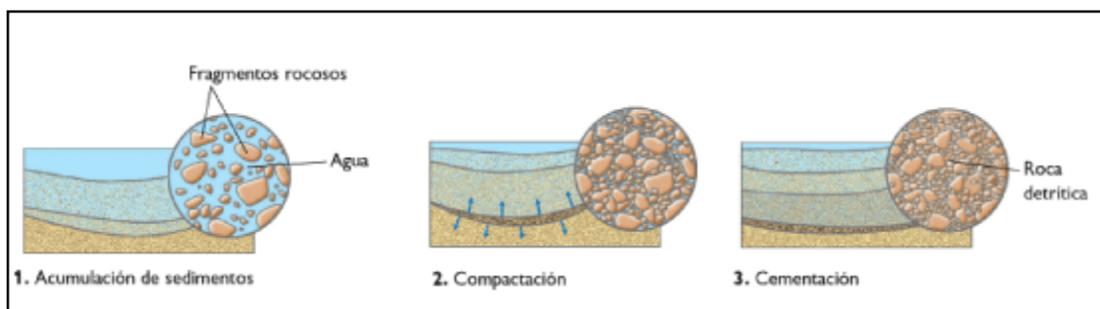


Fig. 1.8 Litificación

Compactación: Es un fenómeno físico que consiste en la eliminación de espacios vacíos en un sedimento por la acción del peso de otros que caen, ocasionando la reducción de su volumen y, disminuyendo el espesor de los estratos.

Los primeros sedimentos quedan enterrados bajo las nuevas capas y se endurecen por la compresión que sufren debido al peso de las capas superiores. A mayores profundidades se produce una sobrepresión, generándose una presión dentro de los granos y poros, que resiste cada vez más el sobrepeso. Las partículas sedimentarias se empaquetan a mayor densidad y el agua que está entre ellas es expulsada. La compactación siempre va acompañada de la cementación, debido a las partículas sedimentarias inestables y al agua expulsada de los poros produciendo una reacción química precipitando los minerales disueltos, desplaza el agua y forman un cemento uniendo fragmentos de rocas convirtiéndolos en roca dura. Los cementos más comunes son el carbonato de calcio, carbonato de calcio-magnesio, la calcita y la dolomita, los cuales, al litificarse dan lugar a las calizas y dolomías.

La desecación, se produce durante la compactación al ser expulsada el agua de las partículas sedimentarias cuando la cementación se origina mientras están todavía en la superficie terrestre. La recristalización es una característica de los sedimentos químicos e implica la vinculación del mineral de origen con la formación de nuevos cristales ³.

Propiedades de las Partículas Sedimentarias

Las partículas sedimentarias varían en tamaño. Su clasificación es indicativo de su origen, del modo de transporte, y de la dureza. Las partículas angulares permanecen cerca de su fuente de origen, mientras que las partículas esféricas y lisas indican transporte por corrientes. (Ver Tabla 2)

La arena, el limo y la arcilla son transportados por agua y viento. Los carbonatos son pulverizados en el proceso de transporte, se disuelven y precipitan a partir de una solución concentrada. (Ver Tabla 3) ¹.

Tabla 2. Lista de pruebas para la caracterización de la roca
Las partículas de Roca desagregadas
1. Distribución de tamaño de la partícula mediante análisis granulométrico
2. Esfericidad y redondez de los granos mediante análisis microscópico
3. Composición química de la fracción por análisis instrumental
4. Tipo de granos (cuarzo, feldespato, fragmentos de roca mayores, etc.)
5. Análisis mineral de arcilla
6. El contenido orgánico de las fracciones de tamaño de partículas

Tabla 3. Las muestras de núcleos

1. Marco geológico y el origen de la roca
2. Orientación de estratos planos
3. Contenido líquido mediante el análisis de retorta
4. Curvas de presión capilar
5. Distribución de tamaño de poro
6. Área de la superficie
7. Porosidad
8. Permeabilidad absoluta
9. Saturación de agua irreducible
10. Mojabilidad entre Aceite y agua
11. Saturación de petróleo residual
12. Capacidad de intercambio catiónico
13. Punto de carga de la fuerza
14. Análisis de la superficie del mineral por microscopio electrónico de barrido
15. Factor de la Resistividad de la formación

1.2 Clasificación de las Rocas Sedimentarias.

Los sedimentos y rocas sedimentarias resultan del producto de la meteorización y erosión de las rocas preexistentes, que al ser transportados por diferentes agentes, se depositan en un área de la corteza terrestre o cuenca. El material que integra dicho depósito (sedimento) al consolidarse genera una roca sedimentaria. La consolidación de una roca supone la actuación de los procesos diagénéticos.

Los minerales de la roca pueden ser alógenos; es decir, los que permanecen inalterados de la roca original, y/o autigénicos, que son aquellos que se forman en el sedimento genéticamente asociados con los procesos diagenéticos.

Las rocas sedimentarias en función de sus constituyentes, se clasifican en: rocas detríticas o clásticas (más del 50% de clastos) y no clásticas (menos del 50% de clastos). Estas últimas a su vez pueden subdividirse en: químicas y organógenas.

Rocas Sedimentarias Detríticas o Clásticas.

Son formadas por la sedimentación mecánica de los fragmentos de otras rocas procedentes de la erosión y son depositados y transportados por gravedad, por suspensión, acción eólica o glaciar. Se clasifican por el tamaño de los sedimentos que la componen en conglomerados, brechas, areniscas, limonitas, lutitas y arcillas (Fig. 1.9).



Fig. 1.9 Clasificación de rocas clásticas

Las constituidas por partículas de tamaño grande son los conglomerados o brechas, las de tamaño intermedio son las areniscas y las de partículas muy pequeñas, las limonitas y arcillas (Fig. 1.10).

Los elementos constituyentes de una roca clástica son (Fig. 1.11):

Clastos: Fragmentos de distintos tamaños formados por la desintegración física o alteración química y/o biológica de otras rocas. Se pueden separar dos poblaciones en relación a su tamaño:

- a) Esqueleto – población de mayor tamaño
- b) Matriz – población de menor tamaño

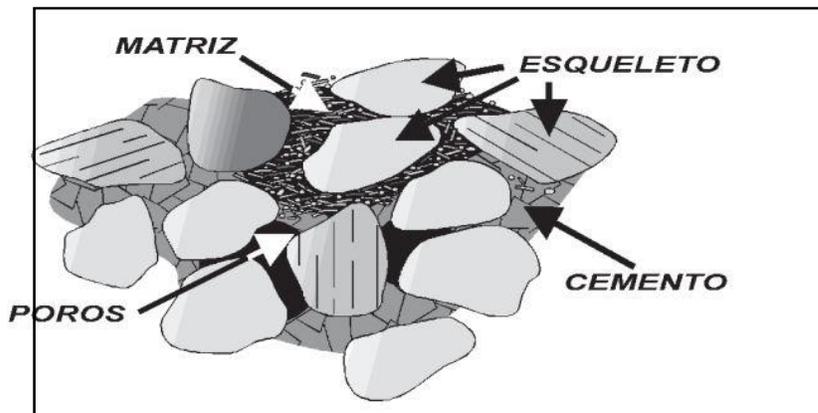


Fig. 1.10 Composición clástica

Cemento: Sustancia mineral precipitada de soluciones, que se encuentra en los poros vacíos y actúa como ligante de los clastos, confiriéndole el grado de consolidación. Existen diferentes tipos de cemento:

- Silíceos (cuarzo, calcedonia, ópalo)
- Óxidos e Hidróxidos de hierro (hematita, limonita)
- Sulfatos (anhidrita, yeso)
- Carbonatos (Calcita, dolomita)

Poros: son los espacios intersticiales entre los clastos, que están vacíos. Se definen como el volumen de espacios vacíos en el volumen total de la roca.

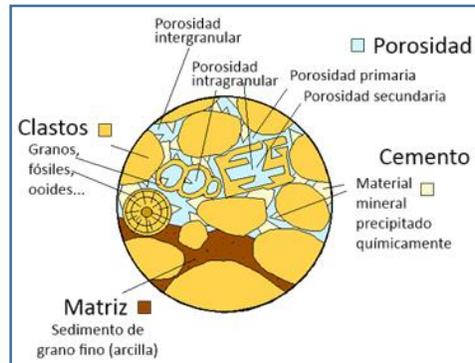


Fig. 1.11 Elementos de una roca clástica

Areniscas

Son granos de cuarzo y fragmentos de roca mezclados que son transportados y transformados en areniscas, son sometidas a ser enterradas por otros sedimentos por lo que sus esfuerzos verticales causan la compactación de estos granos. Su transformación se produce por litificación, o cementación. Su composición depende de la fuente de los minerales (ígneas, metamórficas, sedimentaria) y la naturaleza del medio ambiente de deposición.

Teodorovich usa las tres componentes de las areniscas más generales para establecer un esquema de clasificación (Fig. 1.12).

Una característica de las areniscas son los planos de estratificación, son consecuencia de las capas de deposición. La estratificación introduce una diferencia considerable entre la dirección vertical (estratificación cruzada con respecto al plano de dirección) y la dirección horizontal (paralelo a los planos de estratificación) del flujo de fluidos.¹

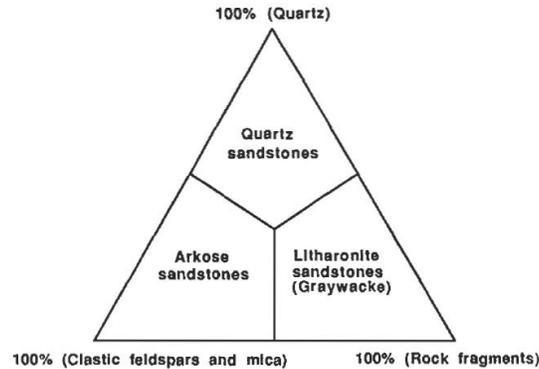


Fig. 1.12 La clasificación de arenas de Teodovich, basadas en su composición. 1.

Rocas Sedimentarias no Detríticas

Son formadas por la sedimentación de materiales precipitados en soluciones acuosas o por la acumulación de los restos orgánicos. Las constituyen las calizas, siendo originadas por la precipitación de cementos calcáreos, por la acumulación de restos de organismos, las tobas calcáreas, con abundantes restos de vegetales, provocan la precipitación de carbonatos que caen sobre los vegetales presentes, las evaporitas, formadas por la precipitación del agua en medios lagunares, son formadas a partir de la acumulación de materia orgánica (Fig. 1.13) ¹



Fig. 1.13 Roca Caliza fosilífera o no detrítica

Rocas Sedimentarias Químicas

Son el resultado de la precipitación química de sustancias disueltas en agua e incluyen una variedad de tipos de rocas como (Fig. 1.14):

Rocas Carbónicas: rocas compuestas principalmente por calcita (CaCO_3) o dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). De hecho, gran parte de ellas constan casi exclusivamente de calcita, denominándose la roca caliza, o de dolomita, denominándose la roca dolomía. Cuando existen ambos minerales la roca puede denominarse caliza dolomítica (calcita > dolomita) o dolomía calcítica o calcárea (calcita < dolomita).

Rocas silíceas: rocas de grano muy fino, densas, muy duras, compuestas predominantemente por SiO₂ (cuarzo, calcedonia y ópalo). La mayoría contiene cantidades menores de impurezas tales como minerales de arcilla, hematita, calcita, dolomita y materia orgánica. La variedad más común es el pedernal.

Rocas ferruginosas: rocas que poseen más del 15% de Fe, formadas por precipitación de minerales de Fe.

Fosforitas: rocas cuyo contenido en P₂O₅ es superior al 15%. Están compuestas por variedades del mineral apatito (fluorapatito, clorapatito e hidroxapatito)

Evaporitas: rocas formadas por precipitación de sales al evaporarse el agua en que estaban disueltas. Están compuestas esencialmente por yeso, anhidrita y halita. Sin embargo, entre los minerales comunes se encuentran cloruros (silvita y carnalita), sulfatos, carbonatos, boratos y nitratos.



Fig. 1.14 Rocas Carbónicas de origen químico.

Rocas Sedimentarias Orgánicas (Organógenas)

Se forman por la acumulación de restos de seres vivos y se dividen en: a) rocas compuestas por partes mineralizadas de los seres vivos, y b) rocas compuestas por la propia materia orgánica (Fig. 1.15).

- a) Las rocas organógenas que resultan de la aglomeración de las partes mineralizadas de los organismos (conchillas y exoesqueleto) se clasifican, de acuerdo a su composición, en: carbonatos y silíceas.

a.1) Carbonatadas:

Creta: roca calcárea de grano muy fino, de color blanco o gris, formada principalmente por caparazones de foraminíferos.

Calizas arrecifales: rocas formadas por colonias de organismos. Se denominan de diferentes formas dependiendo del tipo de organismo: calizas coralinas, calizas algales (estromatolitos).

Lumaquelas (coquina): rocas compuestas por conchillas de moluscos y braquiópodos.

a.2) Silíceas:

Radiolaritas: rocas compuestas por esqueletos de radiolarios.

Diatomitas: rocas sedimentarias silíceas formadas por la acumulación de caparazones de diatomeas, que son algas que secretan un esqueleto compuesto por sílice amorfa.

Espangiolitas: rocas que resultan de la acumulación de espículas de esponjas.

- b) Entre las rocas organogenas compuestas por la propia materia orgánica, más o menos modificada por la acción de determinadas bacterias anaerobias, se encuentran los carbones y las lutitas pirobituminosas.

b.1) Los carbones están constituidos por materia orgánica combustible mezclada con distintas proporciones de materiales siliciclásticos (impurezas). Resultan de la transformación de restos vegetales acumulados en el fondo de pantanos, lagunas o deltas fluviales, mediante la acción de bacterias anaerobias, que provocan la descomposición de carbono y el enriquecimiento progresivo en carbono.

Los principales tipos de carbones, ordenados de menor a mayor contenido en carbono, son:

Turba (50 – 60 % de C). No es exactamente un carbón, sino una acumulación de materia orgánica vegetal descompuesta, que representa la primera etapa de la formación de los carbones.

Lignito (60 – 75 % de C). Es un carbón de color marrón oscuro, formado por materia leñosa embebida en materia blanda vegetal descompuesta, con un elevado contenido de humedad. Puede sufrir combustión espontánea.

Hulla (75 – 90% de C). Es un carbón de color negro y muy frágil. Contiene menor cantidad de volátiles y de humedad que el lignito y mayor contenido de C. La materia orgánica no se puede observar a simple vista.

Antracita (<90% de C). Es el carbón con mayor grado de diagénesis. Es totalmente negro, muy brillante, frágil y posee fractura concoide. Arde muy lentamente, con una llama azul pequeña, no desprende humo, no contiene sulfuro, y es el carbón de mayor poder calorífico.

b.2) Las lutitas pirobituminosas son rocas sedimentarias de granulometría muy fina que contienen cantidades significativas de kerogeno (mezcla sólida de compuestos químicos orgánicos) del cual se pueden extraer hidrocarburos mediante calentamiento a unos 350 °C (destilación).

Estas rocas se producen en ambientes lacustres, albuferas, pantanos y mares someros, donde existe una elevada productividad orgánica (crecimiento algal). La generación de estas rocas es favorecida por la ausencia o escasa circulación y estratificación de las aguas por densidad, con desarrollo de ambientes anóxicos en el fondo y oxigenados en la superficie.

La materia orgánica acumulada sufre transformaciones diagenéticas por degradación química y bioquímica y se forma bitumen (20%) y kerogeno (80%). El bitumen es la porción de la materia orgánica contenida en la roca, que es soluble en solventes orgánicos mientras que el kerogeno corresponde a la materia orgánica insoluble en solventes orgánicos y se compone de restos de algas, esporas, granos de polen, resinas y ceras.



1.15 Roca Sedimentaria Organogenia (Coquina)

1.3 Yacimientos Carbonatados (Calizas y Dolomías)

La mayoría de las rocas carbonatadas, se componen con partículas de arcilla con tamaño de grava que se depositan en un medio ambiente marino. Los clásticos terrígenos se depositan en forma de partículas de cal que se producen localmente, a diferencia de las areniscas que están compuestas de partículas transportadas de una fuente externa por las corrientes de agua (Fig. 1.16).

Los componentes de las rocas carbonatadas son: (1) granos de diversos tipos, (2) lodo de cal, (3) cemento de carbonato precipitado. Hay varios tipos de granos, de los cuales cuatro son los más importantes. Estos son (1) fragmentos de conchas, "bio" 2) fragmentos de calizas " intraclastos ", (3) pequeñas bolitas redondas - excremento de lombrices, y (4) oolitas - esferas formadas por el rodado de partículas de cal en la parte inferior. ²

La formación de las rocas calcáreas es producto de procesos biológicos y bioquímicos en los que se agregan procesos de precipitación inorgánica de CaCO_3 . Las calizas son encontradas en la mayoría de las eras geológicas a partir del Cámbrico y hasta la actualidad.

La mayoría de los sedimentos carbonatados ocurren en cinturones tropicales hasta subtropicales (latitudes 30° Norte y 30° Sur). La producción de carbonatos es mayor en aguas marinas con salinidad normal, en aguas someras, templadas y libres de influencia clástica terrígena, sin embargo existen carbonatos en aguas profundas, donde en ambientes pelágicos son depositados lodos calcáreos compuestos mayormente por cantidades considerables de esqueleto de organismos pelágicos. (p.e. foraminíferos y cocolitos).

Debido a que existen rocas carbonatadas de ambientes muy contrastantes, presentan diferentes sedimentologías, litologías, faciales y faunísticas muy diversas. ⁴



Fig. 1.16 Roca de un Yacimiento Carbonatado Naturalmente Fracturado

Clasificación de Rocas Carbonatadas

Roca carbonatada es aquella que está formada por más del 50% de minerales carbonatados (aragonito, calcita alta en Mg, calcita baja en Mg, dolomita, otros).⁸

Los carbonatos se clasifican de acuerdo a la textura deposicional como se muestra en la Fig. 16. La presencia o ausencia de lodo de cal, el tipo y la abundancia de granos forman la base de la clasificación.

La buena porosidad en los yacimientos carbonatados se debe a la dolomitización, la cual se produce a partir de la sustitución de magnesio por el calcio en la mitad de los núcleos en un cristal de carbonato. Hay una pérdida de volumen del 12 al 13%, debido a los resultados de la dolomitización y aumenta la porosidad. También crea superficies de cristal planar y estructuras cristalinas más duras. La mayor parte del volumen de petróleo en carbonatos proviene de dolomitas.¹

Orígenes del Material Intergranular

- a) Micrita: matriz o barro carbonatado compuesto por un agregado de cristales finos menores a 4 micras de aragonito a calcita rica en mg. Por diagénesis se transforman en cristales de calcita baja en Mg. Al microscopio se ve como una masa homogénea criptocristalina y oscura, normalmente de color pardo.

Origen:

- Precipitación química (lagoons hipersalinos)
- Precipitación bioquímica por fotosíntesis de algas (lagoons y lagos de agua dulce).
- Desintegración de algas verdes (halimeda, penicillus)
- Actividad bioerosiva
- Degradación mecánica de esqueletos bioclásticos
- Actividad bacteriana
- Caparazones de nanoplacton.

Es importante mencionar que la micrita es un material primario en la formación de la roca.

La micrita se forma en ambientes protegidos, de baja energía, en caso contrario los pequeños cristales serían dispersados por las aguas cuando hay agitación. (lagoos continentales, lagoos, plataforma profunda, fondos abisales).

- b) **Esparita (ortoesparita):** Término usado genéricamente para los cementos carbonatados. El cemento esparítico es un agregado de cristales de carbonato (aragonito o calcita) de tamaños mayores a las 4 micras que precipitan en los espacios existentes entre los granos de un sedimento carbonatado, o en los espacios internos de estas partículas (Fig. 1.17).

Pseudoesparita: se forma por procesos neomórficos de recristalización (a diferencia del cemento esparítico).

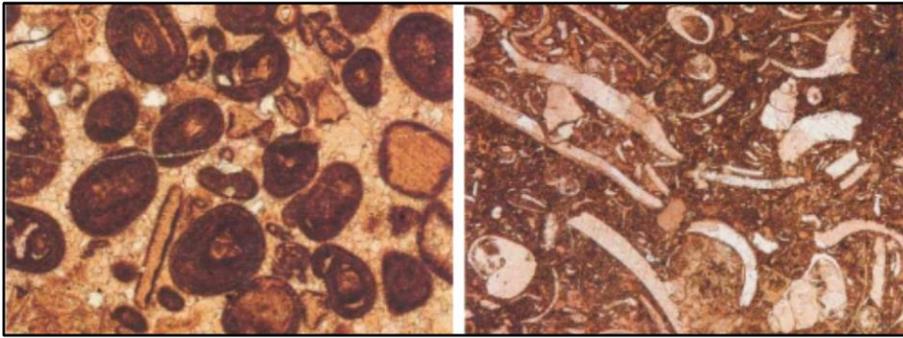


Fig. 1.17: Esparita como material intergranular (izquierda). Micrita (Derecha)

Bioclastos: (granos esqueléticos, fósiles): Restos complejos o fragmentados de los esqueletos construidos por organismos. Ejemplo: moluscos, braquiópodos, equinodermos, briozoos, foraminíferos, corales, algas calcáreas, etc. (Fig. 1.18).

Ambientes de formación: cualquier ambiente marino o continental. Los diferentes grupos, géneros o especies están restringidos a determinados subambientes.



Fig. 1.18 Foraminíferos

Granos agregados: granos complejos que consisten en varias partículas (bioclastos, ooides, peloides) unidas entre sí por micrita o cemento esparítico. Normalmente tienen formas lobulares irregulares subredondeadas y botroidales (Fig. 1.19).

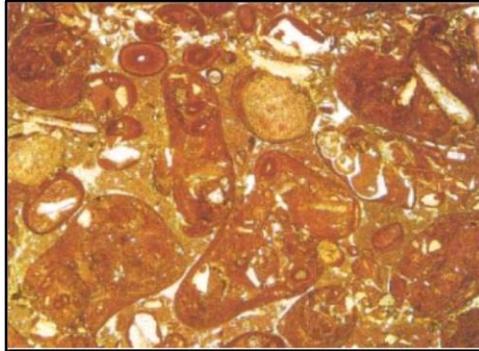


Fig. 1.19 Granos agregados

Peloides: granos no esqueléticos de forma ovoidal, compuestos por micrita con una estructura interna masiva. Tamaños variables, aunque generalmente entre 0.1 y 0.5 mm de diámetro (Fig. 1.20).

Origen: producto de la actividad fecal de organismos (pellets fecales), por destrucción y homogeneización de la estructura interna de partículas previas por abrasión mecánica o erosión biológica, retrabajo y redondeamiento de barros calcáreos (intraclastos finos).

Ambientes de formación: ambientes protegidos (lagoons y llanuras mareales), en cavidades dentro de arrecifes.

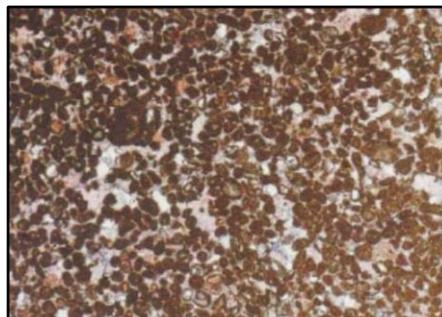


Fig. 1.20 Peloides

Intraclastos: Fragmentos retrabajados de sedimento débilmente consolidado dentro de una cuenca de sedimentación por la acción de corrientes, oleaje, deslizamiento, etc. (Fig. 1.21).

La morfología típica es de fragmentos generalmente angulosos, de tamaños variables compuestos de barro micritico y/o fragmentos de bioclastos u otros granos.

Ambientes de formación: cualquier zona de plataforma, talud o llanura abisal, con aumentos bruscos de energía que re trabaja sedimentos previamente depositados. Áreas intermareales o supramareales, canales mareales, taludes marinos, etc. Debido a su modo de formación, los depósitos de intraclastos muestran una fuerte homogeneidad en cuanto a las características externas e internas de estos fragmentos.



Fig. 1.21 Intraclasto

Extraclastos: fragmentos redondeados o angulosos procedentes de la erosión de rocas carbonatadas más antiguas y externas al ambiente de sedimentación (fuera de la cuenca). La estructura interna correspondiente a la de la roca carbonatada que ha sufrido procesos de diagénesis más o menos intensos (Fig. 1.22).

Para la distinción entre intraclastos y extraclastos, un extraclasto posee:

- Fósiles más antiguos al contenido fosilífero de la roca
- Partículas truncadas en el borde del clasto.
- Evidencias de cementación bien desarrollada
- Presencia de vetillas rellenas por cementos o compactación interna
- Bordos desgastados

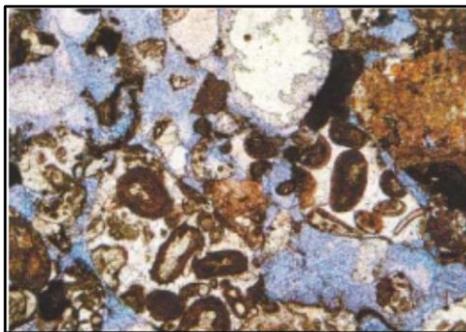


Fig. 1.22 Extraclastos

Oolitos (ooides): granos no esqueléticos, de forma esférica o subesférica (elipsoidal), que consisten en una o más láminas concéntricas regulares alrededor de un núcleo (grano de cuarzo, bioclasto,

etc.). Tamaños menores a 2 mm, frecuentemente entre 0.2 a 0.5 mm, con buena selección. Si su tamaño supera los 2 mm, reciben el nombre de pisolitos o pisoides.

Oolitos superficiales: solo una lámina alrededor del núcleo

Oolitos normales: varias láminas alrededor del núcleo

Oolitos compuestos: varios aloquemos menores envueltos en conjunto por láminas concéntricas (Fig. 1.23).

Ambientes de formación: por precipitación inorgánica (química) en aguas marinas tropicales, en áreas de plataforma somera (menos de 5 metros de profundidad, a veces hasta 10 a 15 m.) de alta energía. También lagoons, ríos y lagos.

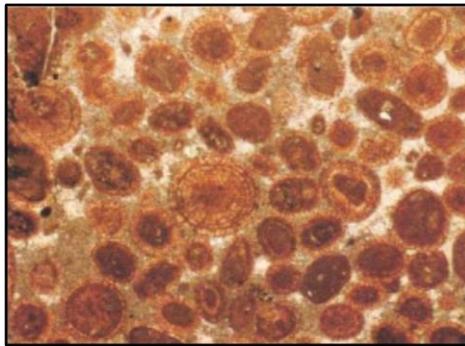


Fig. 1.23 Oolitos

Oncolitos (oncoides): granos no esqueléticos, con laminación micrítica irregular alrededor de un núcleo. La precipitación de las láminas es debido a la actividad de algas (a diferencia de los oolitos). Tamaño muy variable, hasta centímetros y decímetros, con mala selección (a diferencia de los oolitos) (Fig. 1.24).

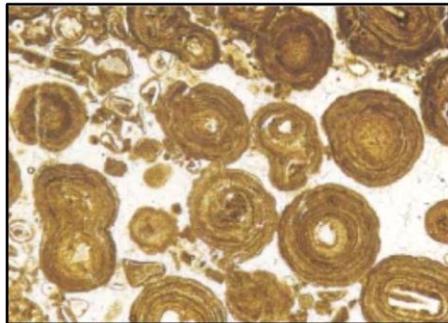


Fig. 1.24 Oncolitos

Los estromatolitos también son construidos por la acción de algas, son matas de algas fosilizadas. Estas matas están formadas por filamentos de algas verdes – azules. Las láminas, frecuentemente, tienen una forma irregular (Fig.1.25).



Fig. 1.25 Estromatolito (muestra pulida, macroscópica)

Diagénesis en Rocas Carbonatadas

Las rocas carbonatadas presentan, desde el punto de vista diagénético, una característica muy importante en su alta diagenetibilidad, fruto de la rápida inestabilidad de sus componentes con el enterramiento. Dentro de los procesos diagénéticos se pueden diferenciar:

- Micritización
- Compactación
- Cementación
- Disolución
- Recristalización
- Dolomitización – dedolomitización

Antes de describir los procesos diagénéticos es necesario tener en cuenta una serie de sustituciones que involucran a las rocas carbonatadas.

El magnesio es uno de los elementos más comunes en las aguas marinas y es una de las sustituciones más frecuentes del Ca^{+2} en la calcita.

Calcita con más de 5 mol % de MgCO_3 : calcita alta en magnesio (HMC)

Calcita con menos de 5 mol % de MgCO_3 : calcita baja en magnesio (LMC)

La cantidad de Mg^{+2} presente en las calcitas magnesianas dependen de la razón $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ en la solución y de la T° . A temperaturas decrecientes el contenido de Mg^{+2} disminuye.

En un ambiente marino de condiciones normales con razón $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ constante, la T° será el factor principal en la precipitación de calcita con alto o bajo contenido en Mg, es decir, a altas altitudes o aguas profundas con temperaturas bajas se favorecerá la precipitación de calcita con bajo contenido de Mg, y a bajas latitudes o aguas superficiales se favorecerá la precipitación de calcita con alto contenido de Mg.

En un ambiente donde la razón $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ es muy alta, la temperatura no jugará un rol determinante, sino es la razón mencionada la que determinará si precipita calcita alta en Mg, dolomita o incluso magnesita.

Un ambiente continental dominado por aguas sobresaturadas en carbonato, pero con una proporción Mg^{+2}/Ca^{+2} muy baja o nula favorecerá la precipitación de calcita sin contenido de Mg.

Las calcitas con alto contenido en Mg son metaestables y tienen tendencia rápida a transformarse en calcita, liberando iones de Mg. La presencia de estos iones de Mg en la solución tiene un efecto inhibitorio en la cristalización de calcita, ya que al ser liberados forman una especie de protección alrededor de los cristales de calcita impidiendo el crecimiento de estos a tamaños mayores de 3 micras.

En un ambiente marino normal favorable a la formación de sedimentos carbonatados, el principal producto de la precipitación directa de carbonato será aragonita y/o calcita magnesiana de hábitat generalmente microcristalino (micrita). En un ambiente continental donde no está presente el Mg, los cristales de calcita pueden desarrollarse mejor constituyendo microesparita y esparita.

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 micriticas que van destruyendo la textura interna de las partículas (total o parcialmente). La erosión biológica la llevan a cabo microorganismos que perforan la estructura de la partícula, rellenándose posteriormente por barro calcáreo. Este proceso se considera típicamente como de diagénesis temprana (Fig. 1.26).

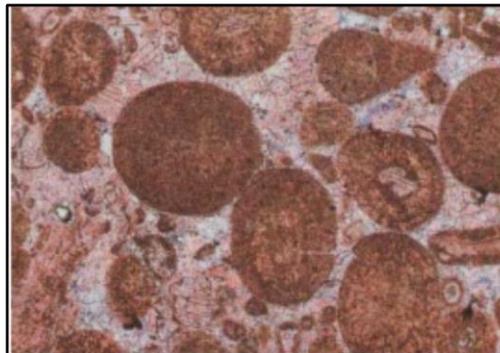


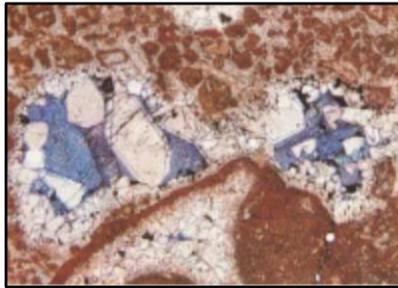
Fig. 1.26 Micritización, la textura oolítica se pierde en algunos granos

Compactación

Es el crecimiento de cristales en espacios preexistentes a partir de la precipitación desde soluciones saturadas. Estos espacios pueden ser tanto interpartículas como intrapartícula. Uno de los resultados finales más importantes de la cementación es la litificación del sedimento y pérdida de porosidad.

Tipos de cementos según su textura (Fig. 1.27):

- Drusy: cristales fibrosos alrededor de la partícula.
- Mosaico: cristales constituyendo un mosaico
- Sintaxial: cristal en continuidad óptica con la partícula. Muy característico de las placas de equinodermos.
- Poiquilotopico: grandes cristales englobando las partículas (in continuidad óptica con estos)
- Menisco: cristales que precipitan entre partículas próximas desarrollando morfologías en menisco.
- Gravitacional: cemento cuya morfología global está condicionada por la gravedad.



a) Cemento en mosaico



b) Cemento en menisco



c) Cemento Gravitacional



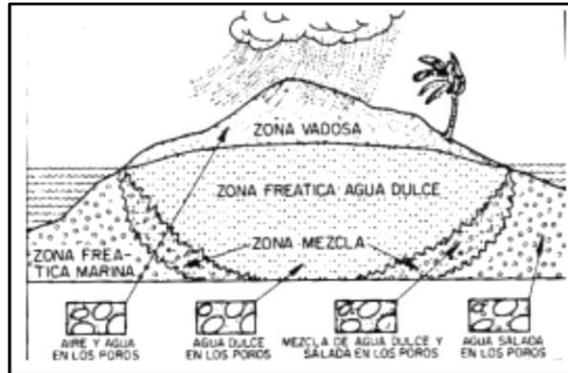
d) Cemento syntaxial en placas de equinodermo

Fig. 1.27 Tipos de cementación

Los procesos de cementación van a estar condicionados por factores fisicoquímicos que a su vez están interrelacionados con ambientes geográficos. Esto hace que se pueden establecer una serie de ambientes de cementación caracterizables, cada uno de ellos, por la morfología y mineralogía de sus cementos (Fig. 1.28).

- Zona vadosa: Paso de las aguas meteóricas, por lo tanto está subsaturada en agua dulce. Los tipos más característicos de cementos van a ser los meniscos y los gravitacionales, o simplemente cristales aislados de calcita. (LMC)

- Zona freática continental: zona saturada en agua de origen continental (bajo contenido en Mg). Los cementos que se generan son básicamente en mosaico y sintaxial de calcita (LMC).
- Zona freática marina: zona saturada en agua de origen marino (alto contenido en magnesio). Los cementos que se generan son básicamente del tipo drusy de HMC o aragonito.
- Zona intramareal: esta zona, situada entre la subida y la bajada de marea queda bajo la acción alternante de aguas marinas y ambiente vadoso, desarrollándose unos cementos drusy y menisco de aragonito.



• Fig. 1.28 Procesos de cementación.

Disolución

La disolución es el resultado de la interacción de dos factores: la composición del agua de poros y la mineralogía de las partículas. Cuando estos dos factores se encuentran en desequilibrio, a consecuencia de los cambios que tienen lugar en el enterramiento, se produce la disolución. El resultado final de los procesos de disolución va a ser la creación de diferentes tipos de poros (porosidad secundaria).

Es importante tener en cuenta la evolución de la porosidad.

Sedimento primario (bioclástico y/o barro)..... Porosidad primaria (inter e intrapartícula)

Procesos diagénéticos aumentan o disminuyen la porosidad

Porosidad visible..... porosidad secundaria

Selectividad de fábrica: poros delimitados por los elementos de fábrica (constituyentes sólidos, partículas primarias, cristales, granos de cuarzo, etc.)

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 (Fig. 1.29).

Reconocimiento de textura de recristalización

- Calizas con textura de mosaico cristalino con cristales de tamaños diferentes
- Mosaico de cristales con fantasmas de partículas o barro micritico.
- Calizas sin recristalización completa (contactos difusos).
- Masas micriticas con manchas (parches) de cristales.

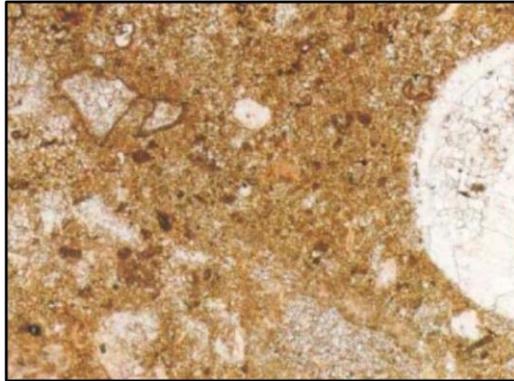


Fig. 1.29 Recristalizacion

Dolomitización

El proceso de dolomitización se refiere al reemplazo de calcita a dolomita. El análisis de textura de dolomitización puede hacerse considerando dos casos reemplazando parcial o reemplazamiento total (Fig. 1.30).

1. Reemplazamiento total: se pueden considerar situaciones diferentes:
 - a) Conservación de la textura deposicional
 - b) Conservación parcial de la textura deposicional (fantasmas)
 - c) Sin conservación de la textura deposicional
2. Reemplazamiento parcial: el reemplazamiento parcial suele llevar, generalmente, un orden selectivo de tal forma que lo primero en dolomitizarse es la matriz micritica y posteriormente los bioclastos. En otras ocasiones la selectividad se establece a través de fracturas, bioturbación, estructuras sedimentarias, etc.



Fig. 1.30 Dolomitización

Existen dos clasificaciones principales, las cuales son las más difundidas y usadas cuando se trabaja con rocas carbonatadas. Estas son las clasificaciones de FOLK (1959, 1962) y de DUNHAM (1962) ⁴ (Fig. 1.31).

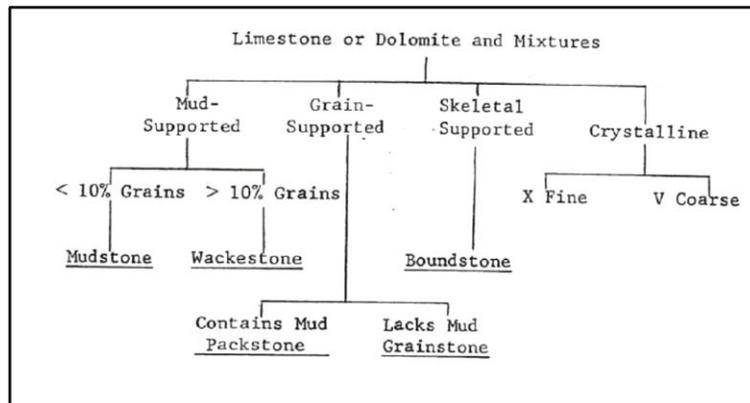


Fig. 1.31 Clasificación de carbonatos por textura (DUNHAM).

Clasificación de Folk (Composicional)

Esta clasificación supone la forma de la sedimentación de las rocas carbonatadas que pueden ser comparables con rocas clásticas (areniscas).

En su campo de aplicación están restringidas por el uso de láminas delgadas y es poco utilizada, además que su terminología no explica mucho sobre el empaquetamiento y orden de los componentes en la muestra. Una de las ventajas es que los términos que Folk propone, es posible de acuerdo al nombre de la muestra, saber el tipo de componentes y matriz que la componen.

La clasificación de FOLK diferencia las rocas calcáreas ricas en componentes (rocas carbonatadas aloquímicas), de los carbonatos pobres o sin componentes (rocas carbonatadas ortoquímicas).

Si una roca carbonatada se compone exclusivamente de micrita, el nombre de esta roca es Micrita, si la roca se compone igualmente solo de matriz esta es esparita, una roca completamente recristalizada se la llamara "esparita". Un caso especial son las rocas calcáreas piógenas, es decir

formadas por secreciones de una concha calcárea, por ejemplo las rocas arrénciales, éstas recibirán el nombre de Bolillita.

Con el nombre de caliza se designa la combinación del tipo de matriz (micrita o esparita) y un prefijo, con base en las primeras sílabas de los componentes. ⁴

Las rocas carbonatadas aloquímicas, se clasifican en dos grupos (Tabla 4):

Grupo 1).- Si la masa básica es esparita (cemento de calcita)

Grupo 2).- Si la masa básica es micrita (calcita microcristalina)

Tabla 4: Nomenclatura de rocas carbonatadas aloquímicas		
<u>Componentes</u>	<u>Masa Básica</u>	<u>Nombre</u>
Intraclastos	Micrita	Intramicrita
Intraclastos	Esparita	Intraesparita
Pelotoides	Micrita	Pelmicrita
Peloides	Esparita	Pelesparita
Biógenos	Micrita	Biomicrita
Biógenos	Esparita	Bioesparita

Cuando los componentes presentes dentro de una roca carbonatada son ooides y la masa básica es esparita la roca se llamará ooesparita, pero si tienen los mismos componentes solo que ahora la masa básica es micrita la roca se denominará: oomicrita ⁴:

Usualmente ocurre que dentro de una muestra se llegaran a reconocer más de un tipo de componentes, el componente dominante (el de mayor %) se colocará como primer prefijo de las primeras letras de los siguientes componentes ⁴ (Tabla 5):

Tabla 5: Nomenclatura de rocas carbonatadas por componente dominante		
Componentes	Masa Básica	Nombre
Ooides (60%) y Peloides (40%)	Micrita	Oopelmicrita
	Esparita	Oopelesparita
Intraclastos (80%) y Bioclastos (20%)	Micrita	Intrabiomicrita
	Esparita	Intrabioesparita

Clasificación de Dunham (Textural)

Esta clasificación es la más utilizada actualmente y con mayor aplicación tanto en la enseñanza como en la industria, y se basa en el tipo de relación de los componentes durante la sedimentación y del nombre de la muestra, se diferencian los nombres “soportado por los granos” (grain-supported) de “soportado por lodo” (mud-supported).

- “Soportado por lodo” significa un lodo calcáreo con componentes que “flotan” en él y entre los cuales no existe contacto.
- “Soportado por granos” se da cuando estos componentes se tocan o apoyan entre ellos.

Esta clasificación da los nombres a las rocas carbonatadas con base al tamaño de los componentes y su proporción en el total de la muestra (%). ⁴ (Tabla 6).

Tabla 6: Clasificación de carbonatos según DUNHAM (1962) modificado por Embry y Klovan (1972).

(Calizas aloctonas) Componentes primarios sin relación organogénica durante la sedimentación						(Calizas autóctonas) Componentes primarios con relación organogénica durante la sedimentación.		
Menos del 10% de componentes > 2mm			Más del 10% de componentes > 2mm			Relacionados con organismos		
Con micrita (<0.03 mm)		Sin micrita		Mud-supported	Grain-supported			
Mud-supported		Grain - Supported				Mud-supported	Grain - supported	Boundstones
Menos del 10% de componentes (> 0.03 mm < 2mm)	Mas del 10 % de componentes	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone			Bafflestone

En primer lugar DUNHAM diferencia 2 grupos de calizas ⁴:

1.- Calizas alóctonas, son aquellas cuyos componentes primarios son depositados durante la sedimentación, no quiere decir que las rocas son de origen alóctono si no que los componentes presentes no se originaron en el lugar de la depositación, y que no están asociadas a una génesis orgánica.

Seis denominaciones conforman las calizas aloctonas (Mudstone, Wackstone, Packstone, Grainstone, Floatstone y Rudstone). Se diferencian de acuerdo al tamaño de los componentes, ya sea menos del 10% de componentes mayores a 2mm. y/o si tienen más de 10% de componentes mayores a 2mm. Otro factor a considerar es si la masa básica es micrita o esparita y finalmente si se tiene una nomenclatura “soportada en lodo” o “soportada en granos”.

2.- Calizas autóctonas, son aquellas cuyos componentes primarios fueron formados durante la sedimentación con un origen organogénico, es decir “in situ”. Aunque las calizas autóctonas se dividen en tres grupos, Bafflestone, Bindstone y Framestone, se utiliza el termino Boundstone para éstas y se refiere a las calizas de origen orgánico.

La ventaja de esta clasificación es que se puede utilizar tanto en el campo como en láminas delgadas, además de que el nombre de la muestra lleva implícito el orden y arreglo de los componentes. Dos desventajas presenta esta clasificación, la primera, aunque se conozca el nombre clasificatorio de la muestra no se sabe qué tipo de componente la conforman, y la segunda es un problema del lenguaje de la clasificación ya que una traducción al español de esta clasificación no es posible y no tendría sentido ⁴.

El siguiente listado describe brevemente las principales características de las rocas clasificadas según DUNHAM

- Mudstone Menos del 10% de componentes
 - Todos menores a 2 mm.
 - Matriz: Micrita
 - Arreglo: Mud Supported

Mudstone: Generalmente indica que se depositó en corrientes de aguas tranquilas con una aparente inhibición de los organismos productores de granos, representando un ajuste de la deposición de baja energía. (Kerans and Janson)

- Wackstone Más del 10% de componentes
 - Todos menores a 2 mm.
 - Matriz: Micrita
 - Arreglo: Mud Supported

Wackestone: Generalmente indica que se depositó en corrientes de aguas tranquilas con la restricción de los organismos productores de granos, representando un ajuste de deposición de baja energía).

- Packstone Más del 10% de componentes
 - Todos menores a 2 mm.
 - Matriz: Mayormente esparítica
 - Arreglo: Grain-supported

Packstone: Indican una serie de propiedades de deposición. Sugiere procesos de baja energía, mientras que la abundancia de granos sugiere procesos de mayor energía. Dunham (1962) proporcionó varios escenarios para el origen de packstone: (1) que pueden ser producto de wackestone compactados, (2) que pueden resultar barro de infiltración de sedimentos de barro libre previamente depositados, (3) que puede el resultado de la producción de granos en aguas tranquilas, o (4) que puede grabar la mezcla por excavadores de diferentes capas de sedimentos.

- Grainstone: Más del 10% de componentes
 - Todos menores a 2 mm
 - Matriz: Exclusivamente esparita
 - Arreglo: Grain supported

Grainstone: Por lo general, se depositan en ambientes de energía alta a moderada, pero su importancia hidráulica puede variar. Dunham (1962) proporcionó varias sugerencias para su origen: (1) que se pueden producir de alta energía, los entornos de grano productiva donde el barro no pueden acumularse, (2) que pueden ser depositados por las corrientes que abandonan los granos y el barro de derivación a otra área, o (3) que puede ser un producto de criba de los sedimentos fangosos previamente depositados.

Se presentan como granos en rocas carbonato de predominio esquelético y no esquelético. La ausencia de lodo tiene varias causas: el depósito de granos en entornos de alta energía (por ejemplo, en ambientes submareales, intermareales y poco profundas), la acumulación rápida de granos que no permiten ninguna sedimentación de lodo coetánea (por ejemplo turbiditas), deposición de corrientes - ambientes controlados, aportan lodo a partir de las mezclas de grano / lodo previamente depositados. Son muy variables en cuanto al tipo de grano, forma, tamaño y clasificación.

Están relacionados con el lugar de absorción de energía de las olas como los litorales, bajíos o roturas de la plataforma. Forman acumulaciones gruesas en los márgenes exteriores de la plataforma o en entornos del interior de la rampa. Los bancos de 'islas de margen "se producen en los cinturones de barras mareales, deltas mareales, cinturones de arena marinos, zonas de arrecifes, en las playas y en las dunas subaéreas. También pueden originarse por debajo de la onda de barrido debido a los efectos actuales. Debido a sus altas porosidades entre partículas y la posibilidad de porosidad secundaria móldica causada por la disolución de los granos.

- Floatstone Más del 10% de componentes
 - Mayores a 2 mm
 - Matriz: Micritica / Esparita
 - Arreglo: Mud Supported

Floatstone: En los casos en que los granos wackstones son excepcionalmente grandes, Embry y Klován (1971) designan estos carbonatos "floatstones."

Son rocas carbonatadas de matriz - apoyada El límite de 2 mm crea dificultades para aplicar el término a calizas fosilíferas con oncoides porque el tamaño de los granos del esqueleto en las oncoides sólo puede reflejar las etapas de crecimiento. Este término se aplica a una piedra caliza de caracoles adultos en la categoría floatstones y las calizas que contienen los mismos, pero de caracoles juveniles en la categoría wackstone. Téngase en cuenta que floatstone y Rudstone se propuso originalmente para carbonatos arrecifales y brechas carbonatadas.

- Rudstone Más del 10% de componentes
 - Mayores a 2 mm
 - Matriz: Micritica / Esparita
 - Arreglo: Gran Suportad.

En los casos en que los granos packstones son excepcionalmente grandes, (Embry y Klovan (1971)) designan estos carbonatos "rudstones."

Muchas brechas pertenecen a esta categoría. La formación de las rudstones tiene como factor común la erosión y el transporte. La erosión puede desencadenarse por ajuste de agua poco profunda que permite la destrucción por tormentas. Las pendientes son escenario deposicional común de las rudstones.

Boundstone: Las rocas carbonatadas que muestran signos de estar atados durante la deposición (Dunham, 1962).

1.4 Plataforma Carbonatada de Yucatán.

La región que comprende a la península de Yucatán abarca una extensión de 500,000 km², cuyo único bloque tectónico carece de plegamientos, el cual pertenece a la era paleozoica y su límite tectónico está conformado por la falla de Motagua.

En la parte de basamento de esta región, se han acumulado millones de metros cúbicos de sedimentos originados en el paleozoico tardío; por encima de estos sedimentos se localizan sedimentos continentales correspondientes al jurásico.}Estas configuraciones estratigráficas han dado origen a un sistema de depósito enorme de rocas evaporitas, las cuales han dado origen a la plataforma carbonatada conocida actualmente. La distribución de carbonatos en la plataforma carbonatada de Yucatán alberga distintas eras geológicas (Fig. 1.32).

La columna geológica correspondiente a esta plataforma carbonatada contempla solo la mitad de los periodos de depósito que han ocurrido en esta región. Esto se debe a que el depósito de carbonatos comienza después de la acumulación de brechas de impacto en el jurásico (Hernández Juárez, 2013).

El ambiente de plataforma es una unidad modelada tanto por procesos marinos como por depositación de sedimentos y precipitación de carbonatos, además de la depositación de organismos con testas o partes rígidas de su cuerpo, constituida por carbonato de calcio. También han influenciado a la plataforma los procesos subaereos, al haber quedado expuesta hace 18,000 años, durante el descenso del nivel del mar en la última glaciación.

La plataforma carece de valles erosivos, debido a la importante infiltración y consecuente disolución – erosión de la masa rocosa, constituida por gruesos depósitos de carbonato de calcio (CaCO₃), carbonato doble de calcio y magnesio (CaMg(CO₃)₂), que constituyen a la roca caliza y dolomía respectivamente, así como rocas evaporíticas como anhidrita (CaSO₄), yeso (CaSO₄·2H₂O) y halita (NaCl).

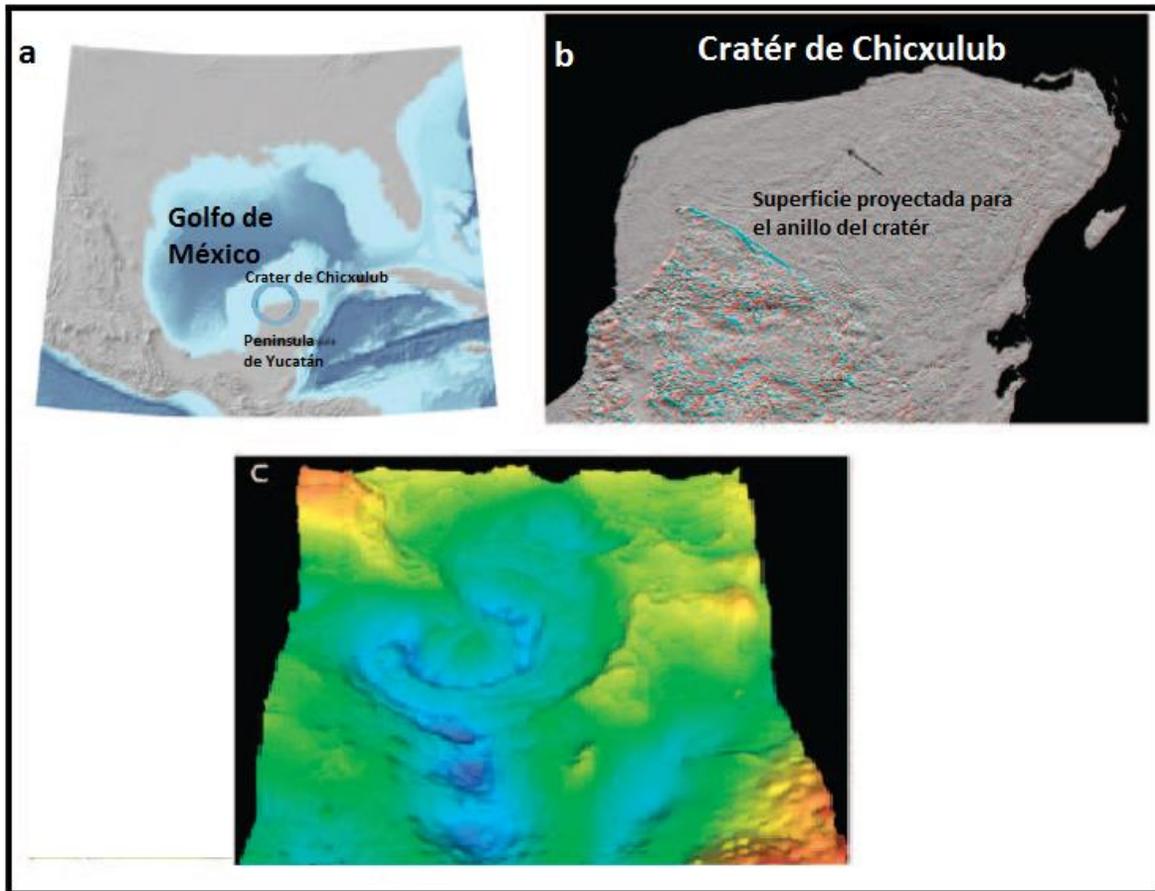


Fig. 1.32 Cráter de Chicxulub, Yucatán, México

A partir del análisis granulométrico, se definieron cuatro clases texturales de sedimentos (Tabla 7):

Tabla 7. Clases texturales de sedimentos en la plataforma de Yucatán	
Textura	Contenido de arena
Arena	➤ 90%
Arena Lodosa	50% - 90%
Lodo Arenoso	10% - 50%
Lodo	<10%

El relieve submarino es notoriamente modelado por la sedimentación; el límite entre las zonas de precipitación de carbonatos y deposición de terrígenos no es brusco, sino transicional. Para la definición de unidades de relieve, el cambio se define por el contacto que contrasta a los sedimentos lodosos de los arenosos.

Se reconoció que el borde continental está estrechamente relacionado con la historia tectónica del Golfo de México, en especial con el Bloque Yucatán. Se definieron fallas normales y fallas de carácter transcurrente, que pudieron relacionarse con el movimiento de rotación de la plataforma de Yucatán

En el talud de Campeche se tienen fracturas que favorecen el desarrollo de cañones – corredores submarinos, estas fracturas cortan el talud y se prolongan hasta la plataforma continental de Campeche Yucatán.

Como puede apreciarse en la Fig. 1.33 sobre el escarpe de Yucatán existen fallas normales que han generado la existencia de escalones definiendo así un talud superior y otro inferior ⁷.

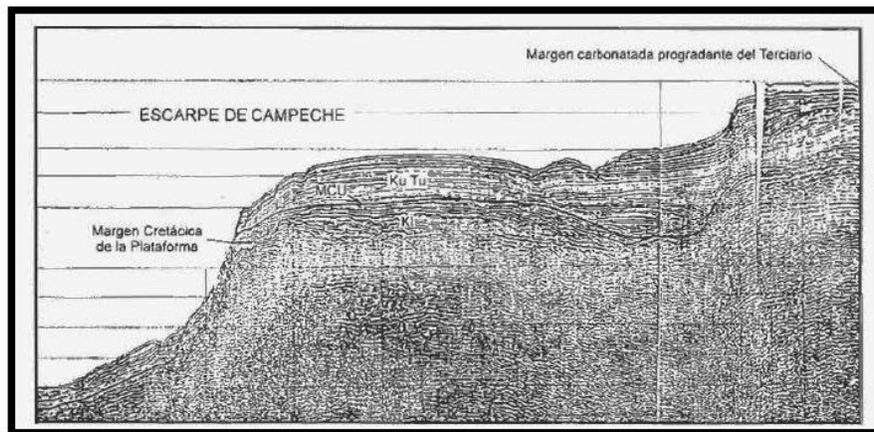


Fig. 1.33 Escarpe de Yucatán

Pozo Tecoh

El Pozo Tecoh se encuentra a 80,5 km., del Puerto de Chicxulub, dentro del anillo de cenotes. La profundidad de su perforación es de 559 m. y la longitud de los núcleos recuperados es de 479 m., desde la superficie hasta el fondo, consiste en lo siguiente: 1,7 m del suelo y caliche, seguido de piedra caliza cristalina con 14 m. de una intercalación de calcarenitas dolomitizadas, 95 m., de piedra caliza cristalina dolomitizada fosilífera y 10 m. de piedra caliza arcillosa, y luego otro de 10 m. de caliza cristalina dolomitizada. Esta secuencia es seguida por 41 m. de calizas arcillosas con fósiles (10% a 30% de contenido de fósiles), y luego otro de 10 m de la piedra caliza cristalina dolomitizada y 50 m. de calizas arcillosas. Una secuencia de caliza cristalina dolomitizada con grado de fósiles hacia abajo con calizas cristalinas dolomitizadas y sin fósiles, la parte final que consiste de 178 m. de calizas arcillosas, con nódulos de sílex. (Fig. 1.34)



Fig. 1.34 Ubicación del Pozo Tecoh

La perforación del pozo Tecoh se llevó a cabo con el equipo de perforación rotatoria compuesto por dos equipos de perforación JKS Boyles, modelos BBS - 45 y -37 BBS. El engranaje de perforación consistió en tubos con HQ (8.89 cm.), NQ (6,69 cm.) Y BQ (5.55 cm.), de diámetro estándar, barriles de muestreo, bits con corona de diamantes impregnados además de varias herramientas y equipo adicional para el agua de bombeo, que se utilizó como fluido de perforación. La tubería HQ rinde con un diámetro del núcleo de 5,6 cm. NQ produce con un diámetro del núcleo de 4,8 cm, y se obtiene un BQ con un diámetro del núcleo de 3,7 cm (Fig. 1.35).



Fig. 1.35 Torre de perforación del programa de perforaciones científicas Chicxulub.

Las muestras de roca se lavaron en el lugar, marcadas con profundidad de arriba - abajo (flechas apuntando hacia abajo), y en cajas. Las muestras se almacenaron en el sitio hasta que la campaña había terminado, en el que las muestras fueron transferidas a una instalación central en la UNAM (Repositorio de núcleos de Chicxulub) para la descripción y análisis de laboratorio de los mismos.

2. Registros Geofísicos

2.1 Definición, Uso y Ventajas de su Aplicación.

Los registros geofísicos de pozos son técnicas que se utilizan para determinar casi de manera directa propiedades y parámetros físicos de las rocas. Tradicionalmente se le ha definido como “la representación digital o analógica de una propiedad física que se mide contra la profundidad”.

Actualmente se utilizan para determinar el contenido de hidrocarburos, agua, minerales y composición de las rocas que están sujetas a diferentes esfuerzos, también sirven para localizar y analizar rocas arcillosas con composición compleja. El uso de registros ha ayudado a comprender mejor las características del subsuelo. Los avances actuales están llegando a predecir la productividad y la permeabilidad de formaciones productoras de hidrocarburos.

Los registros de pozos son técnicas que se utilizan en pozos para la exploración y explotación petrolera, minera, geohidrológica, geotérmica y geotécnica. Sirven para determinar in situ propiedades físicas de las rocas. Se distinguen de otros métodos geofísicos porque proporcionan un diagnóstico más confiable de las condiciones de las rocas que están en el subsuelo, de la tubería de revestimiento y de la cementación, miden directamente las propiedades físicas ayudando a verificar los parámetros medidos en la superficie.

La mayor ventaja que han tenido es en el área de ingeniería petrolera, aunque actualmente se han difundido a varias áreas dadas su confiabilidad y versatilidad. Son más económicos que los núcleos; además que proporcionan información continua de todo el pozo, tienen un mayor radio de investigación. La aplicación de un conjunto de registros en cualquier área representa alrededor del 5 al 10 % del costo de un pozo en proceso de operación.

Un registro geofísico de pozos es una representación digital o analógica de una propiedad física que se mide contra la profundidad. Su obtención se realiza a partir de una sonda que va recorriendo la trayectoria del pozo y de un equipo superficial que traduce la información enviada por la sonda a través de un cable que se registra en una cinta magnética o película fotográfica.¹²

Las sondas son cilindros de metal que tienen en su parte interior circuitos electrónicos muy sofisticados que varían de acuerdo, a la propiedad que mide, a las necesidades de investigación, condiciones, profundidad del pozo. La manera de medir las distintas propiedades de las rocas parte de un sistema básico común; un emisor (electrodo, bobina, emisor de radioactividad, emisor de neutrones, emisor de ondas acústicas) que envía una señal (corriente eléctrica, campo electromagnético, radioactividad, neutrones u ondas acústicas) hacia la formación. Uno o varios receptores miden la respuesta de la formación a cierta distancia del emisor.

En la actualidad los registros son adecuados para la determinación del contenido de hidrocarburos, agua, minerales, y competencia de las rocas sujetas a diferentes esfuerzos, también para localizar

formaciones de alta y baja porosidad, identificar lutitas, formaciones de litología compleja, condiciones del agujero y tubería. Además, se está tratando de predecir con estos registros la productividad del yacimiento y la permeabilidad. (Fig. 2.1)

La introducción de las computadoras dentro de los equipos de registro ha ayudado a agilizar el procesamiento de la información y emitiendo un diagnóstico en el mismo pozo a tiempo real. Una interpretación más a detalle se realiza en los centros de proceso que tiene las compañías de servicio en algunas ciudades. Allí se hace un análisis en el que se puede llegar a determinar variaciones en las estructuras geológicas, arcillosidad de la formación, cantidad de dolomitización en una secuencia de carbonatos, etc. Con la información obtenida del análisis se pueden realizar mapas que ayudaran al geólogo en su interpretación de la geología del subsuelo.

Los pozos se pueden dividir de acuerdo a la operación que se esté realizando en: Exploratorias, de Desarrollo y de Relleno. Cada uno de estos cumple y cubre propositos en la exploración y explotación de los recursos del subsuelo.

Los registros de pozos identifican cuantitativamente el tipo de roca atravesada por el pozo, miden propiedades químicas y físicas de las rocas las cuales se correlacionan con las muestras de canal y núcleos extraídos durante la perforación. Las lutitas y arcillas, yeso, gas y anhídrita son las que más distorsionan la medición por lo que requieren de un tratamiento especial.

En seguida se presenta una breve introducción al análisis e interpretación de los registros geofísicos de interés en este trabajo describiendo las siguientes propiedades de las rocas y determinar la capacidad de éstas para contener algún fluido o mineral de interés, su volumen relativo y la habilidad de los fluidos a escapar de la formación hacia el pozo. ¹⁵

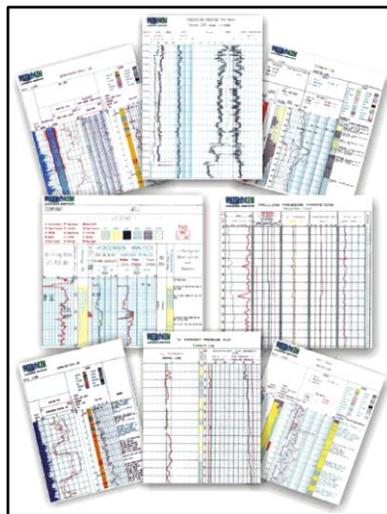
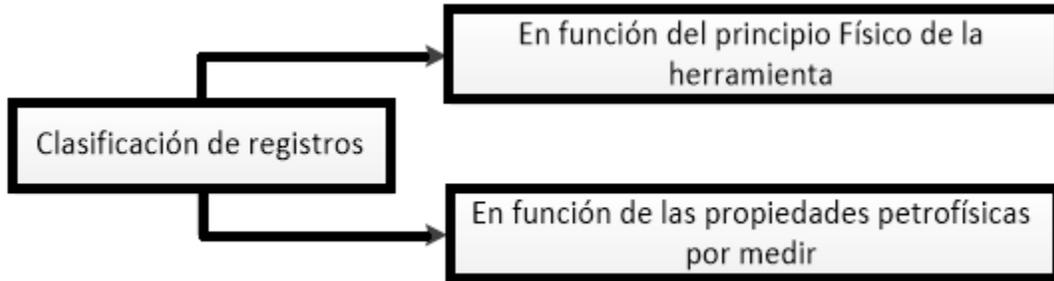


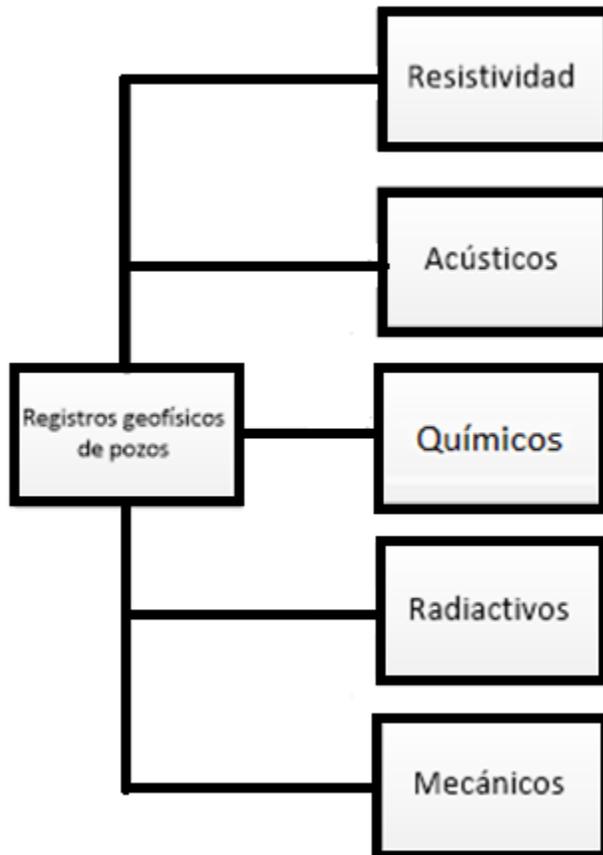
Fig. 2.1 Ejemplos de Registros Geofísicos

2.2 Clasificación de Registros Geofísicos

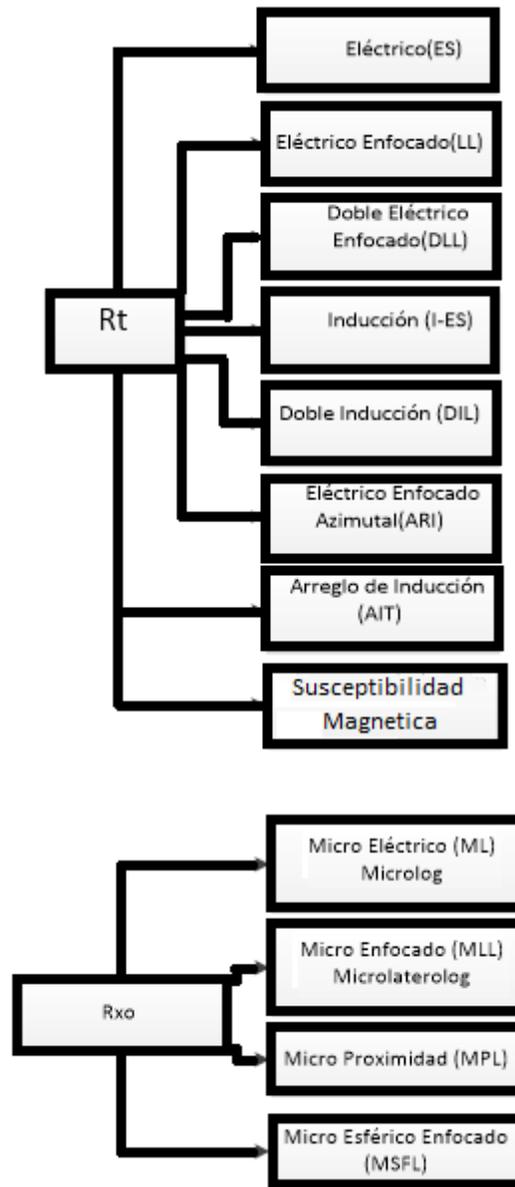
Existen diferentes clasificaciones de los registros geofísicos dependiendo del perfil que se le desee dar en la interpretación. ¹¹



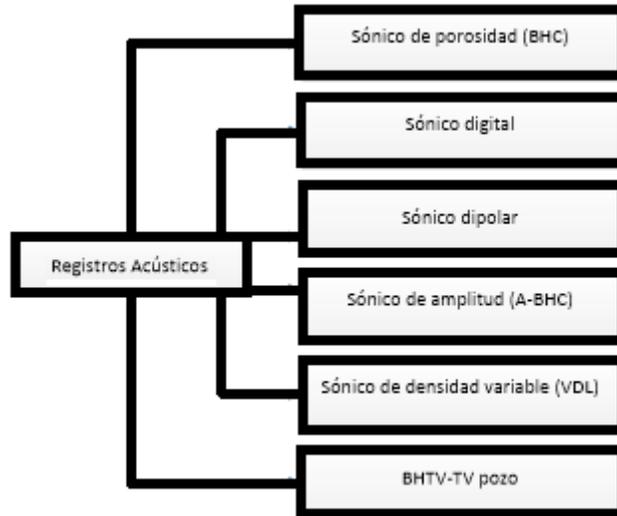
Clasificación de Registros Geofísicos de Pozos con Respecto al Principio Físico de la Herramienta ¹¹



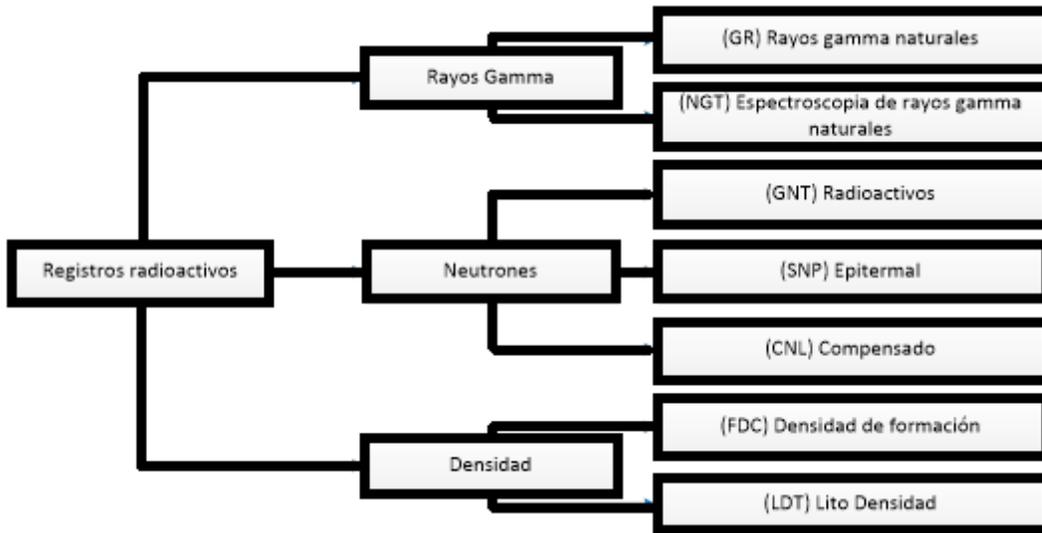
Tipos de Registros Resistivos y Magnéticos ¹¹



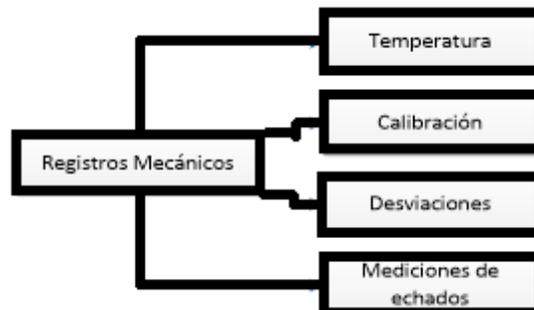
Registros Acústicos ¹¹



Registros Radiactivos ¹¹



Registros Mecánicos ¹¹



2.3 Tipos de Registros Geofísicos

Registro de Potencial Espontáneo

Dentro de los pozos ocurren potenciales naturales (SP) que se miden a partir de un electrodo que va recorriendo las paredes del pozo y otro colocado en la presa del lodo, en la superficie. La diferencia de potencial entre los electrodos se registra en función de la profundidad. El potencial que se desarrolla dentro del agujero es el resultado de la diferencia de salinidad entre el fluido de perforación (lodo) y el agua de la formación. ¹³ (Fig 2.2)

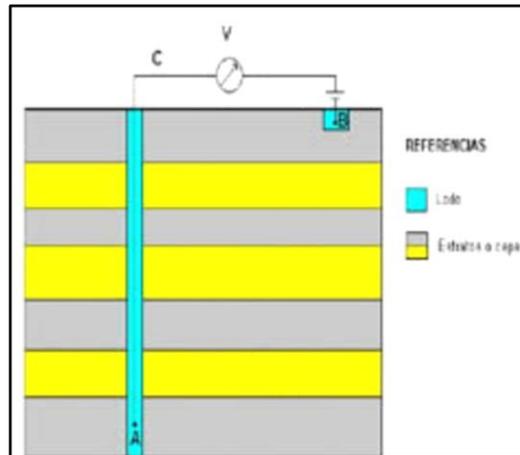


Fig. 2.2 Principio físico del registro SP

El principal uso de la curva SP es para diferenciar las capas impermeables, eléctricamente conductoras, (tales como las lutitas), de las capas permeables. Como es una indicadora de la permeabilidad iónica, las deflexiones están controladas por el contraste de resistividad entre el lodo de perforación, por lo que es conveniente conocer la resistividad del lodo para poder calcular la resistividad del agua (Fig. 2.3).

Las capas impermeables tienen una tendencia a ser estables, generalmente se presentan en el registro hacia la parte derecha del carril izquierdo. Las deflexiones ya sea hacia la izquierda o derecha de esta línea, conocida como línea base de lutitas, indican permeabilidad. Que la deflexión de la curva de SP en zonas permeables sea hacia la izquierda o hacia la derecha, dependerá de que la salinidad del agua de formación sea mayor o menor respectivamente que la del fluido de perforación. El espesor de la capa y la arcilla afectan las magnitudes de la curva por lo que en capas delgadas menores de 5 m deben hacerse correcciones antes de calcular la resistividad del agua de formación. ¹⁵

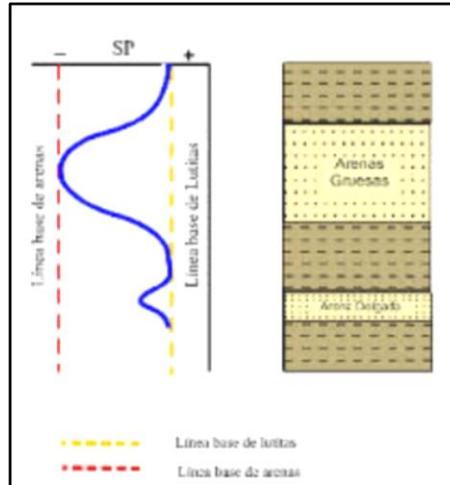


Fig. 2.3 Respuesta del registro SP

Registros de resistividad

El registro eléctrico es el primero que se ocupa comercialmente para conocer la resistividad de las rocas. Está compuesto por dos electrodos de corriente y dos de potencial que están colocados a diferente espaciamento dentro de una sonda. El espaciamento de los electrodos proporciona la profundidad de penetración de la corriente. Este registro actualmente ya no se utiliza en la industria petrolera y su mayor aplicación es en la minería y geo hidrología. ¹³ (Fig. 2.4)

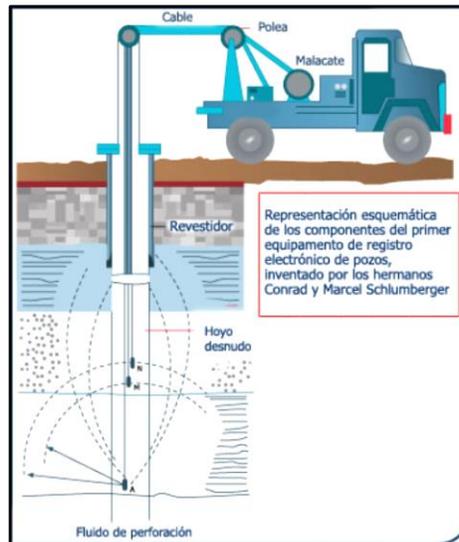


Fig. 2.4 Primer equipo de registros eléctricos

Las herramientas de resistividad que se utilizan actualmente en la industria petrolera tienen más de cuatro electrodos, se les conoce como registros laterolog o de Guarda. El propósito que tienen es el

de enfocar la corriente dentro de la formación y reducir los efectos de capas adyacentes y de agujero. La profundidad de penetración de la corriente depende del espaciamiento de los electrodos. Tiene la ventaja de que puede correrse más de un arreglo simultáneamente. Se puede observar y cuantificar la invasión del filtrado del lodo. ¹¹ (Fig. 2.5).

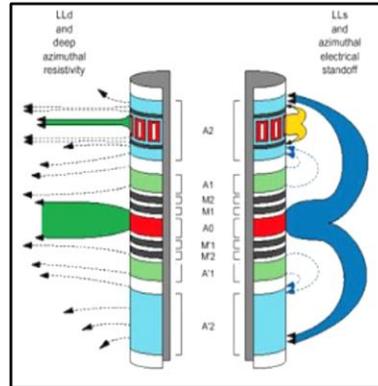


Fig. 2.5 Principio físico del registro eléctrico

Los registros laterolog son eficaces en situaciones donde la resistividad del lodo es menor que la resistividad del agua de la formación. El tamaño de agujero y el espesor de capa afectan muy poco la respuesta de registro. Se pueden considerar los valores como verdaderos. Estos registros se utilizan en yacimientos de carbonatos. Cuando las salinidades de los fluidos de perforación y formación son muy semejantes, no se genera la curva SP. En este caso se obtiene el registro de Rayos Gamma Naturales. ¹⁵

Registro de Inducción.

La resistividad también se puede medir con herramientas que tienen bobinas. La ventaja de estos sistemas es que se pueden ocupar en agujeros secos o con lodos base aceite. De igual manera que los Laterolog, tienen combinaciones de bobinas para enfocar el campo eléctrico hacia la formación. La separación entre bobinas proporciona diferentes profundidades de investigación dentro de la formación. A través de la comparación de curvas de diferente penetración se puede observar y cuantificar la invasión del filtrado del lodo. ¹³ (Fig. 2.6).

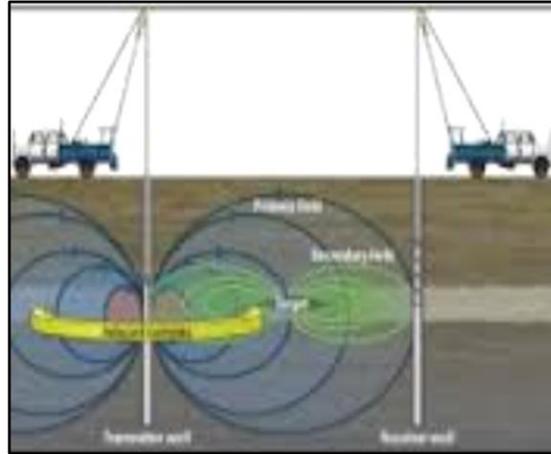


Fig. 2.6 Toma de registro de Inducción

Las herramientas son más efectivas en formaciones de baja resistividad, el rango óptimo es de hasta 200 ohm – m, se ocupan con éxito en secuencias de arenisca – lutita, donde existe invasión profunda, los sistemas de doble inducción son menos eficaces.

Los efectos de agujero son muy pequeños, excepto cuando es muy salado. Las herramientas miden la conductividad eléctrica de la roca. El equipo superficial hace el cálculo y el registro presenta las dos curvas. Cuando se requiere hacer una interpretación cuantitativa en una zona poco resistiva, se recomienda obtener los datos de la curva de conductividad. ¹⁵

Registro de Micro Resistividad.

Se les conoce también como registros de porosidad - resistividad. Existen varias herramientas que son muy semejantes a las herramientas convencionales, solo que en este caso los electrodos van montados en un patín que va adherido a la pared del pozo. Las herramientas que existen son la Microlog, Microlaterolog, Proximidad y Microesferico Enfocada. Tienen una profundidad de investigación muy somera con el propósito de medir la resistividad a la zona de invasión (R_{xo}). La razón por la que se les llama dispositivos de porosidad es porque la relación R_{xo}/R_{mf} da el factor de formación. Si se considera que la zona de invasión está saturada 100% con filtrado del lodo, a partir del factor de formación y utilizando la relación de Archie se puede calcular la porosidad. Por otro lado si la zona de invasión contiene hidrocarburos, el factor de formación que se obtiene se compara con el factor de formación obtenido de algún dispositivo de porosidad y se calcula la saturación residual de hidrocarburos. Estas herramientas se utilizan también para determinar cualitativamente fracturamiento y permeabilidad. ¹³ (Fig. 2.7)

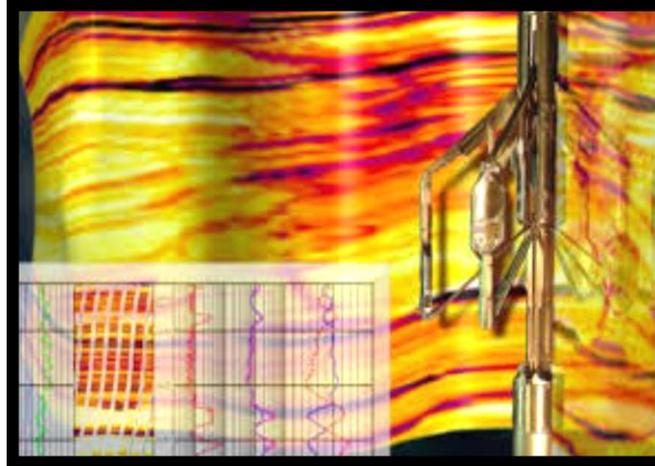


Fig. 2.7 Registro de microresistividad (Imagen)

Registro sísmico

Con el uso de varios transmisores y receptores, el registro sísmico mide el tiempo mínimo que tarda un pulso acústico en viajar a través de la roca. La distancia que se recorre varía de dispositivo a dispositivo, la más común es de 2 pies entre el transmisor y el receptor más alejado. El tiempo total que requiere un pulso para viajar a través de la roca es proporcional a la cantidad de fluido en el espacio poroso y a la cantidad de matriz. ¹⁵ (Fig. 2.8)

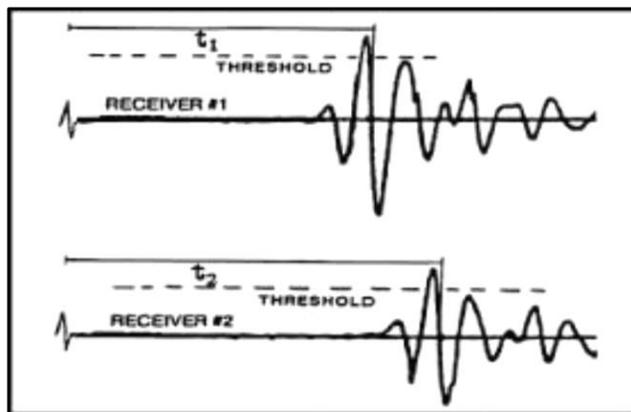


Fig. 2.8 Principio físico del registro sísmico de porosidad

La ecuación que relaciona la medición del tiempo de tránsito del registro con la porosidad es:

$$\varphi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

φ : Porosidad

Δt : Tiempo de tránsito medido por el registro, $\mu\text{seg}/\text{pie}$.

Δt_{ma} : Tiempo de tránsito de la matriz, $\mu\text{seg}/\text{pie}$.

Δt_f : Tiempo de tránsito del fluido, $\mu\text{seg}/\text{pie}$.

Los dos últimos valores se obtienen de acuerdo al tipo de roca y al tipo de fluido, estos valores son conocidos. (Martell, 2014)

La herramienta es más efectiva en formaciones consolidadas y compactas. Donde la roca no está consolidada, el tiempo de tránsito está influenciado por los fluidos de la formación y por la arcillosidad. En esta situación hay que multiplicar el valor obtenido en la ecuación (9) por un factor de compactación.

$$\varphi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \cdot \frac{1}{Bcp} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

$$Bcp = \frac{\Delta t_{scxc}}{100} \dots\dots\dots (4)$$

Dónde: Δt_{sh} es el tiempo de tránsito de la lutita, $\mu\text{seg}/\text{pie}$ y c es una constante que toma el valor de 0.8 y 1.2 (valor empírico)

Para ocupar este factor se requiere que el tiempo de tránsito en la zona de lutitas sea mayor de 100 $\mu\text{seg}/\text{pie}$. (Martell, 2014)

Ya que este dispositivo mide el primer arribo de los pulsos acústicos, estos normalmente se entrampan en alguna cavidad o fractura, retardando el tiempo de llegada de la onda. El rango óptimo de efectividad de la sonda esta entre 5 y 20% de porosidad. (Carrasco, 1996)

Registro de Densidad

Es un registro radioactivo, de los denominados de pared, pueden tomarse tanto en agujeros llenos con lodo como en agujeros vacíos. Por medio de este se obtiene la densidad total de la formación. El equipo moderno consta de una fuente emisora y dos detectores de rayos gamma.

Los rayos gamma tienen la particularidad de viajar en línea recta, así como pueden ser desviados, moderados o absorbidos, por la formación. El material con que está constituida la roca de la formación tiene una cierta densidad electrónica. La densidad total de la formación es función de la densidad del material que constituye la matriz de la roca, de su porosidad y de la densidad de los

fluidos contenidos en ella. La intensidad de rayos gamma registrada por el detector será inversamente proporcional a la densidad de la formación. ¹³ (Fig. 2.9)

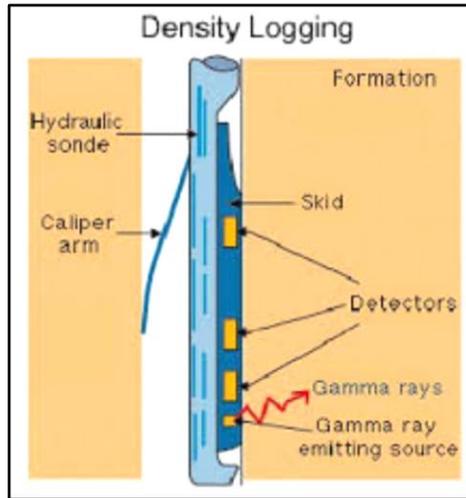


Fig. 2.9 Sonda de un registro de densidad

La ecuación que relaciona la densidad con la porosidad se expresa como:

$$\varphi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

ρ_{ma} : Densidad de la matriz gr/cc.

ρ_b : Densidad del registro gr/cc.

ρ_f : Densidad del fluido gr/cc.

Los valores de ρ_{ma} dependen del tipo de litología, los de ρ_f toman valores entre 1.0 y 1.1 dependiendo de la salinidad del fluido. Cuando existe presencia de gas el comportamiento del registro varía considerablemente.

El detector cercano a la fuente se ocupa de compensar los efectos de espesor, de enjarre y rugosidad del agujero. La presentación del registro incluye la curva ρ_b y la curva $\Delta\rho_b$ que es la cantidad de corrección que fue necesaria aplicar una vía de detector corto para obtener ρ_b ; sirve como control de calidad del registro.

El registro de densidad es una de las herramientas más efectivas y usadas en la industria petrolera. Se ocupa para determinar la porosidad, para evaluar la litología de una formación en combinación con otras herramientas y para correlacionarlo con datos de gravedad superficial. Da un valor muy exacto de la porosidad efectiva en arenas arcillosas. En combinación con otros registros, proporciona información de la litología, contenido de lutita, gas, saturación de fluido y espesor de enjarre. Cuando se usa en combinación con los datos del registro sísmico se pueden obtener módulos

elásticos y reflectividad acústica. Los datos de densidad pueden ayudar a determinar zonas muy compactas expuestas a una sobre presión.

Existen limitaciones en la operación de esta herramienta. Tiene muy poca profundidad de investigación. En secuencias de carbonato donde las porosidades de fractura y de cavidades son componentes importantes de la porosidad total y permeabilidad del sistema. El instrumento de medición es más eficiente donde la porosidad es heterogénea y tiene rangos entre 10 y 35%.¹⁵

Registro de Neutrones

Los registros de neutrones son de dos tipos. El primero tiene una fuente y un detector, es un sistema que va adherido a la pared del pozo. El receptor en este caso mide neutrones epitermales de la fuente.¹³ (Fig. 2.10)

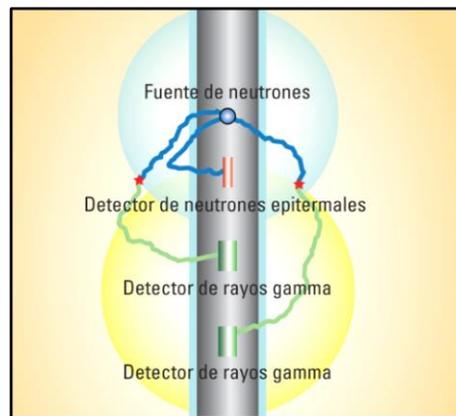


Fig. 2.10 Sonda de registro de neutrones

El segundo y más común tiene una fuente y dos receptores que miden neutrones termales., tiene un sistema que compensa por rugosidad y diámetro de agujero. En ambos casos el principio es básicamente el mismo.

Los detectores miden el flujo de neutrones a un nivel de energía particular, de acuerdo con esto, miden cuanta energía de los neutrones ha disminuido a partir de la fuente. La alta energía de los neutrones disminuye por la colisión con los núcleos atómicos de varios elementos en la formación. Los elementos que tienen una masa atómica muy cercana a la de los neutrones tienden a detenerlos como el hidrogeno. Es por ello que se dice que la herramienta mide el contenido de hidrogeno que es proporcional a la porosidad. La respuesta se calibra en rocas saturadas con agua. Cuando hay presencia de gas en la formación la atenuación de los neutrones es menor, en esta situación el registro de valores pesimistas. En zonas arcillosas y con yeso la herramienta da un valor mayor de porosidad.

La calibración de las herramientas se lleva a cabo en secuencias de calizas en unidades API. Se define una unidad API como la milésima parte de la respuesta radioactiva de una roca tipo que se localiza en un pozo de calibración en la Universidad de Houston.

Existen curvas de corrección disponibles para areniscas y dolomita. Las herramientas funcionan mejor en formaciones no arcillosas y con rango de porosidad menor del 25%. ¹²

2.4 Registro de Susceptibilidad Magnética

Propiedades Magnéticas de la Materia

La base experimental para su estudio es la presencia de materia que modifica el campo magnético producido por circuitos. El origen de este efecto son las corrientes circulares que producen los momentos dipolares magnéticos atómicos en el interior de la materia.

Todos los efectos magnéticos de la materia se pueden interpretar basándose en los lazos de corriente o en sus dipolos magnéticos. ¹⁹

Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo

El campo magnético se produce por el momento de carga eléctrica, el cual a nivel atómico es producido por el movimiento de un electrón, así todas las sustancias son magnéticas y pueden ser clasificadas como diamagnéticas, paramagnéticas o ferromagnéticas (Fig. 2.11). ¹⁶

Diamagnetismo

El diamagnetismo resulta de los momentos magnéticos negativos en toda la materia debido a la aplicación de un campo magnético exterior.

Este se caracteriza por una susceptibilidad magnética negativa y es independiente de la temperatura.

Puesto que el diamagnetismo es pequeño comparado con la magnetización paramagnética (y ferromagnética), se puede observar directamente solamente en materiales que son no magnéticos.

La susceptibilidad magnética negativa se puede explicar basándose en la Inducción de Faraday que actúa sobre los movimientos orbitales de los electrones en átomos o iones.

Diamagnetismo en las rocas

La respuesta diamagnética a la aplicación de un campo magnético es la adquisición de una pequeña magnetización inducida. M_i , opuestas al campo aplicado. H (magnetización antiparalela). La

magnetización depende linealmente del campo aplicado, y se reduce a cero al remover el campo. Los materiales diamagnéticos se caracterizan porque en ellos el momento magnético atómico es cero, la susceptibilidad es negativa, es independiente de la temperatura y del orden de 10^{-5} SI; ejemplos de este tipo de sustancias son el cuarzo, la calcita y el agua. ¹⁹

Paramagnetismo

La característica esencial de un material paramagnético es que tiene una susceptibilidad magnética positiva (aunque pequeña, $\chi_m \gg 1$) que resulta de la existencia de dipolos magnéticos permanentes, que están libres de orientarse bajo la influencia de un campo externo. Los dipolos ejercen fuerzas muy pequeñas entre sí, y por lo tanto a temperaturas ordinarias, las vibraciones térmicas del sólido aseguran la orientación aleatoria de los dipolos, dando una magnetización promedio igual a cero.

A un mejor campo magnético aplicado, mejor alineados de los dipolos magnéticos, y es mayor el momento magnético neto por unidad de volumen.

La dependencia de la susceptibilidad de los materiales paramagnéticos del recíproco de la temperatura T se conoce como Ley de Curie. ¹⁹

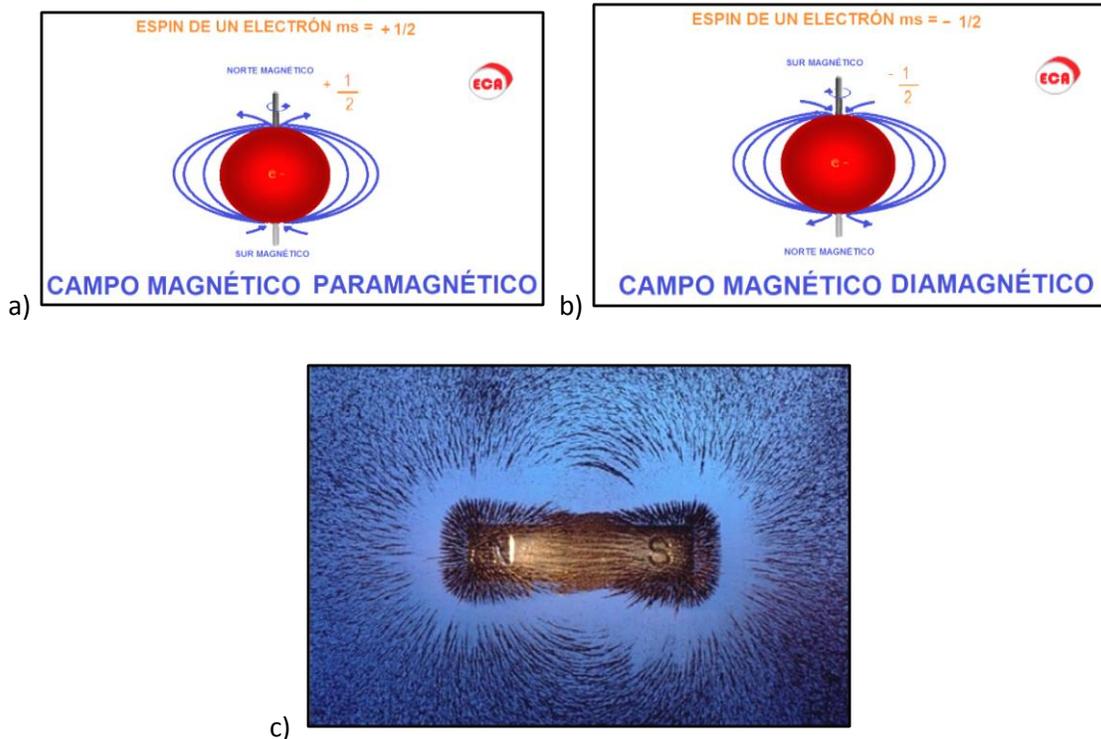


Fig. 2.11a. Campo Magnético Paramagnético, 2.11b. Campo Magnético Diamagnético

2.11c. Campo Ferromagnético

Ferromagnetismo

La fuerza entre elementos de corriente se describe por medio de un campo magnético B debido a un elemento de corriente que actúa sobre la corriente en el otro elemento de corriente. El efecto de la presencia de materia es modificar los campos magnéticos interiores y exteriores al espécimen magnético.

Básicamente, las propiedades magnéticas de la materia son el resultado de las corrientes atómicas microscópicas que producen momentos magnéticos en la materia.

Si el material del espécimen es isotrópico, como más frecuentemente es el caso, el efecto del campo externo es inducir dipolos magnéticos, que en promedio, están alineados con sus momentos en la dirección del campo aplicado.

Existen dos clases de materiales en los que el efecto del campo magnético es proporcional al campo aplicado.

En los materiales paramagnéticos existen momentos magnéticos permanentes asociados con el momento angular intrínseco, (s pin) del electrón. En ausencia de un campo externo estos momentos magnéticos están orientados aleatoriamente. Un campo aplicado tiende a orientar estos momentos en la dirección del campo aplicado.

En los materiales diamagnéticos, todos los momentos intrínsecos, del electrón se conectan por pares de electrones con momentos. Orientados opuestamente, un fenómeno mecánico cuántico.

El efecto magnético restante se debe al momento orbital de los electrones atómicos. La inducción de Faraday debido a los campos externos tiene como efecto a una perturbación del movimiento orbital de los electrones que da como resultado a dipolos magnéticos orientados en dirección opuesta a la del campo aplicado.

De esta manera, los materiales paramagnéticos se alzan amplificando el campo magnético aplicado mientras que los materiales diamagnéticos lo debilitan.

Ambos efectos son proporcionales a la intensidad del campo aplicado.

Generalmente los efectos paramagnéticos son mucho mayores que los efectos diamagnéticos.

Los efectos diamagnéticos están presentes en todos los materiales, pero si también está presente un efecto paramagnético, este ϕ eclipsa el efecto diamagnético negativo, y el material tiene un paramagnetismo positivo.

Este efecto es el más fácil para observar de todos los efectos magnéticos. En el comienzo del estudio del magnetismo, el ferromagnetismo se denomina así debido a su aparición en hierro metálico y en varios materiales férricos. Experimentalmente se sabe que aunque la magnetización usualmente no es proporcional al campo magnético, como en los materiales diamagnéticos y

paramagnéticos, en determinadas situaciones se puede medir valores de susceptibilidad de varios miles y se pueden obtener valores de magnetización más elevados.

El valor de la magnetización depende no solamente del campo aplicado, sino también de la historia previa de la muestra o espécimen.

En algunos casos, una muestra puede retener la magnetización aun en ausencia de un campo externo aplicado. Este es el origen de los imanes permanentes que son tan familiares.

Es de interés histórico notar que los imanes permanentes se conocen al menos desde hace 2500 años, aunque la conexión del magnetismo con cargas en movimiento fue descubierto por Ørsted, en 1820.

El origen de los momentos magnéticos en los materiales ferromagnéticos se debe a los momentos magnéticos del espín del electrón. La gran diferencia, no obstante, es que en los materiales ferromagnéticos existe una gran interacción entre los espines que los obliga a alinearse paralelamente uno con otro. Aun a temperatura ambiente las torcas (momentos torsionantes) de interacción son tan fuertes que las vibraciones térmicas no pueden destruir el alineamiento.

El origen de la interacción entre los dipolos en el ferromagnéticos es de naturaleza mecánico – eléctrica.

Solamente cuando un material ferromagnético se calienta a una temperatura muy elevada es cuando los movimientos térmicos son suficientes para destruir el alineamiento; esto excusa que el material cambie su comportamiento de ferromagnético a material paramagnético.

$$\bar{B} = \bar{H} + 4\pi\bar{M}.....(1)$$

\bar{B} = Inducción Magnética

\bar{H} = Intensidad del campo magnetico

\bar{M} = Magnetización

En electrostática \bar{B} y \bar{H} se relacionan por la ecuación constituidas.

$$\bar{B} = \mu\bar{H}(2)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética.

Para materiales paramagnéticos, $\mu > 1$ y depende de la temperatura.

Para materiales diamagnéticos, $\mu < 1$ y es independiente de la temperatura.

Para materiales ferromagnéticos no existe una relación única entre \bar{B} y \bar{H} ¹⁹

El ferromagnetismo en las rocas

Los materiales paramagnéticos contienen átomos con momentos magnéticos atómicos diferentes de cero y adquieren una magnetización inducida, M_i , paralela al campo aplicado, H , para cualquier condición geológica relevante, M_i , es linealmente dependiente de H ; al igual que en los materiales diamagnéticos, la magnetización se reduce a cero cuando se quita el campo magnetizante. El paramagnetismo es un fenómeno muy dependiente de la temperatura, esta es la ley de Curie de susceptibilidad paramagnética, la cual predice que la susceptibilidad disminuye con el aumento de la temperatura y se aplica a cualquier situación típica en magnetismo de rocas. El olivino, piroxeno y el anfíbol, son ejemplos de sustancias paramagnéticas.

Los sólidos ferromagnéticos tienen átomos con momentos magnéticos diferentes de cero, estos si interactúan fuertemente con los momentos atómicos adyacentes, este efecto produce magnetización de varios ordenes de magnitud mayores que los sólidos paramagnéticos en el mismo campo magnetizante. Para cierto material ferromagnético y temperatura dada existe una magnetización máxima llamada magnetización de saturación, M_s , ésta disminuye conforme aumenta la temperatura, y es cero en la temperatura Curie, T_c , característica de cada mineral ferromagnético (580°C para magnetita y 680°C para hematita), para temperaturas mayores a la T_c el material se vuelve paramagnético. La propiedad fundamental del material ferromagnético es su capacidad de registrar la dirección del campo magnético aplicado. Al quitar el campo magnetizante, la magnetización no regresa a cero sino que guarda un registro del campo aplicado; a la trayectoria de magnetización M , en función del campo magnético aplicado, H , se le llama ciclo de histéresis. (Fig. 2.12)

En los materiales ferromagnéticos, el intercambio de energía puede producir un acoplamiento de intercambio paralelo o antiparalelo, esto hace que los materiales se clasifiquen en ferromagnéticos, que son metales como el hierro, magnetita, maghemita, goetita y pirotite, en los que los momentos magnéticos de los átomos son desiguales y antiparalelos (en el mismo sentido), por lo que resulta una magnetización apreciable; y los Anti ferromagnéticos, óxidos como la olvoespinela o la ilmenita con capas con momentos magnéticos iguales y antiparalelos, $M_s = 0$, que ocasionan una magnetización débil o nula; esta propiedad desaparece a la temperatura de Neel.

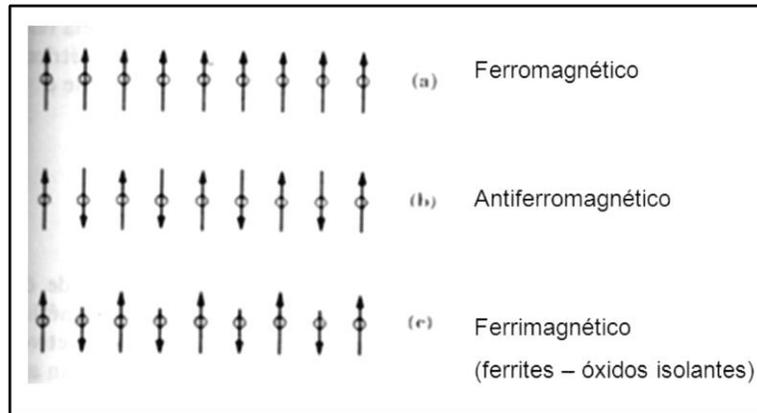


Fig. 2.12 Ferromagnetismo y su comportamiento magnético

Superparamagnetismo (SP)

Es un comportamiento especial de granos ferromagnéticos muy pequeños (dominio sencillo de $0.001 - 0.01 \mu\text{m}$ de diámetro), que bajo la presencia de un campo adquieren una gran magnetización remanente, pero muy inestable y de una manera similar a lo que sucede con las sustancias paramagnéticas, desaparece rápidamente en cuanto se elimina el campo magnetizador, son incapaces de retener una magnetización remanente estable a temperatura ambiente, lo que se atribuye al desarrollo de vibraciones térmicas (Fig. 2.13).

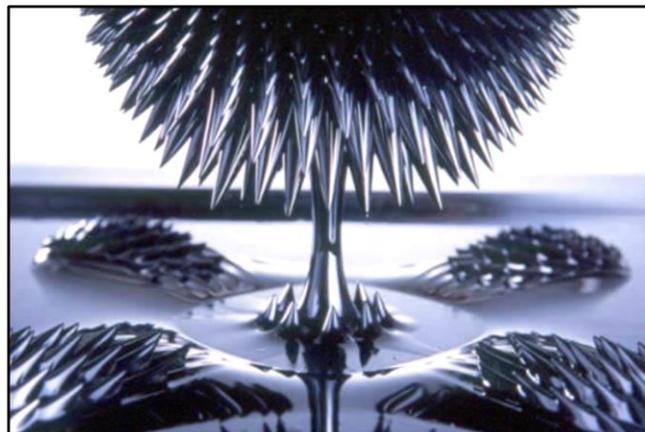


Fig. 2.13 Ferro líquido, una aplicación del superparamagnetismo

Minerales Magnéticos

Las titanomagnetitas son minerales opacos, cúbicos con composición entre los miembros extremos de las soluciones sólidas magnetita (Fe_3O_4) y ulvoespinela (Fe_2TiO_4). La célula unitaria está constituida por sub-arreglos entre aniones y cationes de oxígeno de forma tetraedral y octaedral.

Las propiedades magnéticas de las titanomagnetitas están controladas por la distribución de los cationes en los sub-arreglos y el acoplamiento de intercambio entre estos (Fig. 2.14).

En la serie de titanomagnetitas, el Ti^{4+} es sustituido por Fe^{3+} conforme el contenido de Ti aumenta. La fórmula química generalizada para las titanomagnetitas es $Fe^{3-x}Ti_xO_4$, donde x varía desde 0.0 para la magnetita hasta 1.0 para la ulvoespinela.



a) Rutilo

b) Hematita con Magnetita

c) Wustita

Fig. 2.14 Minerales Magnéticos del diagrama ternario Rutilo – Hematita Magnética - Wustita

En muchas rocas ígneas, las titanohematitas y sus productos de oxidación constituyen la menor parte de los minerales ferromagnéticos en relación con las titanomagnetitas. Pero en rocas altamente silíceas y/o en rocas ígneas altamente oxidadas, la hematita puede ser el mineral magnético dominante, como por ejemplo en los sedimentos rojos (Fig. 2.15).

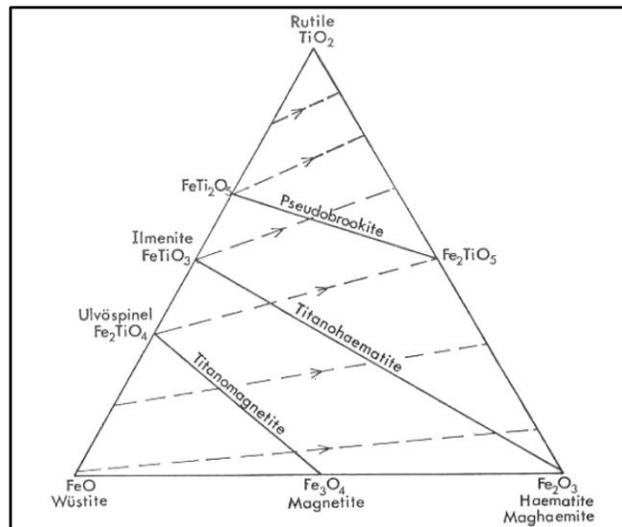


Fig. 2.15. Diagrama ternario Rutilo – Hematita Magnética - Wustita

La sustitución iónica en la serie de titanohematita es exactamente como en las titanohematitas, con Ti^{4+} sustituido por Fe^{3+} y un catión de Fe residual cambiando valencia de Fe^{3+} a Fe^{2+} . La fórmula

generalizada para titanohematitas es $\text{Fe}^{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ donde, x varía desde 0.0 para hematita hasta 1.0 para ilmenita.

Titanomaghematitas: e interperismo de las titanomagnetitas a temperatura superficial ambiente (oxidación de baja temperatura), o alineación hidrotermal a temperatura $< 200^\circ\text{C}$, puede llevar a producir espinelas con deficiencia de cationes. El ejemplo clásico es la oxidación de magnetita para dar maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$), la cual es químicamente equivalente a la hematita pero retiene la estructura de espinela en el cristal.

Durante el interperismo del piso oceánico, las titanomagnetitas se oxidan a titanomaghemita con la consecuente disminución en intensidad de magnetización, produciendo una mayor disminución en la amplitud de las anomalías magnéticas marinas. Consecuentemente, la titanomaghemita es uno de los óxidos de Fe y Ti en la corteza terrestre. Recientemente se ha reconocido que la formación de maghemita es la principal responsable del aumento en contenido de mineral ferromagnético en suelos.

Los hidróxidos de hierro son comunes en rocas ígneas y metamórficas intemperizadas, en suelos y en sedimentos. El más importante es la goelita (αFeOOH), que es la forma estable del óxido de hierro en suelos de regiones húmedas, aunque también resulta de la alteración de la pirita (FeS_2) en calizas; la goelita es ortorrómbica y anti ferromagnética, comúnmente muestra ferromagnetismo débil, su deshidratación natural (o calentamiento en laboratorio a $300 - 400^\circ\text{C}$) produce hematita, siendo un proceso importante en la formación de sedimentos rojos.

La lepidocrocita es un hidróxido con estructura cristalina cubica, paramagnética a temperatura ambiente (temperatura Neel de -196°C). La lepidocrocita frecuentemente se convierte en goetita o en maghemita por deshidratación.

La formación de sulfuros de hierro es una preocupación crucial respecto a registros paleomagnéticos en sedimentos marinos. Los sulfuros de hierro pueden ocurrir naturalmente con composiciones que varían desde pirita hasta troilita, no obstante la última es común solo en meteoritos. La fórmula química general puede ser FeS^{1+x} ($0 \leq x \leq 1$) y las composiciones de sulfuros de hierro pueden ser expresadas por el parámetro composicional x . La pirrotita es un sulfuro de hierro ferromagnético con estructura cristalina mono cíclica y composición en el rango Fe_7S_8 a Fe_8S_{10} ($0.11 \leq x \leq 0.14$). La pirrotita generalmente se forma durante diagénesis de depósito con abundante entrada orgánica, pero también puede formarse en las aureolas metamórficas que rodean a los intrusivos ígneos.

Tipos de Magnetización Remanente

La magnetización remanente en las rocas se conoce por la presencia de minerales ferromagnéticos o ferromagnéticos parásitos, incluidos en una matriz de minerales diamagnéticos o paramagnéticos, esta magnetización es la evidencia de cambios en el campo magnético terrestre, sucedidos dentro del registro geológico, los cuales son detectados de una forma más fácil en las rocas ígneas máficas,

tales como el basalto, aunque también es posible detectarlos en sedimentos, ya sea de lagos o marinos (Fig. 2.16).

Los mecanismos mediante los cuales las rocas pueden adquirir sus diversos tipos de magnetizaciones remanentes, dependen de los procesos físico-químicos presentes en el momento de la magnetización, a continuación se mencionan los más frecuentes.

Magnetización remanente térmica o termorremanente: ocurre cuando las lavas máficas se enfrían y se forman pequeños cristales de magnetita que están por un momento libres para moverse y orientarse por sí mismos con el campo magnético existente, al pasar el tiempo, la lava se solidifica y los cristales de magnetita adquieren una posición fija, registrando el alineamiento del campo magnético en ese instante.

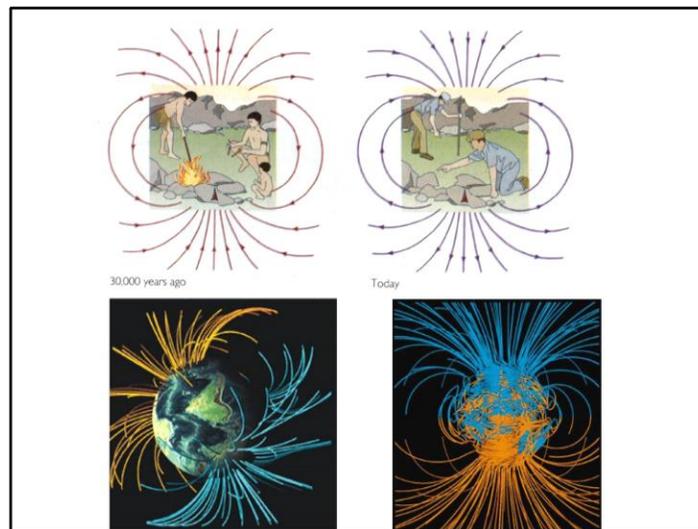


Fig. 2.16 La magnetización remanente en diversos lapsos de tiempo geológico

Magnetización detrítica: es similar a lo anterior, ya que los granos de magnetita se depositan en un medio acuoso y son libres de rotar como agujas imantadas y alinearse con el campo terrestre conforme caen, después al quedar sepultados por sedimentos subsecuente, ya no pueden moverse libremente. De este modo se forma un registro permanente de los campos magnéticos pasados de la Tierra.

Los minerales magnéticos arrastrados como partículas (magnetita y hematita), se orientan paralelamente a las líneas de fuerza magnética de la Tierra, antes de su depósito y quedan inmovilizados por el sedimento sobreyacente cuando se depositan orientadas con el campo existente.

La magnetización Posdetrítica: se adquiere posterior al depósito y previa a la consolidación del mismo, cuando los sedimentos se reorientan (en su inclinación magnética) al perder el agua intersticial.

La magnetización remanente viscosa, es aquella que se adquiere durante la exposición a campos magnéticos débiles, es una magnetización secundaria resultante de la acción del campo geomagnético, después de la formación de la roca, desde el punto de vista paleomagnético se considera como ruido.

La magnetización remanente termoviscosa, es parasitaria y se debe a calentamientos posteriores a la formación de las rocas, posiblemente por metamorfismo.

La magnetización remanente isotérmica, es un registro de una magnetización muy fuerte y que ha eliminado la magnetización primaria de una roca; producida por rayos durante las tormentas eléctricas.

La magnetización remanente antihistórica es aquella que se produce en un laboratorio, al aplicar un campo magnético débil mediante un campo magnético alterno.

La Magnetización Química se presenta cuando ocurren cambios químicos que forman minerales, por debajo de su temperatura de bloqueo dentro de un campo magnético, dando como resultado la adquisición de un magnetismo remanente, también ocurre en las rocas de precipitación química, en especial los carbonatos que proceden de la oxidación de la magnetita y óxidos de hierro, adquiriendo el magnetismo desde la precipitación.

Magnetización giromagnética: es una magnetización parasitaria, resulta de la aplicación de campos magnéticos alternos, pero no todos los minerales se pueden magnetizar de esta forma; la magnetita no se puede magnetizar, pero la hematita sí, y lo hace en su eje de simetría (hexagonal).

2.2.5 Susceptibilidad Magnética

Hay dos tipos básicos de magnetización; la magnetización inducida y la magnetización remanente. Cuando un material es expuesto a un campo magnético H , adquiere una magnetización inducida, M_i . Estas se relacionan por la susceptibilidad magnética χ :

$$M_i = \chi H \dots \dots \dots (3)$$

Entonces la susceptibilidad magnética, χ , es una propiedad de los materiales referente a la facilidad con la que estos pueden magnetizarse, es decir, la magnetizabilidad de una sustancia, por la presencia de un campo magnético externo. La fórmula anterior usa la susceptibilidad como escalar, lo que implica que M_i es paralelo a H . Sin embargo, hay materiales que exhiben anisotropía magnética y, por tanto M_i , no es paralelo a H . Para una sustancia anisotrópica, un campo magnético aplicado en una dirección X es inducida una magnetización no solo en esa dirección, sino también en dirección Y y Z . Entonces la susceptibilidad magnética se expresa como un tensor, χ , requiriéndose una matriz de 3×3 para una descripción completa (Fig. 2.17).

Además de la magnetización inducida resultado de la acción del campo magnético actual, un material también puede poseer magnetización remanente, M , que es un registro de los campos magnéticos pasados que han actuado sobre el material.

Como la magnetización (M) y el campo magnético (H) tienen las mismas unidades de medida, entonces la susceptibilidad (χ) es adimensional aunque por convención se reporta en unidades SI. La susceptibilidad de las rocas o sedimentos depende de todas las fracciones minerales de una roca, presentes en la fracción ferromagnética, paramagnética y diamagnética con las cuales se determina el valor de la susceptibilidad total de la roca.

La susceptibilidad magnética es el parámetro magnético más común y más simple de medir, se realiza a la temperatura ambiental de laboratorio con un campo magnético bajo, generalmente de 0.1 mT. La susceptibilidad dependiente de la masa específica, se obtiene dividiendo el volumen de la muestra entre su peso.

El método más común para medir la susceptibilidad inicial es utilizar un campo alterno; existen varios equipos disponibles para realizarlo, estos van desde los más sencillos y poco sensibles, hasta los altamente sensibles (en relación con sedimentos de lago donde la señal no es tan fácil de detectar), los cuales son útiles hasta para medir la contribución diamagnética del tubo de plástico donde se tienen los sedimentos.¹⁶

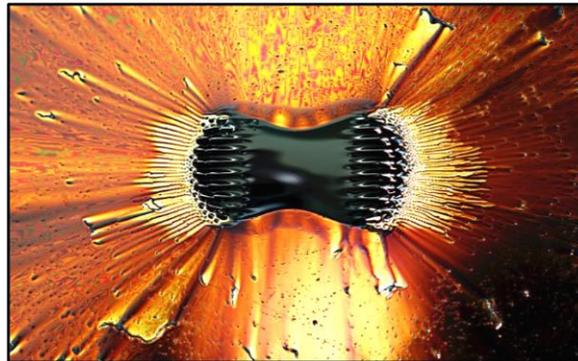


Fig. 2.17 Una sustancia paramagnética como ejemplo de la propiedad de la Susceptibilidad Magnética.

2.3 Registro Químico

Ácido Clorhídrico

En la industria petrolera, el ácido clorhídrico (HCl) constituye el elemento más utilizado en la preparación de sistemas ácidos para ser empleado en tratamientos de limpiezas, acidificaciones matriciales y fracturamiento ácido, se caracteriza por ser un ácido mineral fuerte, con un alto poder de disolución en formaciones de carbonatos y por su bajo costo (Fig. 2.18).



Fig. 2.18 Ácido Clorhídrico

La ecuación química para las formaciones del HCl con la roca caliza (CaCO₃) y la dolomía (CaMg(CO₃)₂) se muestran en forma estequiométrica. Los productos de la reacción son solubles en agua y se pueden recuperar fácilmente una vez que el pozo inicie el proceso de limpieza.

Reacción de calizas con el HCl:



Reacción de dolomías con el HCl



Los productos de la reacción química entre el HCl y las calizas o dolomías son: sal de cloruro de calcio, sal de cloruro de magnesio, dióxido de carbono (gas) y agua. ¹⁷

Este método de ensayo se utiliza para determinar la presencia y cantidad de carbonato en una muestra de suelo en términos de la calcita equivalente. El método se diseñó generalmente para su uso como un índice de contenido de carbonato aproximado para ayudar con la caracterización de los suelos marinos. Existen otros métodos de ensayo (tales como el método C25 y el Método de Ensayo D3042) para evaluar la equivalencia de carbonato de calcio para los propósitos de caracterización de uso de materiales calcáreos como modificadores del suelo o materiales de revestimiento agrícolas.

Los carbonatos de calcio (CaCO₃) se conocen agentes de cementación, son solubles en agua a pH <7, y son suaves en la escala de Mohr en comparación con otros minerales del suelo.

Este método de prueba tiene las limitaciones siguientes:

Si se miden bajo el contenido de carbonato (en equivalentes de calcita), el usuario ignora si el núcleo es bajo en contenido de carbonato o contiene cerrusite, witherita, y similares, que son especies de carbonato cuyas reacciones con ácido clorhídrico son o muy lento o limitado.

Los tiempos de prueba pueden ser extensos (más de 1 hora) para algunas especies de carbonato (como dolomita) se requieren un equivalente de aproximadamente 1% para la calcita.

Los efectos del tamaño de grano de muestras, la duración de la prueba, el pH y la masa del espécimen se discuten en la literatura

La calidad del resultado producido depende de la competencia del personal que lo realiza, y la adecuación de los equipos y las instalaciones utilizadas. Los organismos que cumplan con los criterios de la norma D3740 prácticamente se consideran capaces el método de prueba / muestreo / control competente y objetiva, etc.

Alcance

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de carbonato de los núcleos y de roca blanda que se puede romper fácilmente por el esfuerzo mecánico. Es un método gasométrico que utiliza un aparato portátil simple. Los resultados deben indicarse claramente como la calcita equivalente en porcentaje debido a que diferentes especies de carbonato cubren una amplia gama de ciento de calcitas equivalentes: ¹⁸

3. TOMA DE REGISTROS

3.1 Toma de Registros en el Pozo Tecoh

Para identificar el cambio litológico en núcleos recuperados en el pozo Tecoh, se registraron las pruebas obtenidas en los registros (fotográfico, químico y susceptibilidad magnética), para procesarlos y construir una columna estratigráfica que identificara los diferentes tipos de roca presentes.

En este capítulo se describen los trabajos realizados en la toma de registros, siendo ésta base fundamental en la interpretación. Con la aplicación de estos registros se identifica la variación vertical a lo largo de la sección en estudio de una manera práctica, describiendo los cambios litológicos presentes en la formación.

El intervalo caracterizado comprende de 0 a 243.25 metros de profundidad, En la secuencia se presentan múltiples cambios litológicos de calizas y dolomías los cuales serán el enfoque principal de este estudio y que se discutirán en este trabajo.

La primera actividad realizada fue la adquisición del registro fotográfico junto con un reconocimiento físico donde se describen las propiedades texturales de la formación con lo que se documentó la formación en estudio, con este registro se construirá una columna estratigráfica que ejemplifique los carbonatos presente en la secuencia.

Como parte complementaria en la caracterización, la segunda actividad realizada fue la adquisición del registro químico que determina el grado de dolomitización de los carbonatos, este registro se tomó en los principales cambios litológicos que se manifiestan en los núcleos, en las muestra se midió y observó la velocidad de reacción y la efervescencia del ácido con la formación que es representativa de la concentración de calcita contenida en la muestra.

El tercer registro fue el de susceptibilidad magnética que se efectuó para identificar las variaciones de la curva de susceptibilidad magnética que depende del contenido de minerales presentes en los sedimentos y con los valores obtenidos caracterizar el tipo de roca presente en la formación.

Adquisición de Datos

Los datos del pozo se muestran en la tabla siguiente y fueron obtenidos de registros, los cuales brindaron la información necesaria para la caracterización.

Tabla 8. Datos del Pozo Tecoh			
Corrida	Registro	Primera lectura	Ultima lectura
1	Fotográfico	0 m.	243.25 m.
2	Químico	0 m.	243.25 m.
3	Susceptibilidad magnética	0 m.	243.25 m.

3.2 Registro de Imágenes Digitales

Antes de la adquisición de los diferentes registros geofísicos, se realizó una base de imágenes. Esta consta de fotografías digitales que permiten su fácil manejo en cualquier computadora personal. La digitalización se realizó a lo largo de la columna de sedimentos en estudio, el estudio abarca una totalidad de 143.25 metros. Cada fotografía abarca aproximadamente 3 metros de la secuencia, permitiendo tener una imagen como registro de los núcleos al inicio de la caracterización y toma de datos, con lo cual se facilitará su consulta posterior, permitiendo observar e identificar las características de los sedimentos, como las tonalidades y las diferentes litologías.

La secuencia de núcleos recuperados en el pozo Tecoh está constituida principalmente por rocas carbonatadas, la secuencia se describe en segmentos o intervalos de longitud de 30 metros aproximadamente, los segmentos representan 10 cajas de núcleos del pozo, en cada intervalo se describen las características físicas de las muestras tales como color, tamaño de grano y consolidación.

Los sedimentos nucleados consisten de partículas que se encuentran en rangos de tamaño de arcilla hasta las arenas finas con diferentes proporciones entre ambos límites a lo largo de la columna estratigráfica. La litología se compone de diferentes intercalaciones de calizas y dolomías, formando una secuencia de carbonatos de diferentes tonalidades, entre las cuales se ha considerado como las más representativas el blanco cremoso, café claro y oscuro, marrón.

La columna sedimentaria recuperada se encuentra identificada por múltiples cambios de litológicos de espesores variables que van de unos cuantos centímetros hasta varios metros. Los contactos entre los cambios son generalmente rectos, en algunos casos son nítidos y abruptos, pero también son comunes los cambios transicionales.

Es posible que las diferentes capas de sedimentos observadas (calizas y dolomías), presente un patrón de depósito que defina ciclos de sedimentación que se puedan observar en las muestras presentes pero es necesario realizar un trabajo a detalle que pueda comprobarlo.

Descripción de los Intervalos Nucleados.

A continuación se presentan los cuatro intervalos registrados con los que se abarcan 143.25 metros del pozo, los intervalos que se registraron son:

- Profundidad de 0 a 35.20 metros (caja 10-20)
- Profundidad de 35.20 a 74.44 metros (caja 10-20)
- Profundidad de 74.44 a 105.25 metros (caja 20-30)
- Profundidad de 105.25 a 143.25 metros (caja 30-40)

Intervalo 1 de 0 a 35.20 Metros de Profundidad (Caja 1-10).

En las Figs. 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se ilustra la formación nucleada del pozo Tecoh, el registro fotográfico mostrado en las figuras es fundamental en la caracterización de la secuencia estratigráfica, en el registro de imágenes se presenta una línea que intersecta la columna, de profundidad, esta línea representa la profundidad media de la zona nucleada que se resguardo en la caja, las cajas están clasificadas por número y tiene una leyenda de la sección que abarcan. Esta clasificación facilita la localización de la profundidad de la cima y base de cada estrato y con esto identificar los principales cambios litológicos en la formación. A continuación se presentan cuatro tablas donde se describe la textura de la formación en las diferentes profundidades.

Profundidad	Descripción de las muestras
0 a 13.10 m.	rocas de color blanco cremoso, deleznales de grado fino
13.10 a 14.86 m.	rocas café oscuro, brillante de grano medio, consolidada
14.86 a 23.57 m.	roca de color blanco cremoso, deleznable de grano fino
23.57 a 25.20 m.	roca color café oscuro, opaca, consolidada, de grano fino
25.20 a 26.15 m.	roca de color blanco cremoso, deleznable de grano fino
26.15 a 35.20 m.	rocas de color café claro, opaca, consolidada de grano fino

Intervalo 2 de 35.20 a 74.44 Metros de Profundidad (Caja 10-20).

En la Fig. 3.2 se ilustra el registro de imágenes digitales, el intervalo 2 que comprende de **35.20** a **74.44** metros de profundidad, este intervalo se compone de una gama de carbonatos de diferentes características y tonalidades, las unidades del intervalo se describen en la tabla 2.

Profundidad	Descripción de las muestras
35.20 a 38.90 m.	rocas color café claro, grano fino, opaca, muy consolidada
38.90 a 45.20 m.	roca café oscuro, opaca y consolidada de grano fino
45.20 a 51.62 m.	roca de color blanco cremoso, deleznable, grano fino
51.62 a 54.08 m.	roca café oscuro, brillante, grano grueso, consolidada
54.08 a 64.90 m.	roca color blanco cremoso, deleznable, grano fino, opaca
64.90 a 73.20 m.	roca color marrón, opaca, consolidada de grano fino

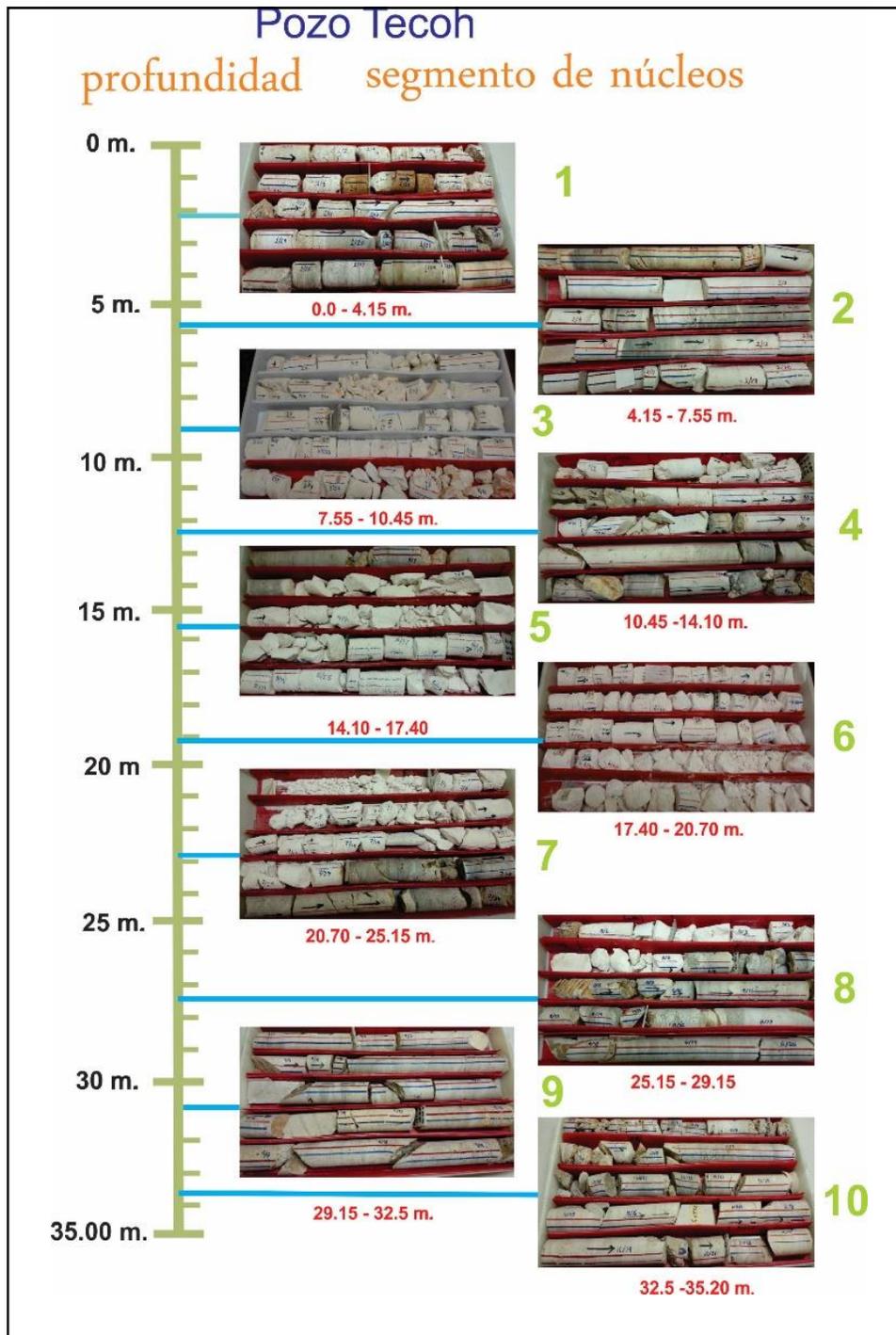


Fig. 3.1 Registro de imágenes digitales, intervalo 1 que comprende la profundidad de 0 a 35.20 metros

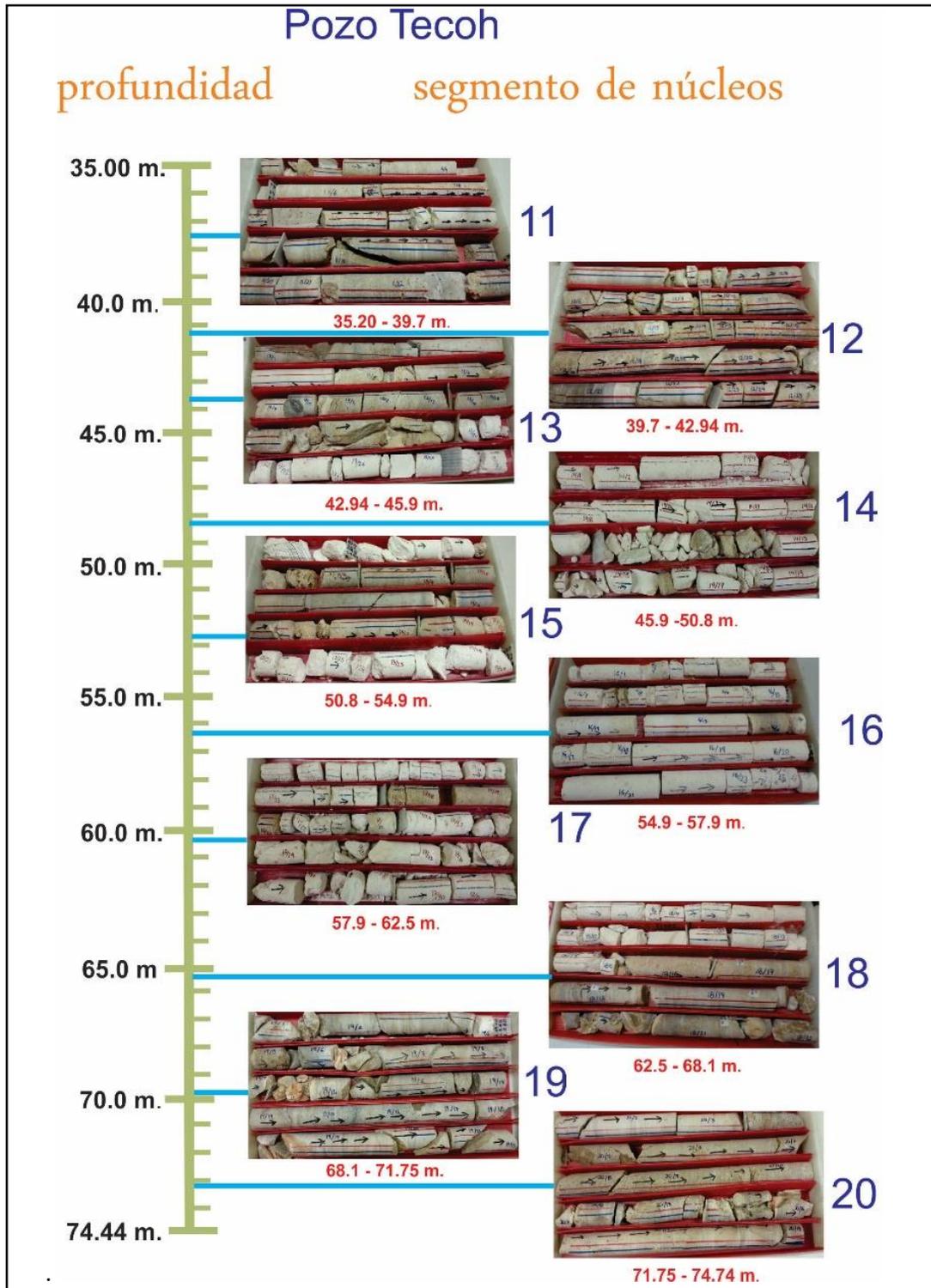


Fig. 3.2 Registro de imágenes digitales, intervalo 2 que comprende la profundidad de 35.20 a 74.44 metros.

Intervalo 3 de 74.44 a 105.25 Metros de Profundidad (Caja 20-30).

En la Fig. 3.3 se presentan las distintas capas de carbonatos, las secuencias se describen a través de la profundidad del cambio litológico. En este intervalo se presentan importantes cambios litológicos, con lo cual es reconocible un ambiente de depósito cíclico, las rocas presentes en este intervalo se describen en la tabla 3.

Tabla 3	
Profundidad	Descripción de las muestras
73.20 a 81.00 m.	Roca color café claro, consolidada, de grano fino, presenta disoluciones
81.00 a 82.20 m.	roca de color blanco cremoso, deleznable, grano fino
82.20 a 84.5 m.	rocas carbonatadas de café oscuro, grano grueso, brillante, sólida
84.5 a 105.25	roca color blanco cremoso, deleznales, de grado fino

Intervalo 4 de 105.25 a 143.25 Metros de Profundidad (Caja 30-40).

La formación presente en el intervalo anterior continúa en el inicio de éste, teniendo una presencia importante de la secuencia, este estrato se manifiesta hasta la profundidad de **113.40** metros como se percibe en el registro fotográfico, las otras litologías caracterizadas se describen en las tablas siguientes;

Tabla 4	
Profundidad	Descripción de las muestras
105.25 a 113.40 m.	roca color blanco cremoso, deleznales, de grado fino
113.30 a 134 m.	roca de café oscuro, grano fino, consolidada, opaca
134 a 137.40 m.	roca de color café oscuro, grano grueso, brillante, consolidada
137.40 a 143.25 m.	roca de color café oscuro, grano fino, consolidada, opaca

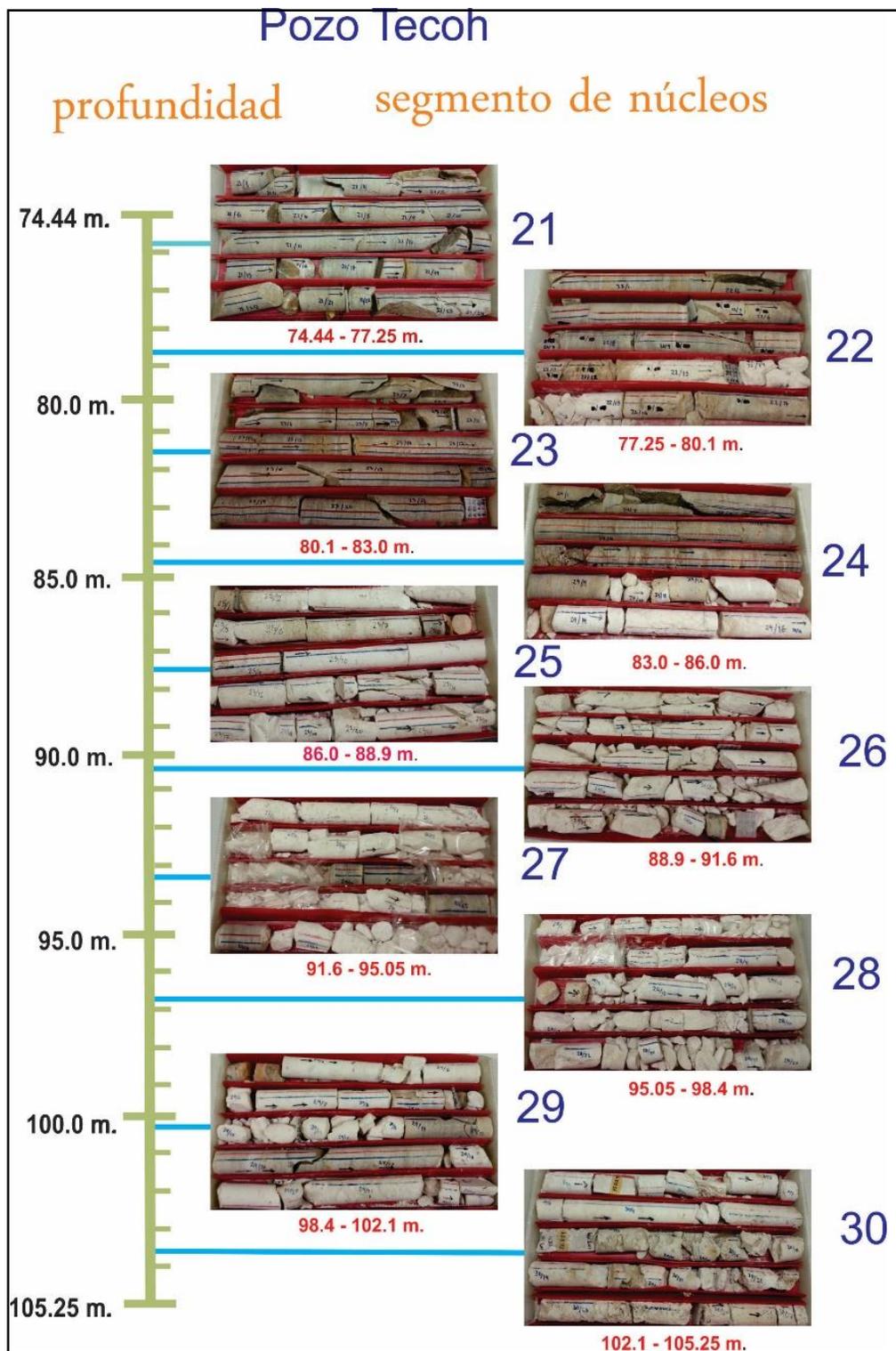


Fig. 3.3 Registro de imágenes digitales, intervalo 3 que comprende la profundidad de 74.44 a 105.25 metros.

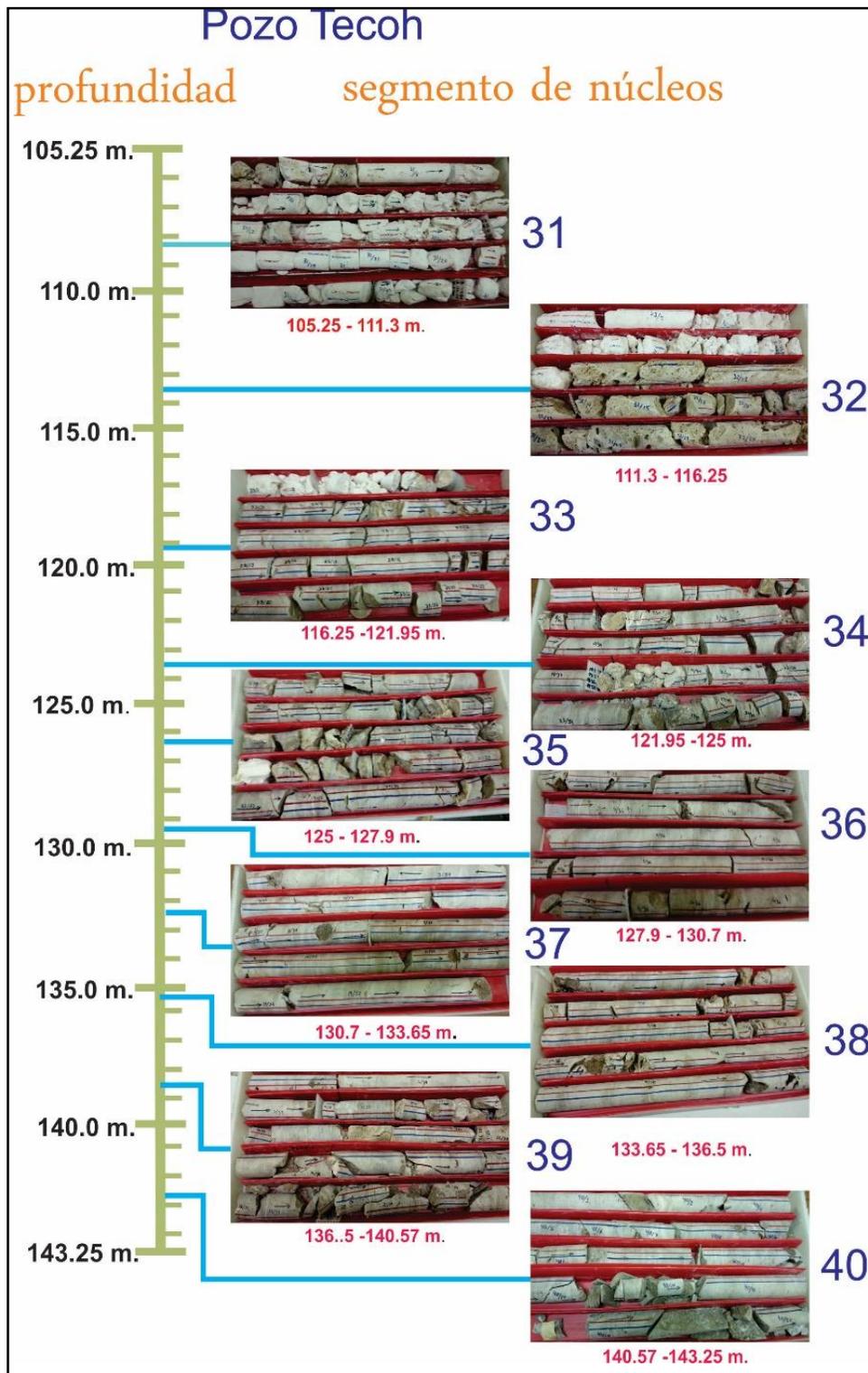


Fig. 3.4 Registro de imágenes digitales, intervalo 4 que comprende la profundidad de 74.44 a 105.25 metros.

3.3 Registro Químico

En las Figs. 3.5, 3.6 y 3.7 que se muestran a continuación se presentan el registro químico obtenido en las muestras. El registro se realizó en el intervalo comprendido de la profundidad de 0 a 142.20 metros de la secuencia en estudio. Se analizó el tiempo de reacción del ácido clorhídrico con las muestras para determinar el grado de dolomitización y poder distinguir entre calizas y dolomías de una manera rápida y práctica. El registro para la identificación de la roca se realiza mediante la aplicación de unas gotas de ácido en la superficie del núcleo, las mediciones se realizaron aproximadamente cada 50 centímetros y en los principales cambios litológicos, en las imágenes del registro se omitieron variar imágenes y solo se presentan las imágenes más representativas para a caracterización.

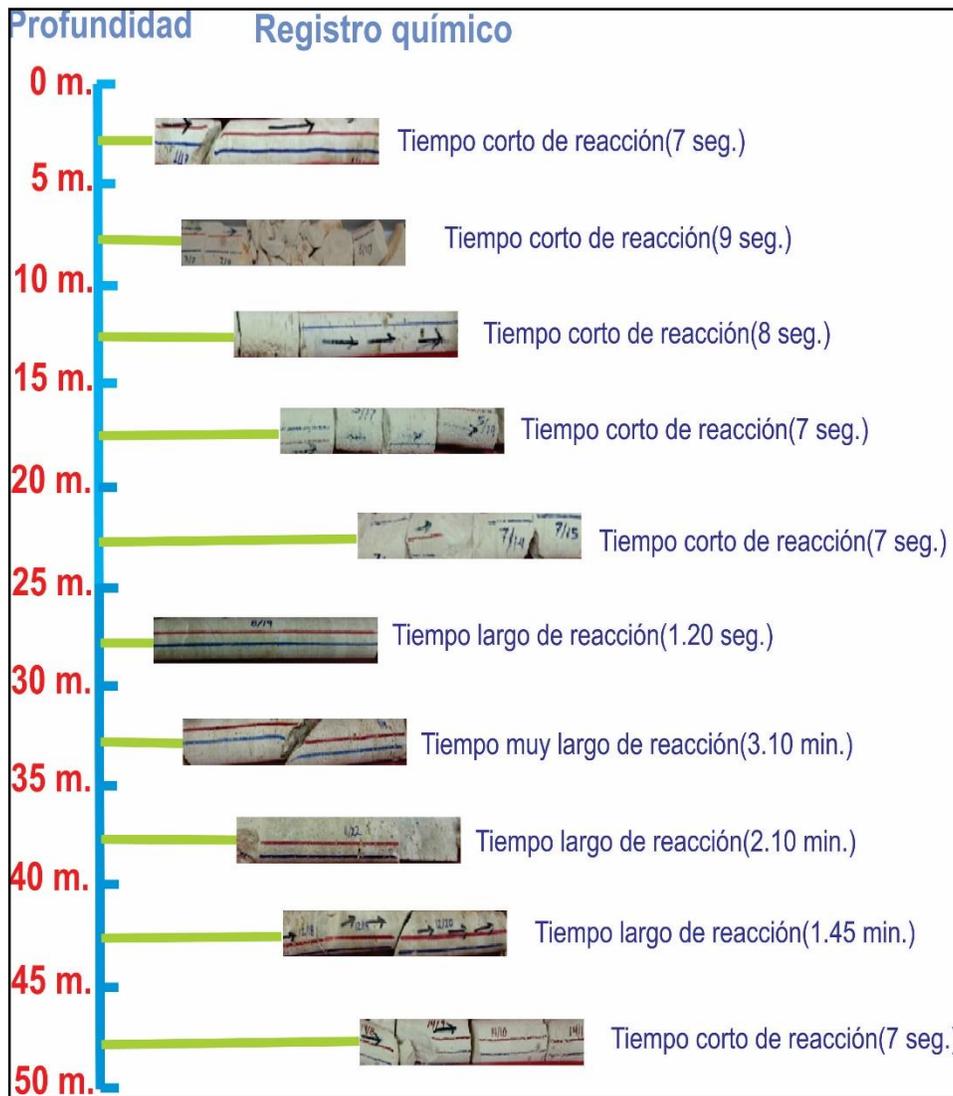


Fig. 3.5 Registro Químico en la profundidad de 0 a 50 metros

La efervescencia y velocidad de reacción de ácido clorhídrico con la muestra presente depende de la concentración de calcita (carbonato de calcio) contenida en el núcleo. La fuerte efervescencia de la calcita con el ácido la caracterizan de otros minerales semejantes de su serie como la dolomita, este patrón es el principal indicio de cambios litológicos y dolomitización presentes en el ambiente de sedimentación de la cuenca.

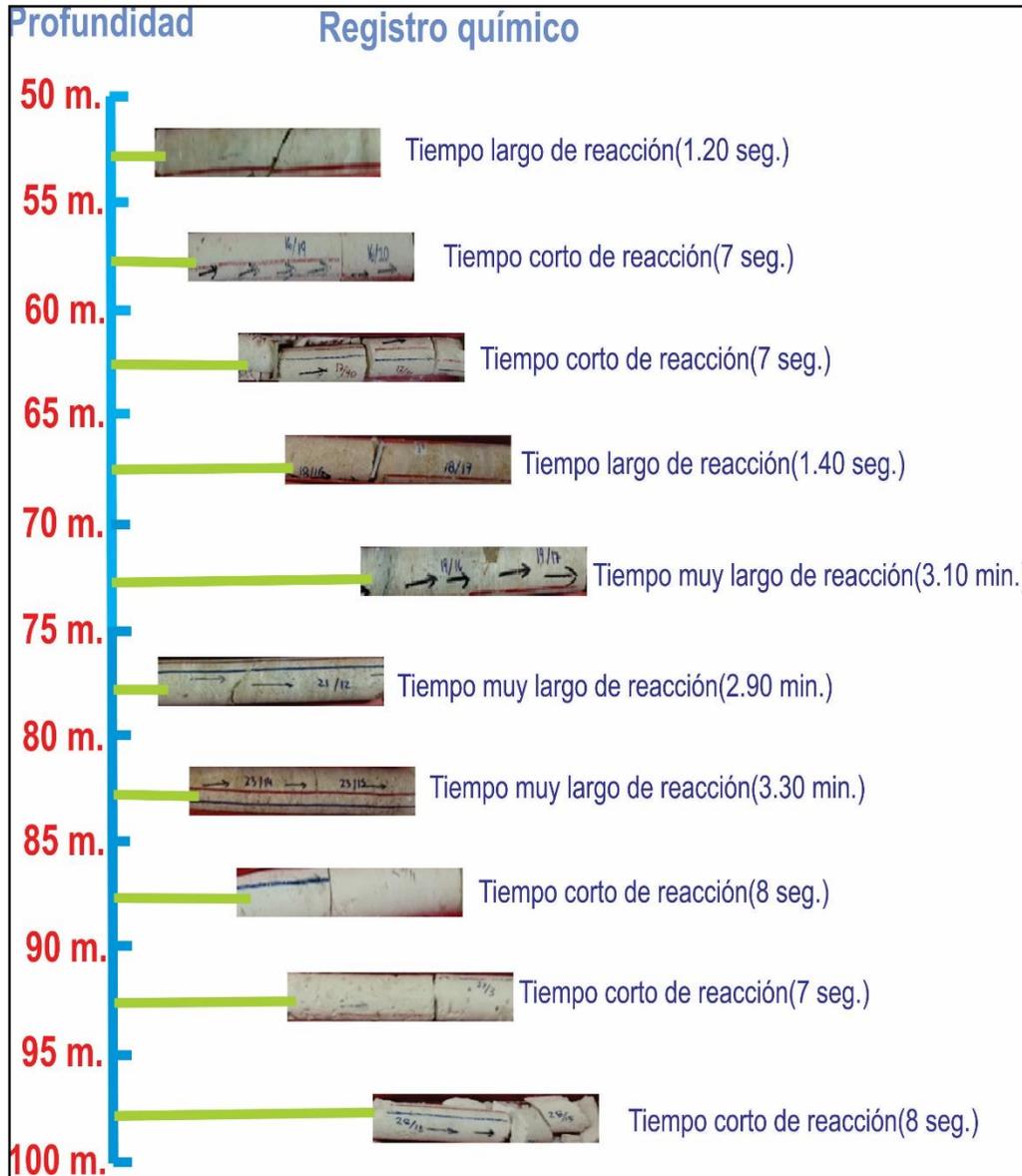


Fig. 3.6 Registro Químico obtenido de la profundidad de 50 a 100 metros.

La calcita presente en la secuencia analizada es de color transparente vítreo y blanco, en algunas secciones las impurezas le dan colores rojizos y amarillentos, la dolomita también presenta características similares, dada esta similitud con este mineral y otros de la misma clase, radica la importancia de un registro químico que identifique de forma práctica las diferentes litologías en el pozo.

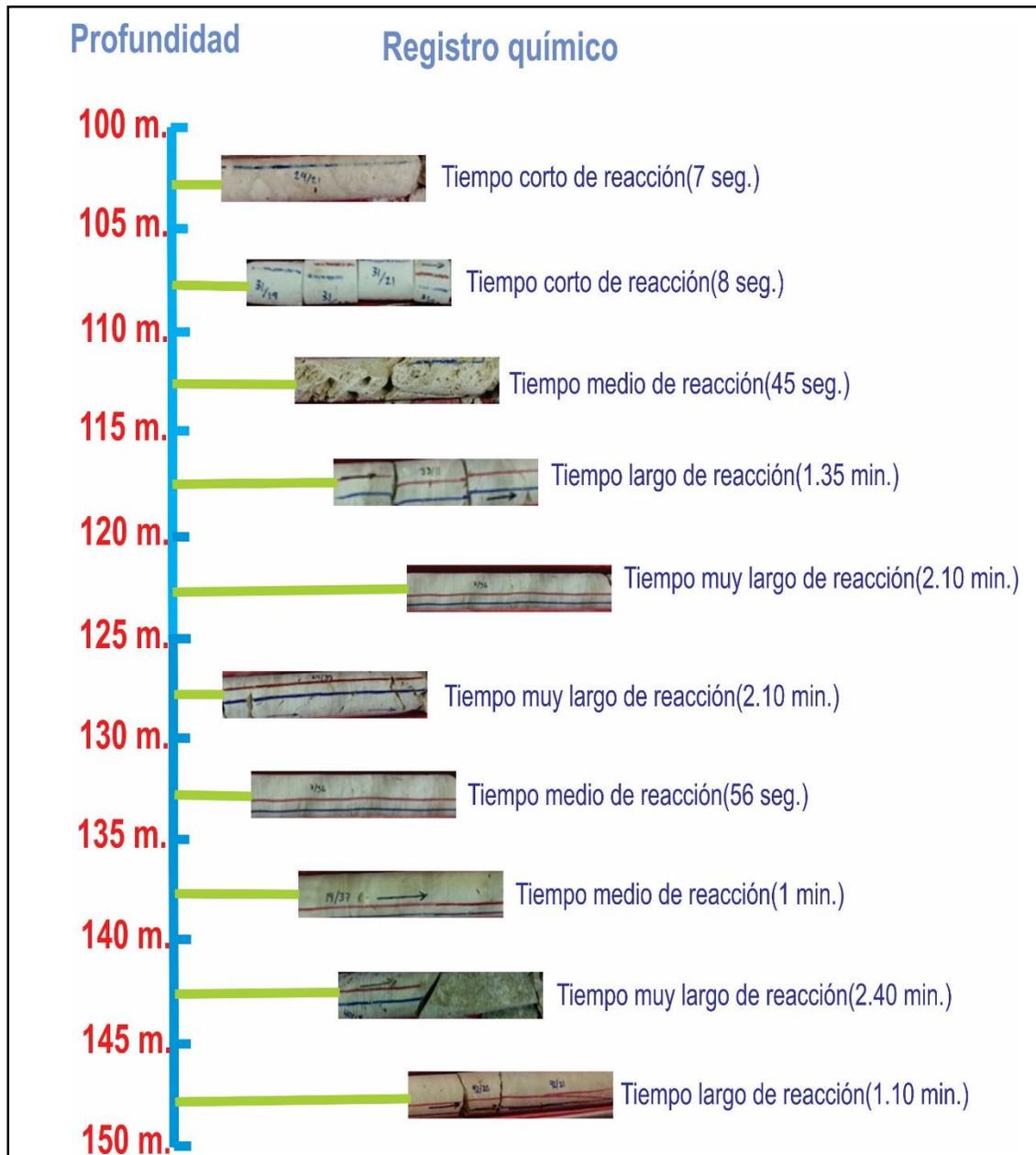


Fig. 3.7 Registro Químico obtenido de la profundidad de 100 a 150 metros.

3.4 Registro de Susceptibilidad Magnética

Los registros de susceptibilidad magnética, no se habían explotado realmente, ahora se presenta en una nueva generación de herramientas y metodologías magnéticas que superan múltiples limitaciones de los registros convencionales y trae información extra para una evaluación petrofísica más precisa.

En la actualidad los yacimientos carbonatados y de aceite pesado están siendo cada día más importantes. En este ambiente esta herramienta provee una respuesta única para caracterizar mucho mejor este tipo de yacimientos. La respuesta final que se obtiene con este registro es el análisis de la matriz e información de la textura presente en los sedimentos.

El registro de susceptibilidad magnética tiene el objetivo de caracterizar la mineralogía mediante un comportamiento magnético. Si se aplica un campo magnético a cualquier sustancia, esta adquirirá una magnetización temporal o permanente dependiendo de sus características como composición, estructura atómica y de las condiciones ambientales en las que se aplica ese campo. Esta magnetización adquirida es característica de cada sustancia, sin embargo, los sedimentos y las rocas están compuestas por diversos tipos de minerales, por tanto la señal adquirida representará una variedad de materiales. Debido a lo anterior y su gran potencial de este registro aun es necesaria la aplicación de otra técnicas para la separación de dichas señales y una zonificación más precisa, y de este modo poder realizar una clara identificación de la mineralogía existente en las muestra.

Este tipo de técnicas presenta varias ventajas en relación con las técnicas convencionales utilizadas; en primer lugar, los minerales magnéticos son fáciles de detectar, son relativamente rápidos de medir, se identifican fácilmente una vez que han sido definidos los distintos comportamientos de cada uno de ellos, y además es posible encontrarlos casi en todo tipo de sedimentos y rocas, en cantidades muy bajas pero detectables. Posteriormente, los resultados se pueden interpretar en términos de procesos geológicos como son la erosión de la cuenca, intemperismo, vulcanismo, etc. Así como en relación a sus condiciones de formación o conservación dentro de la cuenca de depósito. Bajo las metodologías convencionales de estudios de minerales, resulta necesaria la realización de pruebas que requieren de una mayor inversión de tiempo y capital, en equipos y técnicas de usos restringidos, dada esta situación se presenta un gran potencial en los estudios magnéticos.

A continuación se presenta el registro de susceptibilidad magnética que se realizó en núcleos de diámetro completo con el objetivo de estimar de manera preliminar y rápida, la variabilidad de la litología a lo largo de la columna carbonatada.

El registro se obtuvo en el modo de resolución estándar para obtener respuestas básicas de susceptibilidad magnética. La calidad del registro para el pozo Tecoh fue de muy buena calidad, el calibre de los núcleos tiene buena calidad, por tal motivo fue una condición favorable para una buena condición del registro.

Los datos del registro se obtuvieron aproximadamente cada 50 cm en una totalidad de 142.20 metros de la secuencia, con este intervalo es suficiente determinar la variaciones litológicas de los sedimentos y poder construir una columna estratigráfica que pueda representar la formación.

En las Figs. 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11, se muestra el comportamiento de la curva de respuesta al realizar la toma del registro de susceptibilidad magnética, en todos los casos los valores son negativos y muy bajos los cuales son característicos de las rocas carbonatadas. En la mayoría de las curvas se presentan inflexiones a diferentes profundidades, lo cual representa cambios litológicos claros, en la mayoría de los casos es posible observar la disminución y aumento de la susceptibilidad lo cual marca cambio de granulometría y por lo tanto cambios de facies.

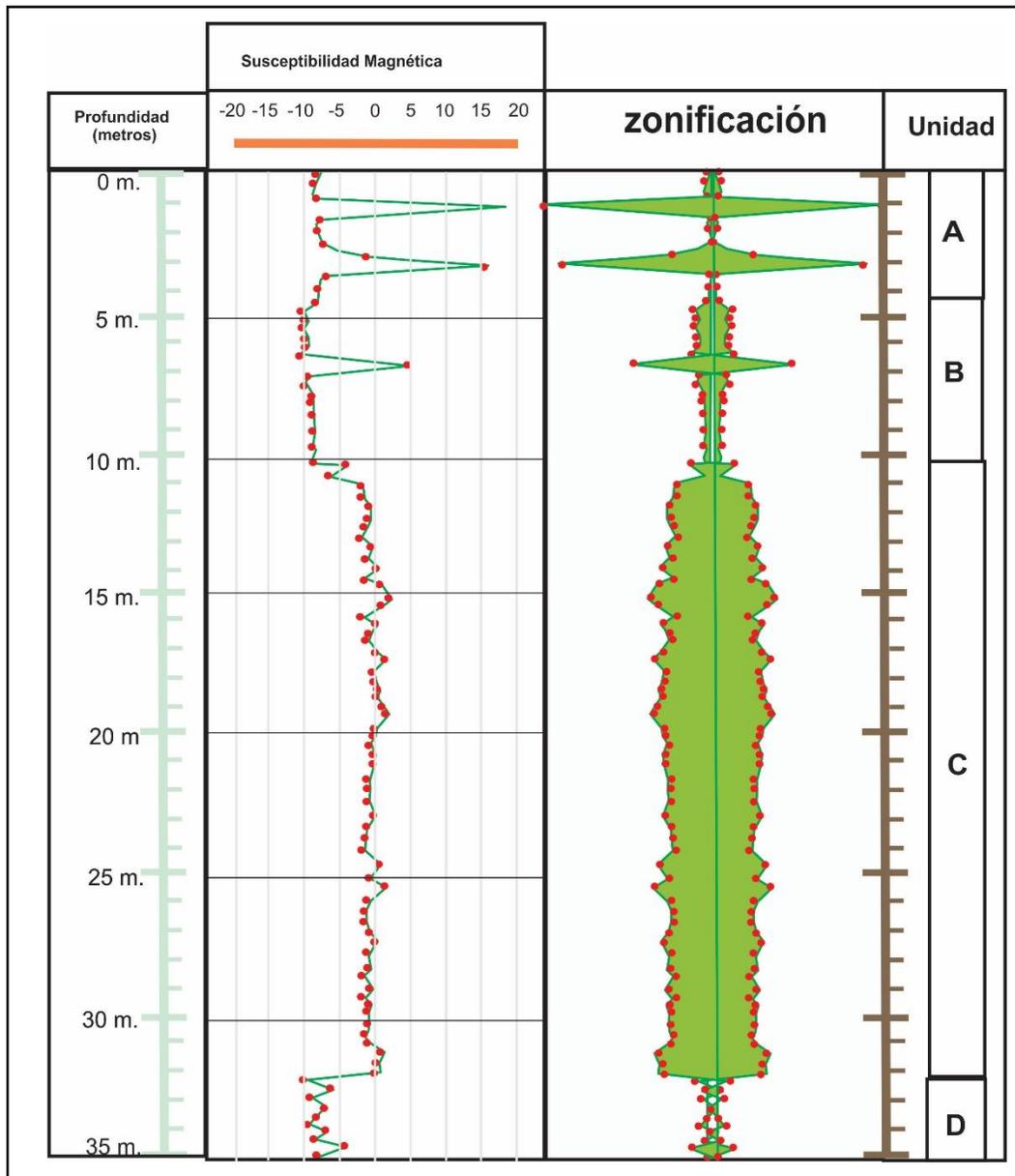


Fig. 3.8 Susceptibilidad Magnética del tramo de 0 a 35 metros. Unidades A B C y D.

Las curvas del registro de susceptibilidad magnética se hallan influenciadas por las variaciones en la concentración de minerales presentes en la formación, en el carril dos se presenta un suavizado de la distribución de la susceptibilidad magnética contra la profundidad, el cual permite tener una predicción de la zonificación de la secuencia estratigráfica presente.

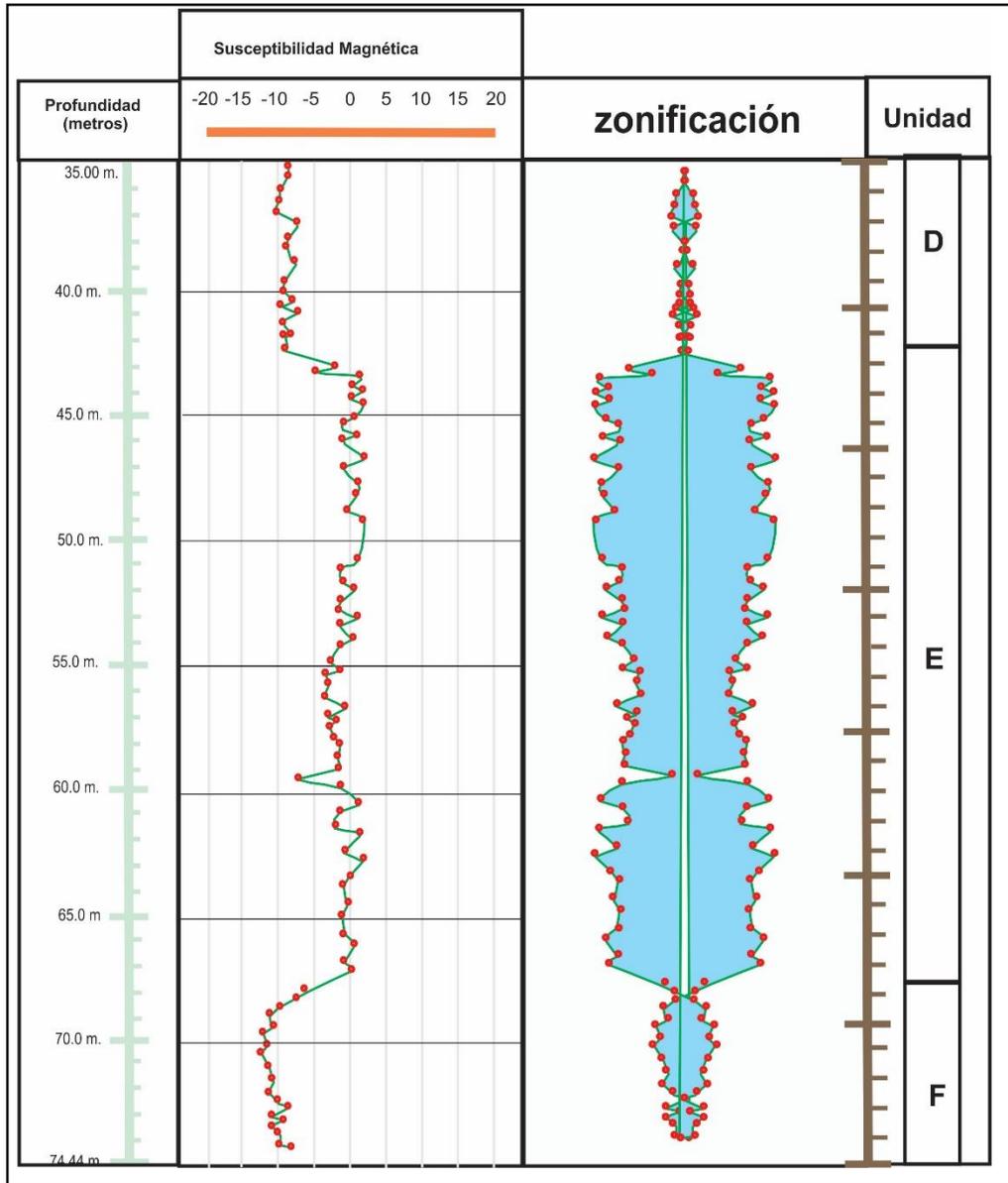


Fig. 3.9 Susceptibilidad Magnética en el tramo de 35 a 74.44 m.

Las imágenes muestran la trayectoria de la curva de susceptibilidad magnética hacia los valores negativos y bajos, los cuales son influenciados por calizas y dolomías presentes en toda la secuencia y que también representan cambios de la formación calcárea.

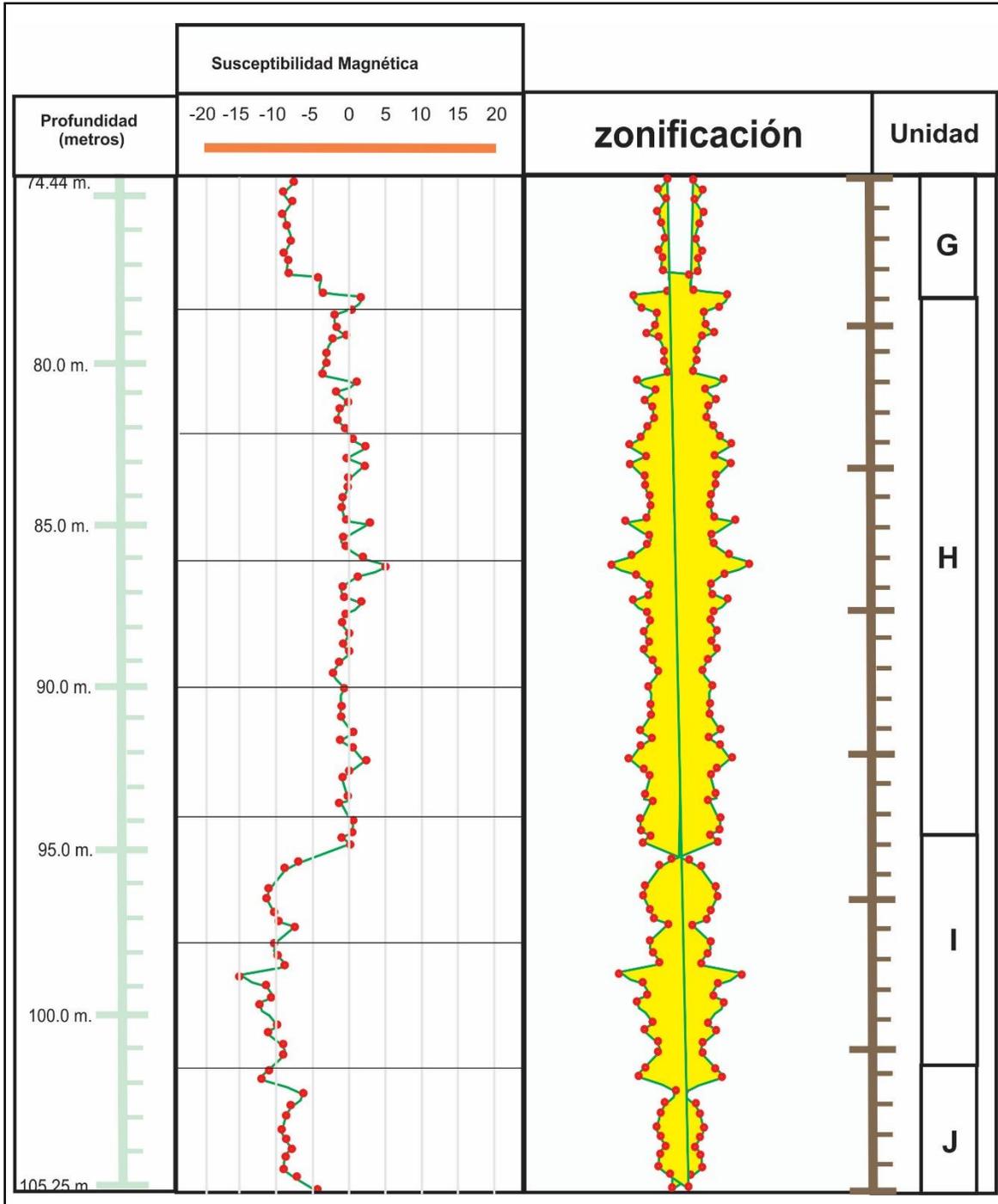


Fig. 3.10 Susceptibilidad Magnética en el tramo 74.4 a 105.25 metros

Los cambios de distribución de susceptibilidad magnética en el suavizado confirman el contacto y cambio litológico en la formación, el suavizado de la curva en el carril dos proporciona un mejor pronóstico de zonificación y cambios litológicos más precisos, el rellenado en colores distingue mejor las áreas potenciales de calizas y dolomías.

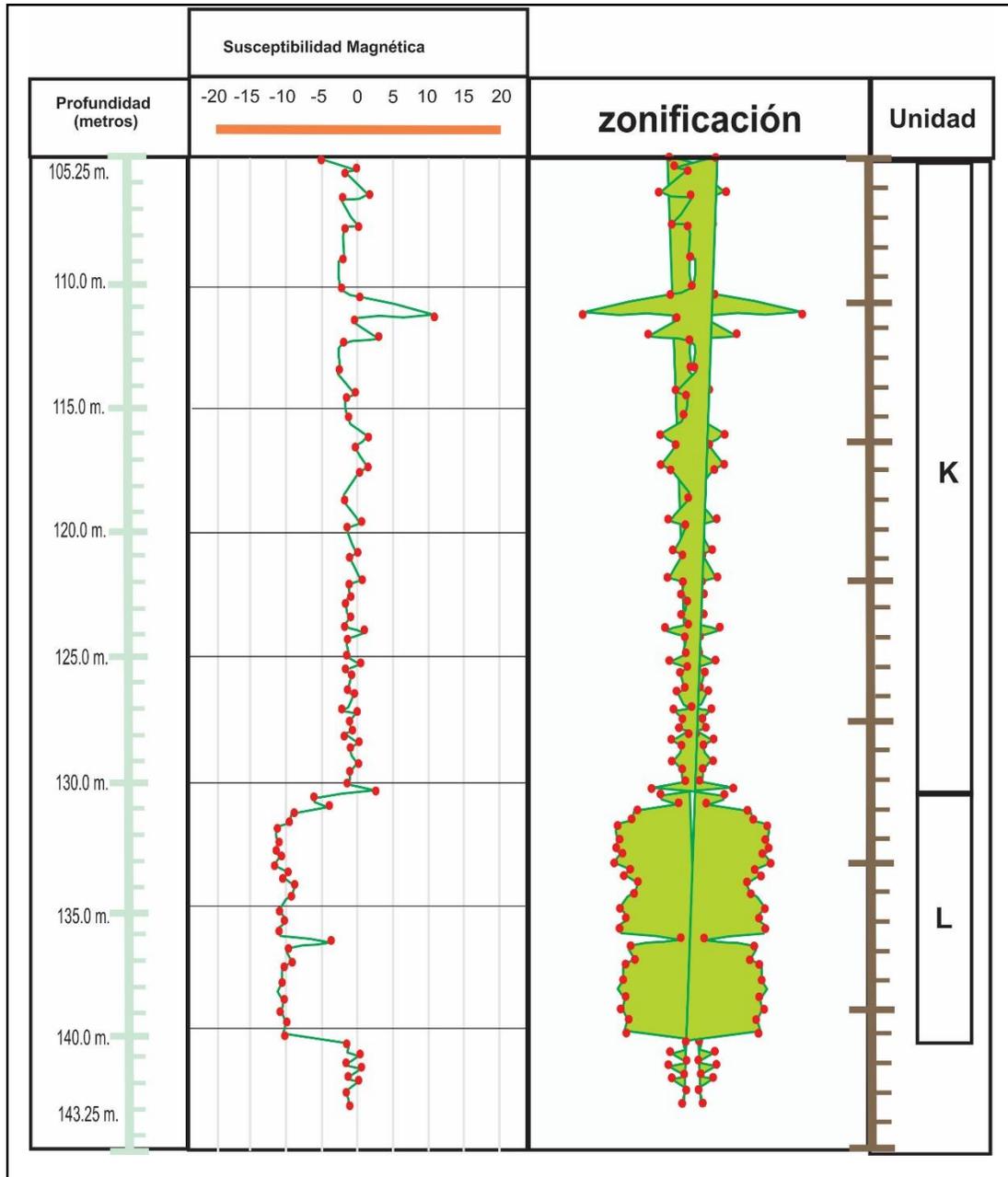


Fig. 3.11 Susceptibilidad Magnética en el tramo 105.25 a 143.25 metros.

4.- INTERPRETACIÓN DE REGISTROS

4.1 Interpretación de Registros de Laboratorio (Fotográfico, Químico y Susceptibilidad Magnética).

En este capítulo se interpretan los datos y las curvas obtenidas de los registros geofísicos aplicados a los núcleos del pozo Tecoh. Con la información obtenida y recopilada se construyeron las diferentes columnas estratigráficas representativas de cada registro, en cada columna se puede observar la resolución de cada técnica.

En el registro fotográfico (RF) se aplicó la clasificación de Dunham basada en una clasificación textural, principalmente por que la información recopilada en la caracterización de los núcleos, que se ajusta muy bien en esta clasificación. Los datos obtenidos se catalogaron y clasificaron para construir la columna estratigráfica más representativa de la zona nucleada, todo esto como un análisis preliminar de la formación analizada.

En el registro químico (RQ) se aplicó una técnica utilizada para caracterizar formaciones durante la perforación, el registro químico se basa en la aplicación de un ácido débil a la muestra, en este caso, el ácido clorhídrico al 10 %. La reacción de la formación con el ácido es indicio de la presencia de calcita en la roca, dado de que esta reacción es característica en la calcita y se puede diferenciar de otros minerales de la misma familia como la dolomita, los tiempos cortos y largos de reacción son representativos del grado de dolomitización de la secuencia y con estos datos se realizó la zonificación y caracterización de la formación analizada.

Las curvas obtenidas del registro de susceptibilidad magnética (RSM) fueron analizadas para realizar una zonificación identificando zonas de calizas y dolomías, donde también se puede observar el cambio de granulometría presente como un potencial de este tipo de registro. Con los datos obtenidos del registro se construyeron histogramas de frecuencia para analizar y determinar con más exactitud la presencia de minerales diamagnéticos y paramagnéticos, los valores más negativos son indicio de minerales paramagnéticos tales como el carbonato de calcio.

Con el análisis y aplicación de las diferentes técnicas antes mencionadas se puede tener un mejor entendimiento de la formación carbonatada analizada, pero no deja de ser compleja la caracterización en carbonatos, dadas estas circunstancias se presenta el mejor modelo estático obtenido con la información y datos recopilados con cada método.

Los modelos estáticos presentados son principalmente para documentar y caracterizar las muestras de núcleos de pozo Tecoh de donde fueron extraídos y con esto tener un modelo más detallado de la formación presente y que pueda ser analizado de una manera rápida y práctica.

Los métodos de caracterización aquí presentados son reflejo de los múltiples estudios que se pueden realizar a los núcleos de pozo y la importancia de los mismos, el análisis de núcleos es fundamental en la caracterización de yacimientos, para poder entender el comportamiento de los mismos.

4.2 Interpretación del Registro Fotográfico.

Para la caracterización de la zona nucleada se aplicó la clasificación de Dunham. Los núcleos se caracterizaron texturalmente, la Fig. 4.1 representa la simbología para caracterizar los diferentes tipos de carbonatos analizados.

La clasificación se dio mediante el análisis de muestras de mano para determinar las características específicas de cada carbonato analizado.

TEXTURA DEPOSICIONAL VISIBLE					TEXTURA BIOCONSTRUIDA (componentes ligados durante el depósito)	TEXTURA DIAGENE- TICA	
TEXTURA LODOSA - GRANUDA (granos ± transportados)							
TEX. LODOSA (soporte de matriz)		TEX. GRANULADA (soporte de granos)					
MATRIZ □ ± GRANOS (<10%)	MATRIZ □ + GRANOS (>10%)	GRANOS □ + MATRIZ	GRANOS □ + CEMENTO				
MUD- STONE	WACKE- STONE	PACK- STONE	GRAIN- STONE	BOUND- STONE	CRISTA- LINA		

Fig. 4.1 Clasificación textural de carbonatos

En la Tabla 4.1 se muestran los diferentes símbolos utilizados para representar las muestras de núcleos analizadas texturalmente, esta simbología fue de gran utilidad para caracterizar los núcleos del pozo Tecoh, las principales características de las muestra se analizaron y ajustaron a un modelo o símbolo representativo de algún tipo de carbonato, el cual nos da inferencia de las características litológicas de los carbonatos presentes.

Los símbolos se relacionaron a las muestras para construir una columna que representa las múltiples litologías recolectadas en el pozo Tecoh, que es el objetivo principal de este trabajo, las variaciones texturales y pigmentación de las muestras no fueron fáciles de relacionar a los diferentes símbolos de la clasificación, por tal motivo fue necesario la investigación en litotecas digitales para caracterizar mejor los núcleos de la formación perforada.

Esta clasificación ajusta perfectamente bien a la información recopilada de la muestra dada la complejidad y las clasificaciones múltiples para carbonatos que existen en la literatura, esta clasificación y simbología se utilizaron como una herramienta de trabajo para clasificar las formaciones analizadas de la secuencia.

Intervalo 1 de 0 a 35.20 m. (Caja 1-10)

Para la caracterización de la zona nucleada se aplicó la clasificación de Dunham. En las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 se presenta la descripción de las distintas variaciones de carbonatos encontrados en Los núcleos. Se describe el tipo de roca encontrado y principalmente que cumpla con las características de la clasificación aplicada.

Tabla 4.1	
Profundidad.	Tipo de muestra
0 a 13.10 m.	WACKESTONE. -Roca sedimentaria química formada por la precipitación del carbonato cálcico y la intervención del agua en un proceso inorgánico y/o bioquímico en aguas someras. Con granos menores a 1 mm. Esféricos que presentan una buena porosidad y por lo tanto buena permeabilidad, también presenta un alto grado de fracturamiento.
13.10 a 14.86 m.	WACKESTONE RECRISTALIZADO. -Su origen posiblemente formado por el reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparzones de organismos del plancton marino en los océanos. La roca presenta una solidificación alta y disminución del tamaño de lo cual disminuye la porosidad y permeabilidad de la formación.
14.86 a 23.57 m.	WACKESTONE DE BIOCLASTOS. -Roca sedimentaria química con partículas menores a 2mm formadas por la precipitación del carbonato cálcico y la intervención del agua en un proceso inorgánico y/o bioquímico en aguas someras, presentan buena porosidad que se da mediante el aumento de grano.
23.57 a 25.20 m.	PACKSTONE. - Roca con importante reducción del espacio intergranular por compactación. Las envueltas corticales de los oolitos están fracturadas y selladas por un cemento en mosaico grueso, postdatando la compactación mecánica, Se origina por la precipitación del carbonato cálcico que existe disuelto en las aguas marinas.
25.20 a 26.15 m.	WACKESTONE. - Rocas de grano fino y pobres en fósiles, están formadas de calcita de grano fino a mediano alojada en un mosaico homogéneo o agregado sacaroide. También contiene venillas de caliza secundaria y cavidades de disolución.
26.15 a 35.20 m.	CALIZA MICROCRISTALINA. -Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio recristalizado. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparzones de organismos del plancton marino en los océanos.

A continuación se muestra la imagen representativa de litología encontrada en el registro

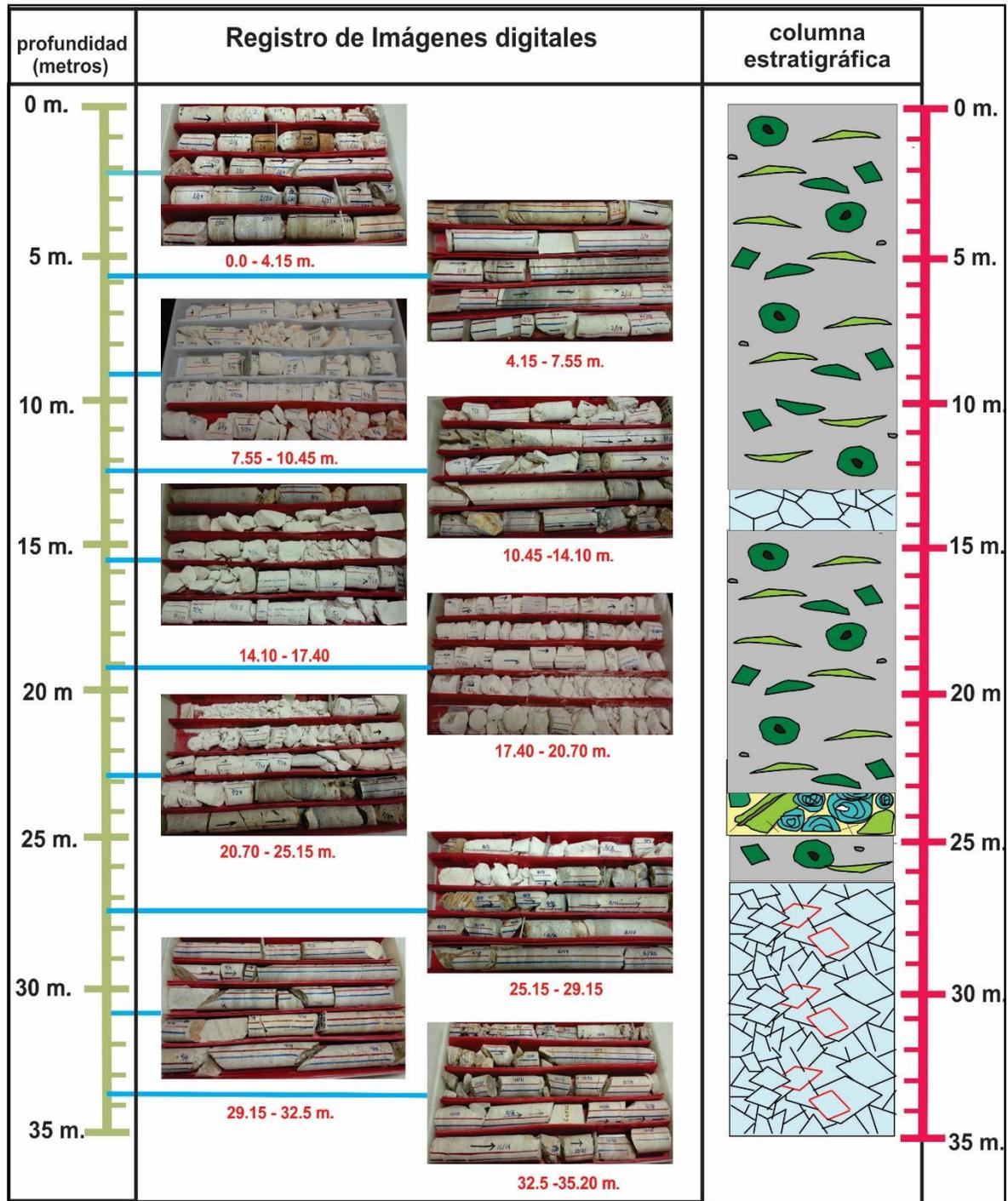


Fig. 4.2 Registro de imágenes digitales y columna estratigráfica que representa el intervalo analizado de la profundidad de 0 a 35.20 m.

Intervalo 2 de 35.20 a 73.20 m. (Caja 11-20)

La caracterización y clasificación de las muestras continúa en el segundo intervalo como se realizó con los mismos principios teóricos; la litología encontrada y la columna estratigráfica se presenta a continuación.

Tabla 4.2	
Profundidad	Tipo de muestras
35.20 a 38.90 m.	CALIZA RECRISTALIZADA. -Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio recristalizado. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.
38.90 a 45.20 m.	DOLOMIA. - Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio y magnesio. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas no cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.se origina en cuencas sedimentarias marinas y continentales por metamorfismo magnésico de calizas.
45.20 a 51.62 m.	WACKSTONE. - Rocas de grano fino y pobres en fósiles, están formadas de calcita de grano fino a mediano alojada en un mosaico homogéneo o agregado sacaroide. También contiene venillas de caliza secundaria y cavidades de disolución.
51.62 a 54.08 m.	GRAINSTONE OLITICO. - Roca con importante reducción del espacio intergranular por compactación. Las envueltas corticales de los oolitos están fracturadas y selladas por un cemento en mosaico grueso, postdatando la compactación mecánica, Se origina por la precipitación del carbonato cálcico que existe disuelto en las aguas marinas.
54.08 a 64.90 m.	DOLOMIA (MUDSTONE). - Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio y magnesio. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas no cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.se origina en cuencas sedimentarias marinas y continentales por metamorfismo magnésico de calizas.
64.90 a 73.20 m.	CALIZA RECRISTALIZADA. -Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio recristalizado. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.

En la Fig. 4.3 que se presenta a continuación se describe la formación en el intervalo 2 del registro de imágenes

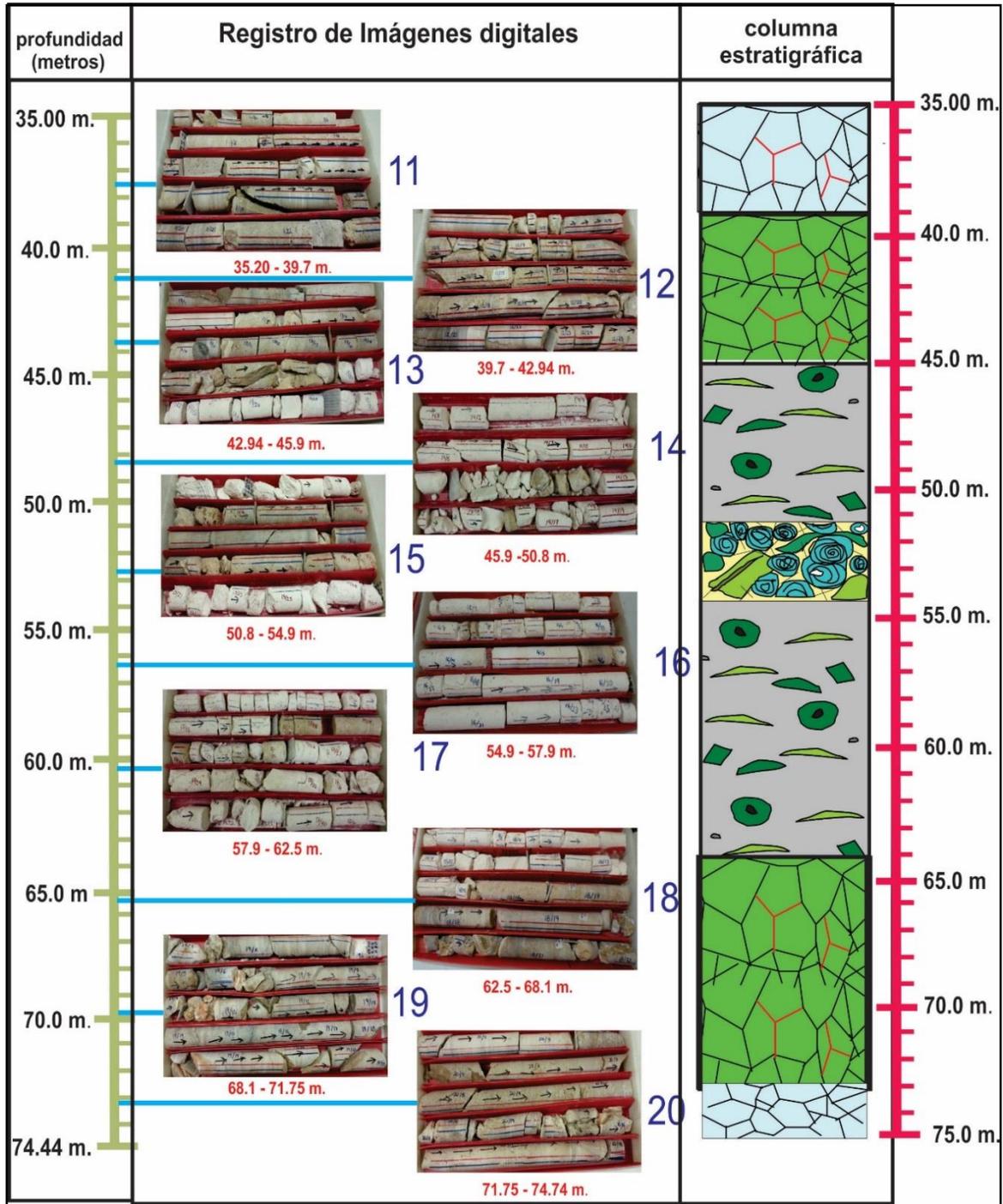


Fig. 4.3 Registro de imágenes digitales y columna estratigráfica que representa el intervalo 2 analizado de la profundidad 35.20 a 74.44 m.

Intervalo 3 de 73.20 a 105.25 m. (Caja 21-30)

Se continúa con la descripción de la secuencia en la tabla siguiente.

Tabla 3	
Profundidad	Tipo de muestras
73.20 a 81.00 m.	CALIZA RECRISTALIZADA. -Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio recristalizado. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.
81.00 a 82.20 m.	PACKSTONE. - Indican una serie de propiedades de deposición. Sugiere procesos de baja energía, mientras que la abundancia de granos sugiere procesos de mayor energía. Pudo el resultado de la prolífica producción de granos en aguas tranquilas, o pudo grabar la mezcla por excavadores de diferentes capas de sedimentos. Se forman de Sedimentos arrecifales. El total de sedimentos producidos se deriva de cinco grupos principales de organismos: corales, algas coralinas, algas verdes, foraminíferos y moluscos. Se presentan variaciones locales en partículas no biogénicas como ooides e intraclastos. Incluyen también partículas carbonatadas acumuladas en bancos o apiladas por transporte físico, principalmente en barras, dunas y planicies deltaicas. La textura del sedimento arrecifal es el resultado de tres factores principales: el tipo de organismos que construyen el armazón, la actividad del oleaje y la desintegración producida por los mismos organismos.
82.20 a 84.5 m.	GRAINSTONE. - Se depositan en ambientes de energía alta a moderada, pero su importancia hidráulica puede variar. Dunham (1962) proporcionó varias sugerencias para su origen: pudieron ser depositados por las corrientes que abandonan los granos y el barro de derivación a otra área, o (3) pudieron ser un producto de criba de los sedimentos fangosos previamente depositados. Se presentan como granos en rocas carbonato de predominio esquelético y no esquelético. La ausencia de lodo tiene varias causas: el depósito de granos en entornos de alta energía, deposición de corrientes - ambientes controlados, aportan lodo a partir de las mezclas de grano / lodo previamente depositados. El Ambiente sedimentario son Rampas carbonatadas: Es un tipo de estructura de pendiente suave que se forman donde no hay presencia de arrecifes, como regiones de agua profunda, alta salinidad y gran deposición de material terrígeno clástico. Las corrientes de marea distribuyen el sedimento carbonatado y tienen una fuerte influencia en facies costeras.
84.5 a 105.25	PACKSTONE. - Indican una serie de propiedades de deposición. Sugiere procesos de baja energía, mientras que la abundancia de granos sugiere procesos de mayor energía. Pudo el resultado de la prolífica producción de granos en aguas tranquilas, o pudo grabar la mezcla por excavadores de diferentes capas de sedimentos.

En la Fig. 4.4 se presenta la litología caracterizada en el intervalo 3

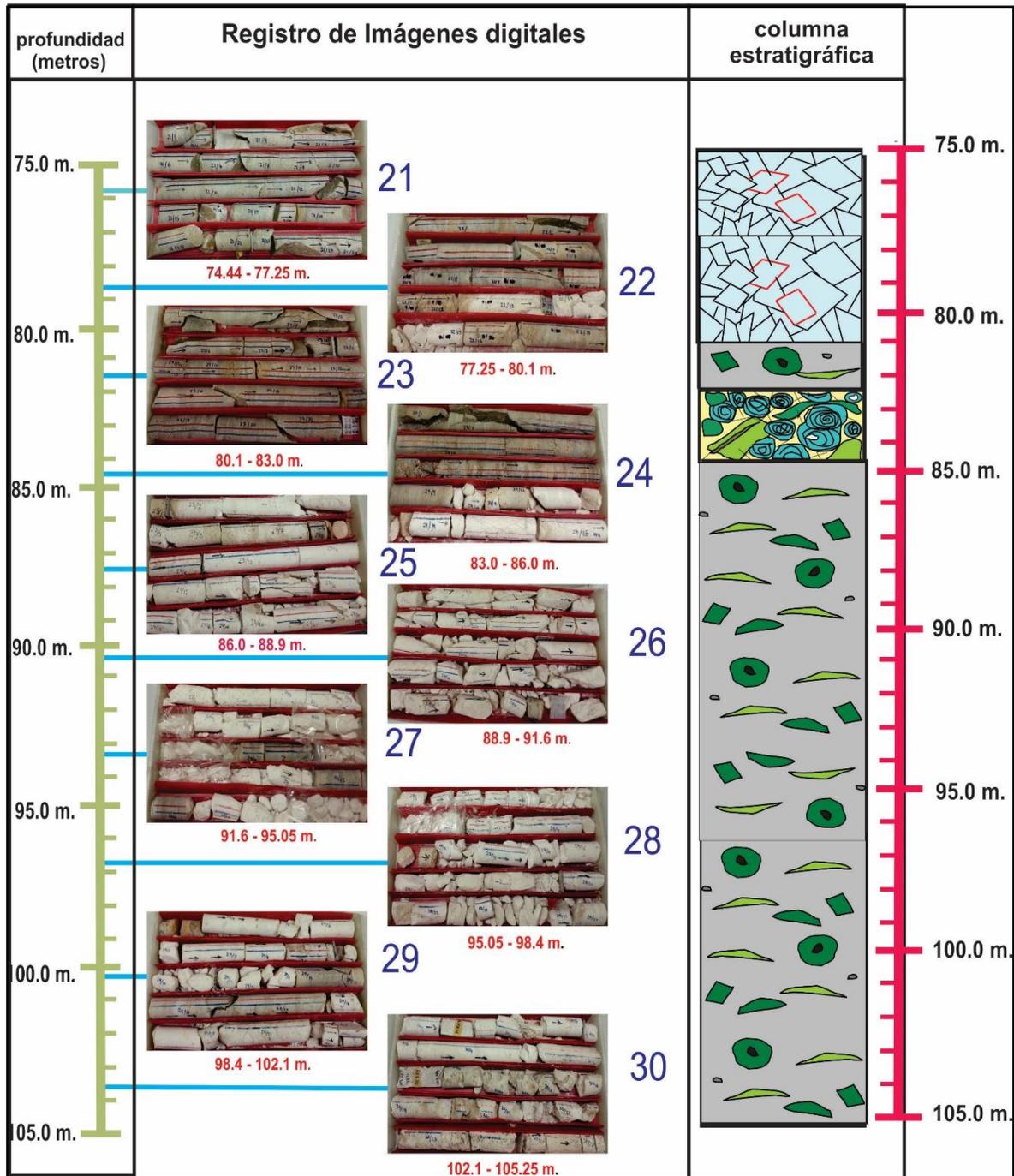


Fig. 4.4 Registro de imágenes digitales y columna estratigráfica que representa el intervalo 2 analizado de la profundidad de 74.44 a 105.25 m.

Intervalo 4 de 105.25 a 143.25 m. (Caja 31-40)

Este intervalo se describe en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4	
Profundidad	Descripción de las muestras
105.25 a 113.40 m.	WACKSTONE. - Indica que se depositó en corrientes de aguas tranquilas con la restricción de los organismos productores de granos, representando un ajuste de deposición de baja energía en un ambiente sedimentario evaporítico. Se trata de un ambiente caracterizados por la precipitación de minerales mediante la evaporación de un cuerpo de agua (salmuera), donde se verifica una separación por densidad. Dicho cuerpo es mantenido continuo o periódicamente por el agua de mar (flujo marino) que entra, a través de una barrera de poca profundidad, en una cuenca restringida, cerrada o confinada, no necesariamente muy profunda.
113.40 a 134 m.	BOUNSTONE. - Las rocas carbonatadas que muestra signos de estar atado durante la deposición, se generan en un ambiente sedimentario arrecifal. El total de sedimentos producidos se deriva de cinco grupos principales de organismos: corales, algas coralinas, algas verdes, foraminíferos y moluscos. Se presentan variaciones locales en partículas no biogénicas como ooides e intraclastos. Incluyen también partículas carbonatadas acumuladas en bancos o apiladas por transporte físico, principalmente en barras, dunas y planicies deltaicas. La textura del sedimento arrecifal es el resultado de tres factores principales: el tipo de organismos que construyen el armazón, la actividad del oleaje y la desintegración producida por los mismos organismos.
134 a 137.40 m.	PACKSTONE. - Indican una serie de propiedades de deposición. Sugiere procesos de baja energía, mientras que la abundancia de granos sugiere procesos de mayor energía. Pudo ser el resultado de la prolífica producción de granos en aguas tranquilas, o pudo grabar la mezcla por excavadores de diferentes capas de sedimentos. Se forman por sedimentos arrecifales. El total de sedimentos producidos se deriva de cinco grupos principales de organismos: corales, algas coralinas, algas verdes, foraminíferos y moluscos. Se presentan variaciones locales en partículas no biogénicas como ooides e intraclastos. Incluyen también partículas carbonatadas acumuladas en bancos o apiladas por transporte físico, principalmente en barras, dunas y planicies deltaicas. La textura del sedimento arrecifal es el resultado de tres factores principales: el tipo de organismos que construyen el armazón, la actividad del oleaje y la desintegración producida por los mismos organismos.
137.40 a 143.25 m.	CALIZA RECRISTALIZADA. -Roca sedimentaria de origen químico, cuya composición es carbonato de calcio recristalizado. Es el resultado del reemplazamiento de calcitas cementadas en aguas poco profundas, su origen es de la sedimentación de caparazones de organismos del plancton marino en los océanos.

Imagen de la Litología en el último intervalo. (Fig. 4.5)

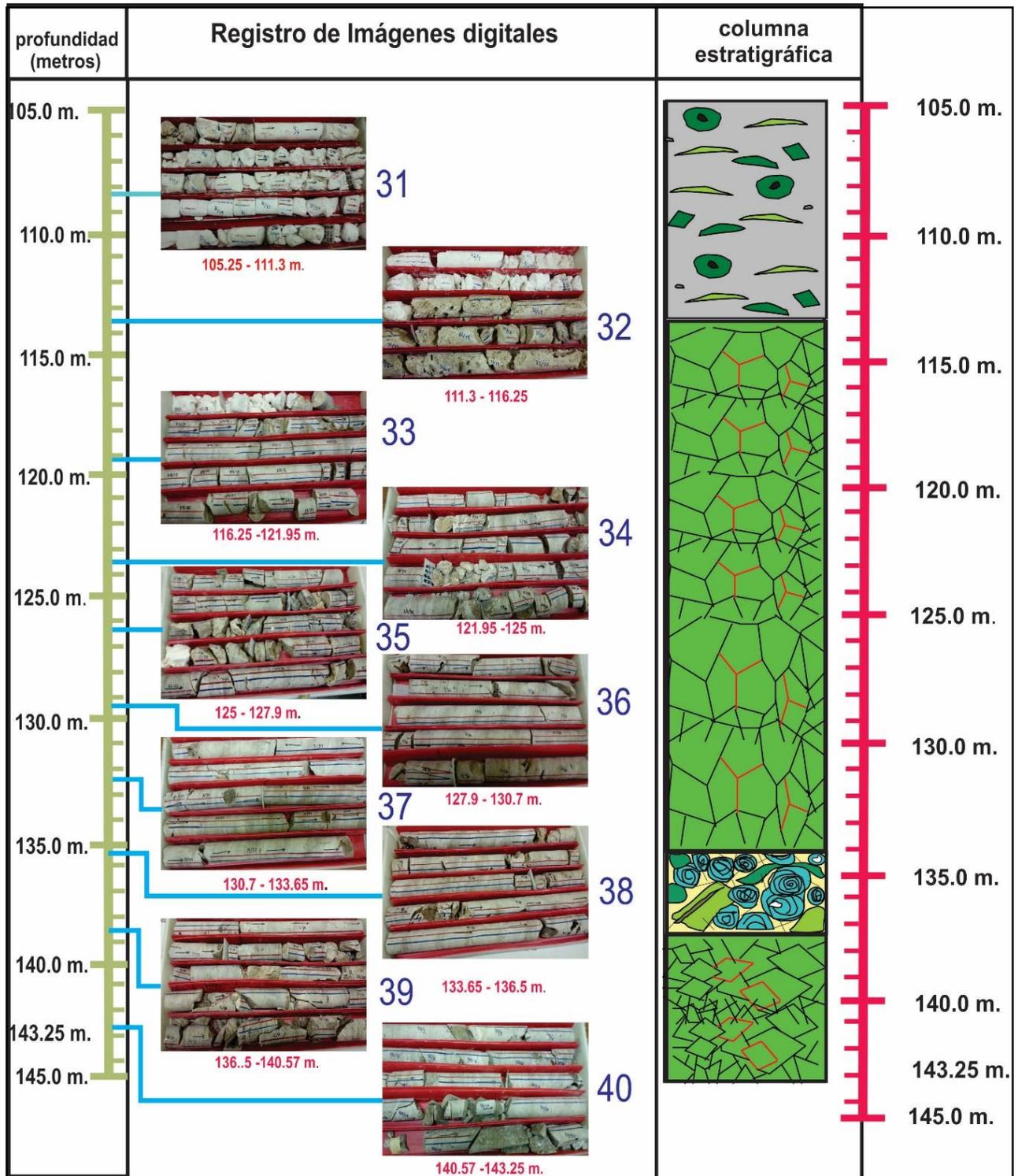


Fig. 4.5 Registro de imágenes digitales y columna estratigráfica que representa el intervalo 2 analizado de la profundidad de 105.25 a 143.25 m.

4.3 Interpretación del Registro Químico.

El registro químico se aplicó a 143.25 metros de núcleos del pozo Tecoh, los datos obtenidos durante la toma del registro están interpretados en esta sección, los tiempos de reacción del ácido clorhídrico a las muestras se reportaron para distinguir los diferentes cambios litológicos, de igual manera se fotografiaron, las secciones de muestreo se ubicaron en una columna de profundidad.

La caracterización de la formación se realizó considerando como principal parámetro, el tiempo de reacción del ácido con las muestras para determinar el contenido de calcita, esta reacción nos da indicios de los diferentes cambios de formación y por lo tanto, los diferentes tipos de carbonatos presentes en la secuencia estudiada.

Este método se aplicó principalmente para determinar las zonas de calizas y dolomías, y realizar una zonificación de la formación que no es apreciable con las otras técnicas, el registro químico resulto ser muy eficaz en esta formación dado que las muestras en estudio son carbonatos principalmente.

Esta técnica es fundamental para distinguir entre las dolomías y las calizas microcristalinas que son irreconocibles a simple vista por los intérpretes, la caracterización de carbonatos es una tarea muy compleja y se deben aplicar múltiples técnicas de laboratorio y de campo para realizar una estimación de la roca estudiada con el fin de determinar sus propiedades petrofísicas, esta técnica resulta ser muy práctica y de bajo costo, la técnica fue fundamental en la caracterización de los núcleos del pozo Tecoh.

Como se ha venido comentando en otros capítulos, el principio teórico de la reacción de ácido clorhídrico con la calcita fue esencial para la zonificación y definir la cima y la base de cada estrato que se presentan en la secuencia, los diferentes tiempos de reacción hicieron posible distinguir los diferentes tipos de carbonatos.

Los diferentes tipos de carbonatos que se identificaron se correlacionaron a una columna de profundidad, para distinguir las diferentes zonas, posteriormente se construyó una columna estratigráfica caracterizando los estratos y con ello caracterizar la formación que es principal objetivo de este trabajo.

Las ilustraciones son el resultado de la interpretación de los datos obtenidos en la formación, se encuentran constituidas por tres carriles, el primero representa la profundidad de la secuencia, el segundo contiene las imágenes del muestreo y la aplicación de la técnica, las imágenes son ubicadas a la profundidad de la medición y el tercero es la columna estratigráfica representativa de cada estrato.

La columna extraída de la información, es de gran importancia para la documentación de las secuencia presentes en estos núcleos y de gran impacto en la caracterización del pozo.

La aplicación de ácido clorhídrico como técnica para caracterizar carbonatos, tiene como finalidad conocer el grado de contaminación de las muestras con material arcilloso y el contenido de magnesio.

Los tiempos de reacción de la muestras es fundamental para identificar el tipo de roca presente en la formación, con estos datos podemos tener una inferencia del tipo de carbonato presente, dado que para una caracterización más exacta es indispensable la aplicación de otro tipo de técnicas de

laboratorio más especializadas tales como muestras en láminas delgadas para identificar el tipo de organismo presentes y los estudios de fluorescencia para determinar el contenido de elementos mayores y traza.

Con los tiempos de reacción reportados se realizó una clasificación determinando el grado de minerales presentes, el tiempo de reacción, la pigmentación, las posiciones en un diagrama cuaternario Calcita, Dolomita, Cuarzo y Arcilla (Fig.4.6).

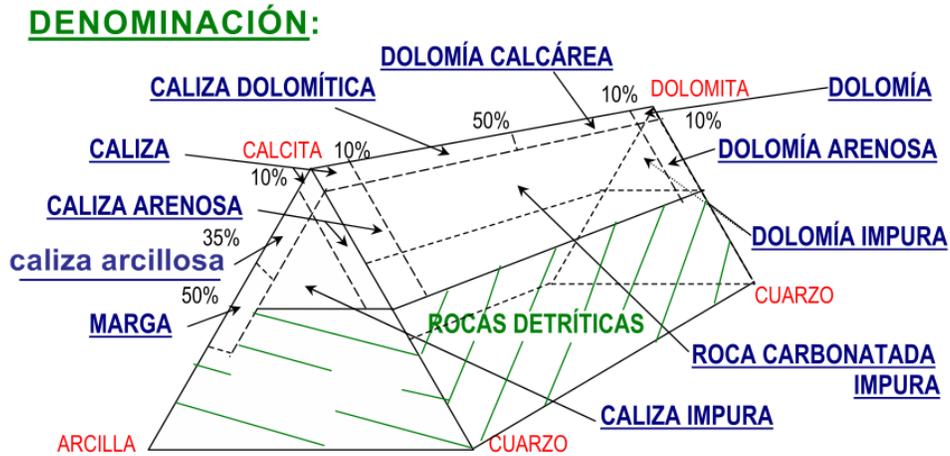


Fig. 4.6 Diagrama cuaternario Calcita, Dolomita, Cuarzo y Acilla

La simbología para determinar el tipo de carbonato y construir una columna estratigráfica representativa de la formación se presenta a continuación (Fig. 4.7).

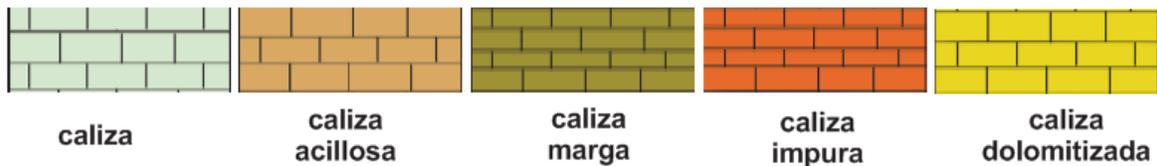


Fig. 4.7 Simbología de secuencias carbonatadas

Las Figs. 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 son representativas del método aplicado y de las diferentes zonas encontradas en la secuencia, que son fundamentales para la construcción de la columna estratigráfica representativa de los núcleos del pozo Tecoh.

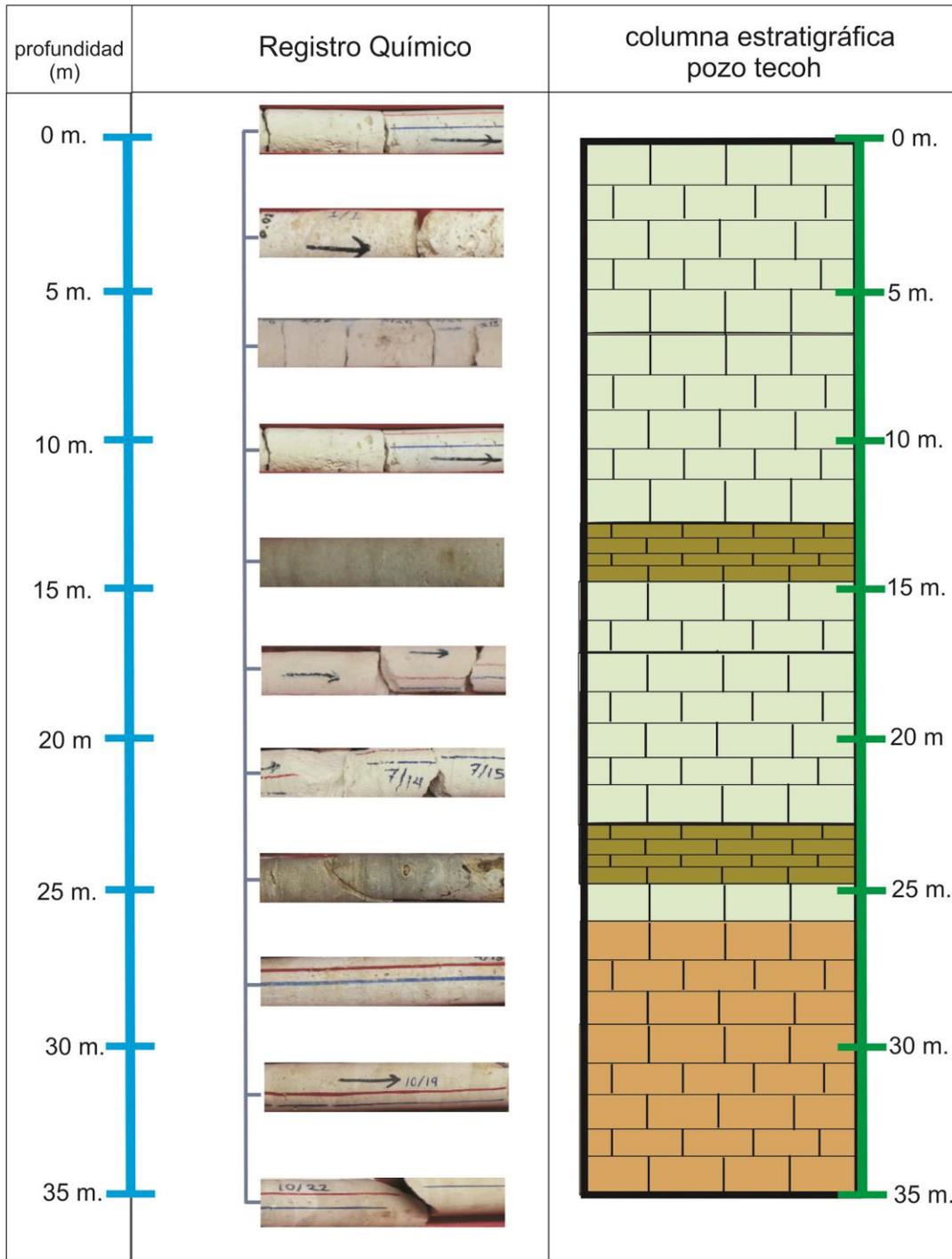


Fig. 4.8 Registro Químico aplicado a las muestras del pozo Tecoh de la profundidad de 0 a 35 metros

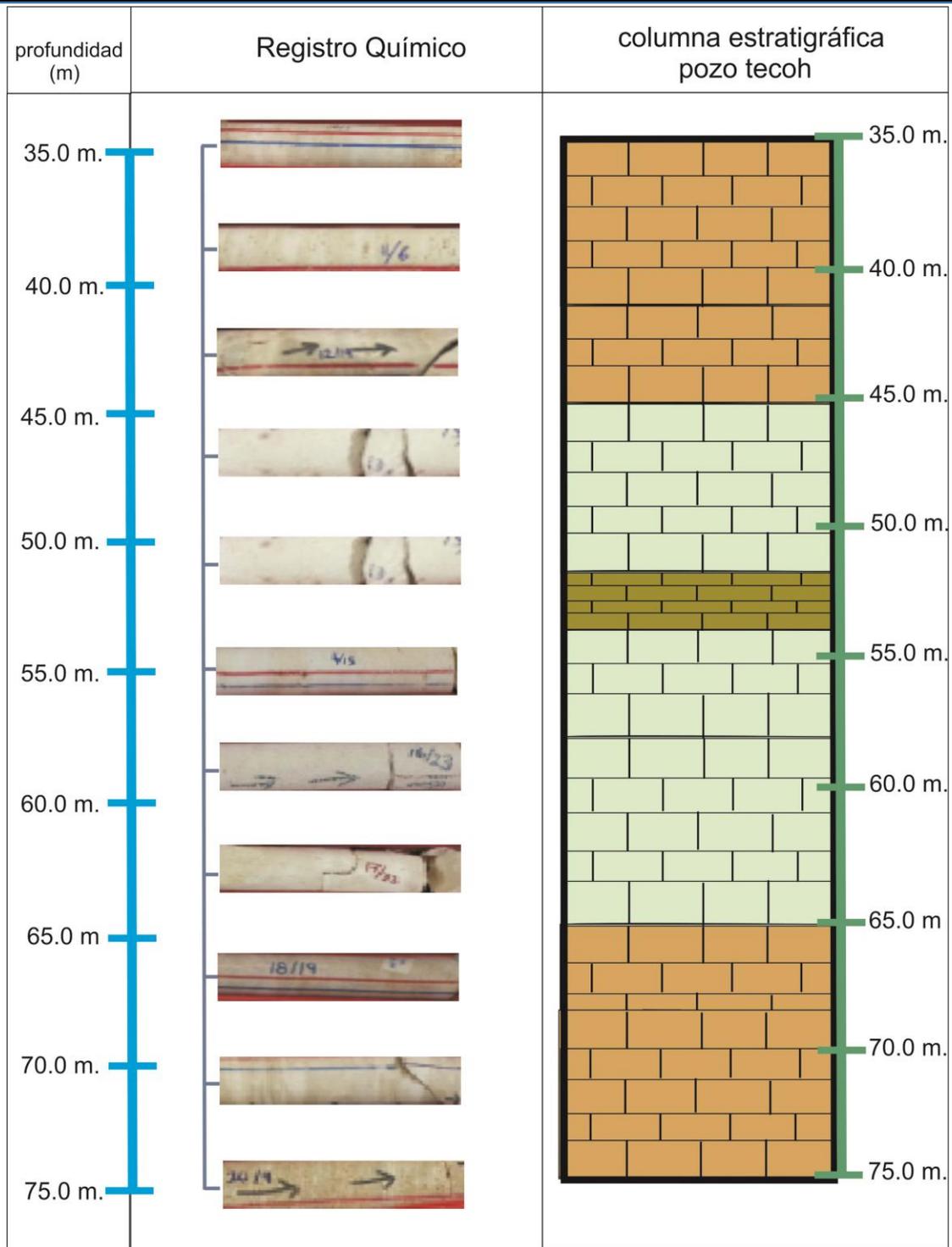


Fig. 4.9 Registro Químico aplicado a las muestras del pozo Tecoh de la profundidad de 35 a 75 metros.

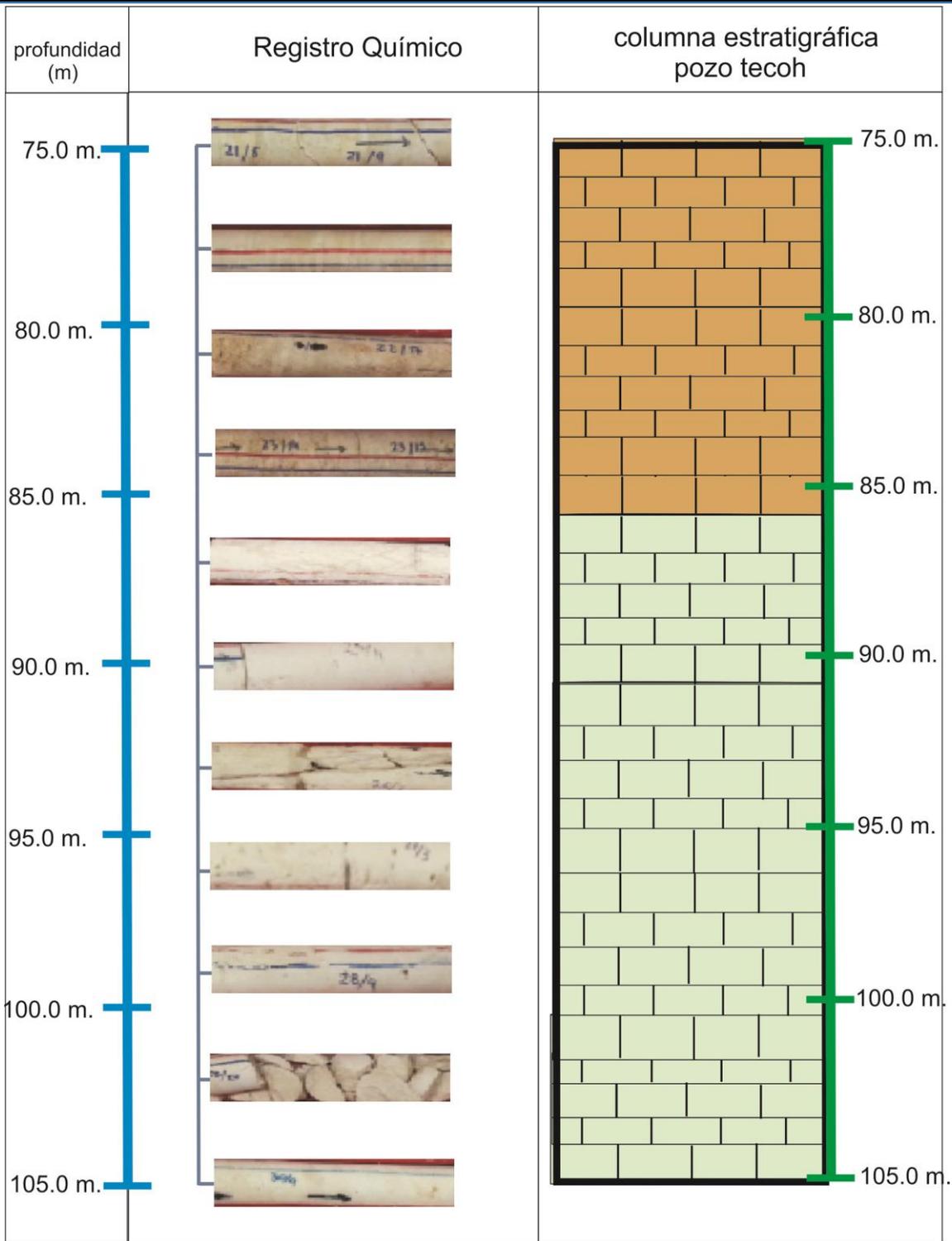


Fig. 4.10 Registro Químico aplicado a las muestras del pozo Tecoh de la profundidad de 75 a 105 metros.

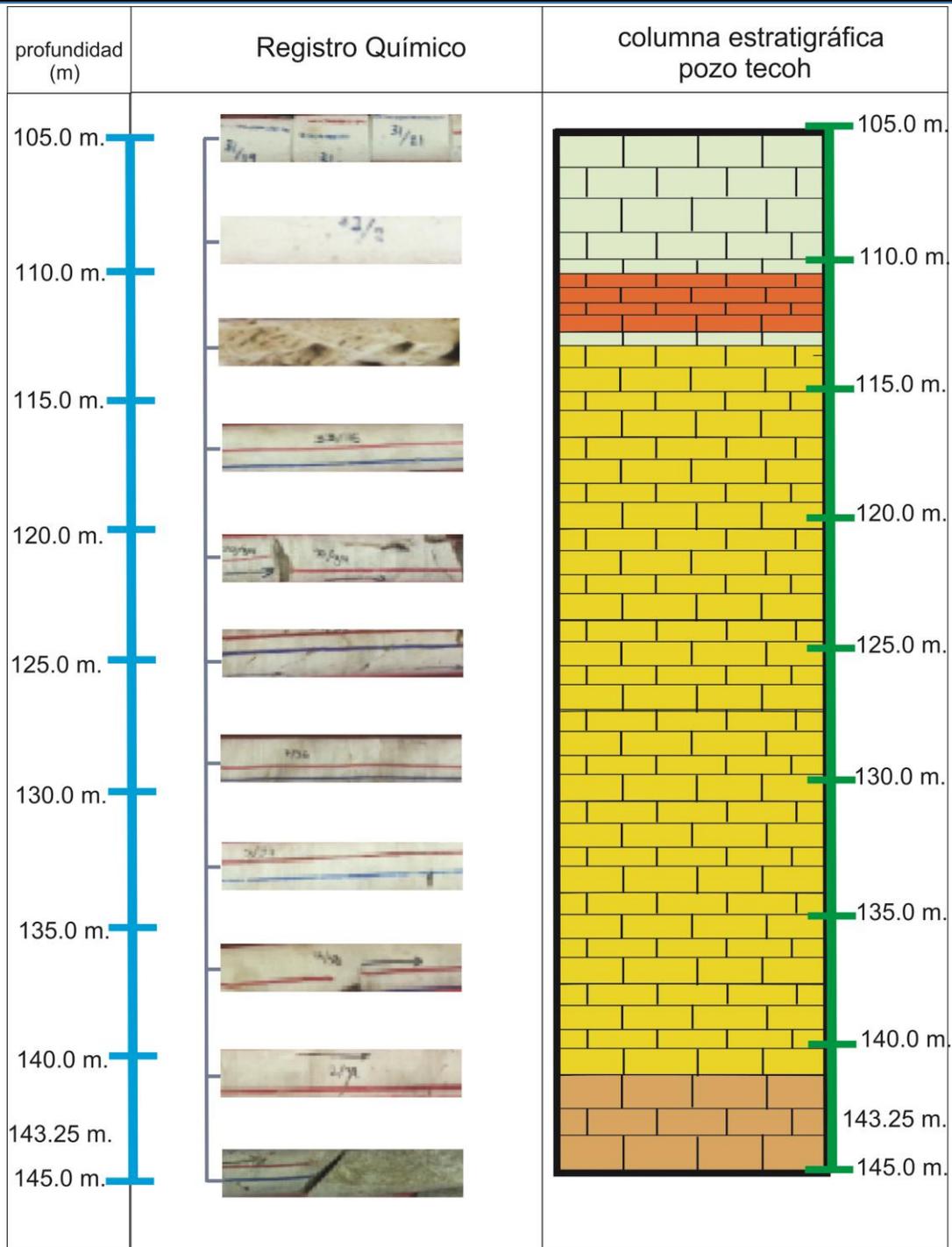


Fig. 4.11 Registro Químico aplicado a las muestras del pozo Tecoh de la profundidad de 105 a 143.25 metros.

4.4 Interpretación del Registro de Susceptibilidad Magnética

Los datos y las curvas obtenidas en este registro se interpretaron para identificar las zonas de calizas y dolomías, con la identificación y caracterización de las zonas se construyó una columna estratigráfica representativa de la zona nucleada, los histogramas de frecuencia que se construyeron con los datos arrojados por la herramienta aclaran las propiedades magnéticas de los sedimentos, las tablas describen el comportamiento estadístico de los datos con la intención de caracterizar el comportamiento de susceptibilidad magnética y que representan el contenido de minerales magnéticos y paramagnéticos.

La zonificación se obtuvo mediante los cambios de la curva de respuesta del registro de susceptibilidad magnética presentado en el capítulo tres, estos cambios representan los cambios de litología, la litología presente son secuencias de calizas y dolomías, este método se presenta como una propuesta para caracterizar yacimientos carbonatados, es importante tener en cuenta la gran complejidad que tiene la interpretación de este tipo de formaciones.

Intervalo 1 de 0 32.27 Metros.

En este intervalo se puede identificar el cambio de litología a los 10.92 metros de profundidad, el primer estrato presente es de caliza y el segundo de dolomías (Tabla 4.5)

Tabla 4.5	
N. de Estrato	Descripción de los datos de la unidad
Estrato 1 (0 – 10.92m)	En el estrato 1 se recolectaron un total de 93 mediciones, las cuales arrojaron datos de Susceptibilidad Magnética que vario de -12 hasta 26.5, el tipo de distribución de este histograma es una distribución alabeada a la derecha, el cual indica que 77 mediciones cayeron en el rango de -12 a -6.5, marcado en el histograma como la marca de clase que tiene en promedio -9.25,(primera marca de clase) lo cual indica que esta unidad tiene susceptibilidad magnética en su mayoría negativa, oscilando los -10. Para ser exactos 85 de 93 mediciones en esta unidad tienen Susceptibilidad Magnética Negativa, representando más del 90% de las mediciones.
Estrato 2 (10.92m – 32.27)	En el segundo estrato, el histograma representa una distribución normal, En esta unidad se recolectaron un total de 177 mediciones, los cuales tuvieron una variación en los resultados de -3.8 hasta 4.2, El intervalo donde cayeron la mayoría de los datos, que fueron 66, fue el de -0.3, se concluye que los datos se acercan a la Susceptibilidad Magnética cero. La amplitud de los intervalos fue de una unidad, por lo que el rango del intervalo 4 es de -0.8 a 0.2, 102 datos, oscilan en Susceptibilidad Magnética negativa, representando el 57% de los datos, pero en general, esta unidad, en cuanto a Susceptibilidad Magnética positiva y negativa, son bajas.

En la Fig. 4.12 se presenta el registro de susceptibilidad magnética interpretado, en el primer carril se presenta la profundidad, en el carril dos la profundidad, en el carril 3 los histogramas de frecuencia de las unidades y en el carril cuatro la columna estratigráfica representativa cada estrato.

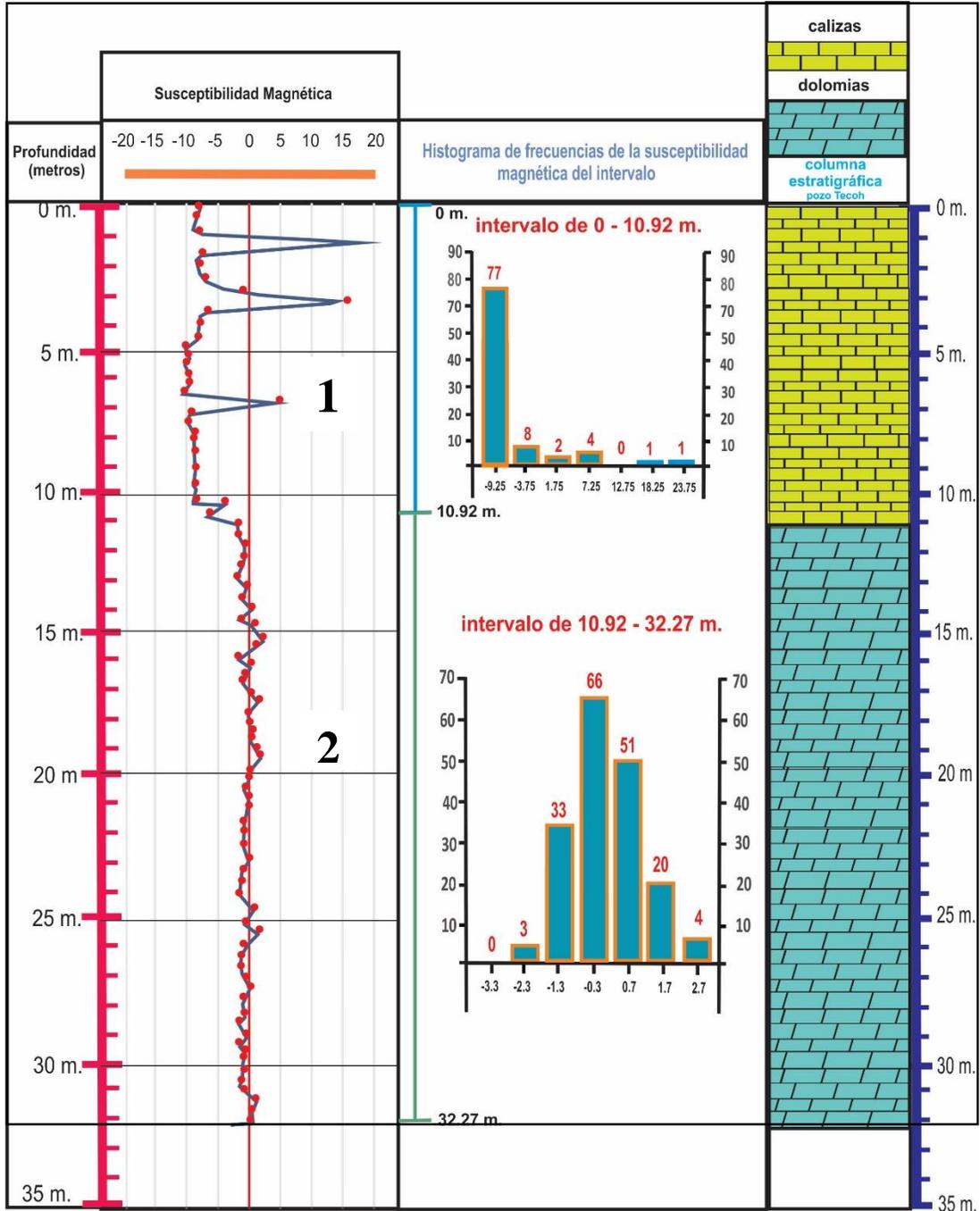


Fig. 4.12 Interpretación del registro de susceptibilidad magnética del intervalo 1

Intervalo 2 de 32.27 a 67.31 Metros.

La curva continúa con cambios abruptos representativos de calizas y dolomías, estos cambios nos permiten determinar zonas de calizas y dolomías, los datos capturados e interpretados en este intervalo se presentan en la tabla 4.5.

El estrato tres se identifica como calizas y el cuarto de dolomías, con esta interpretación se presume una depositación cíclica en la secuencia. La litología característica de estas formaciones se presenta en cuarto carril de la figura, la columna es representativa de este intervalo. (Tabla 4.6)

Tabla 4.6	
N. de Estrato	Descripción de los datos de la unidad
Estrato 3 (32.27 – 43.62 m.)	En el estrato 3 su histograma es una distribución normal, la cual representa a 93 mediciones capturadas, en esta unidad, donde la Susceptibilidad Magnética vario de -11.65 hasta -1.15, por lo que en su totalidad tiene Susceptibilidad Magnética Negativa, 46 de 93 datos cayeron en el tercer intervalo de marca de clase -7.9.
Estrato 4 (43.62 – 67.31 m.)	En la unidad 4 su histograma se comporta con distribución sesgada, se recolectaron 168 mediciones variando de -8.2 a 3.8, pero aunque su variación es amplia, la mayor parte de los datos se inclinan a tener de -2 hasta más de 2.0, el intervalo que arrojó más datos fue el sexto con marca de clase de 0.02, que tuvo 53 mediciones, representando el 31% de las mediciones, tres intervalos, los cuales se agrupan entre el quinto, sexto y séptimo intervalos tuvieron 148 mediciones, los cuales representan el 88% de los datos, tienen juntos un rango de -2.2 hasta 2.3, se concluye que se presentó en su mayoría Susceptibilidad Magnética baja, sea negativa o positiva, pero se pudo presentar diferencias pequeñas en la litología que se concluye que existan espesores pequeños de litologías distintas en la unidad, las cuales en su mayoría son de Susceptibilidad Magnética Negativa que oscila de -3 hasta -8.

En la Fig. 4.13 se presenta el intervalo 2 de la secuencia analizada y caracterizada con el registro de susceptibilidad magnética

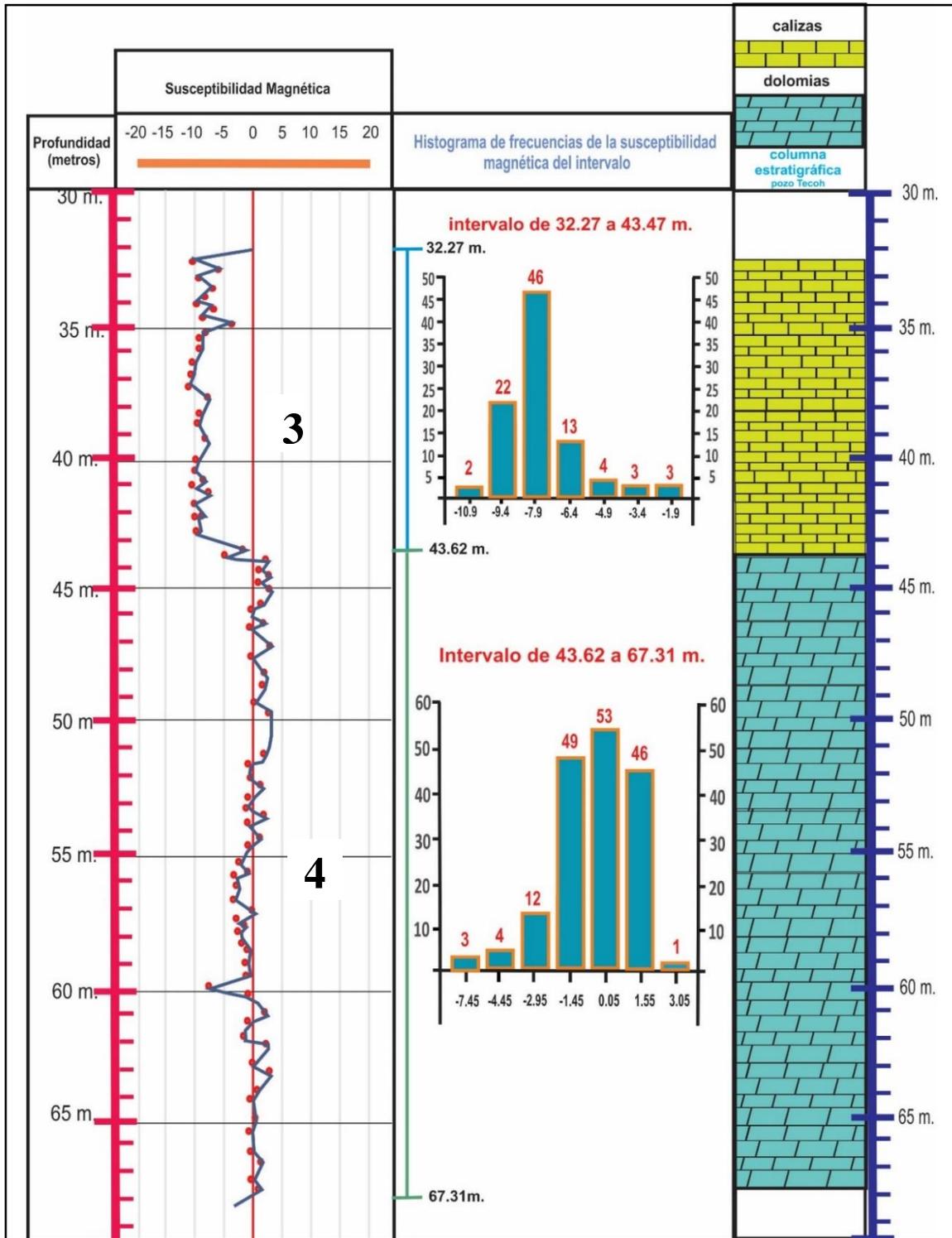


Fig. 4.13 Interpretación del registro de susceptibilidad magnética del intervalo 2

Intervalo 3 de 67.31 a 95.56 Metros.

En este intervalo la formación continua con calizas y dolomías de propiedades magnéticas similares a las primeras, la formación está representada con los principios teóricos antes mencionados caracterizados de la misma forma.

El comportamiento de los datos en los histogramas de frecuencia muestra que existen diferentes tipos de calizas y dolomías en la secuencia. (Tabla 4.7)

Tabla 4.7	
N. de Estrato	Descripción de los datos de la unidad
Estrato 5 (67.31 – 78.31 m.)	La unidad 5 en su histograma tiene una distribución sesgada. En esta unidad se rescataron 102 mediciones, con una variación de -14.35 hasta 3.15, por lo que a simple vista se toma que la mayoría de los datos son de Susceptibilidad Magnética Negativa. Al ser sesgada, también es indicativa que la mayoría de los datos se agrupan en dos intervalos, el segundo y el tercero, con rango de -11.85 hasta -4.35, con un total de 84 datos, representando el 82% de los datos. Litológicamente, se presenta el dominio de litologías con Susceptibilidad Magnética Negativa, pero también se presenta variaciones pequeñas de litologías distintas.
Estrato 6 (78.31 – 95.56 m.)	La unidad 6 tiene en su histograma una distribución normal, con variación de -5.75 hasta 6.25, de un total de 168 mediciones, el cuarto intervalo agrupa 79 mediciones, con un rango de -1.25 hasta 0.25, por lo que hay una distribución aproximada de polos equitativos, que se puede estimar que la susceptibilidad magnética negativa tiene el mismo número de datos que la susceptibilidad magnética positiva, pero tienden los datos a tener susceptibilidades bajas, sean negativas o positivas, el cuarto intervalo representa el 47% de las mediciones, las cuales se acerca a la Susceptibilidad Magnética cero, y tomando en cuenta los intervalos tres, cuatro y cinco, los cuales concentran la mayoría de las mediciones, se concluye que de un rango de -2.75 hasta 1.75, el 84% de las mediciones caen en este rango, por lo que ha dominio de litologías de Susceptibilidad Magnética bajas, sean positivas o negativas.

En la ilustración que se muestra en la Fig. 4.14 se presenta la caracterización del intervalo tres y la variación litológica en la secuencia estratigráfica.

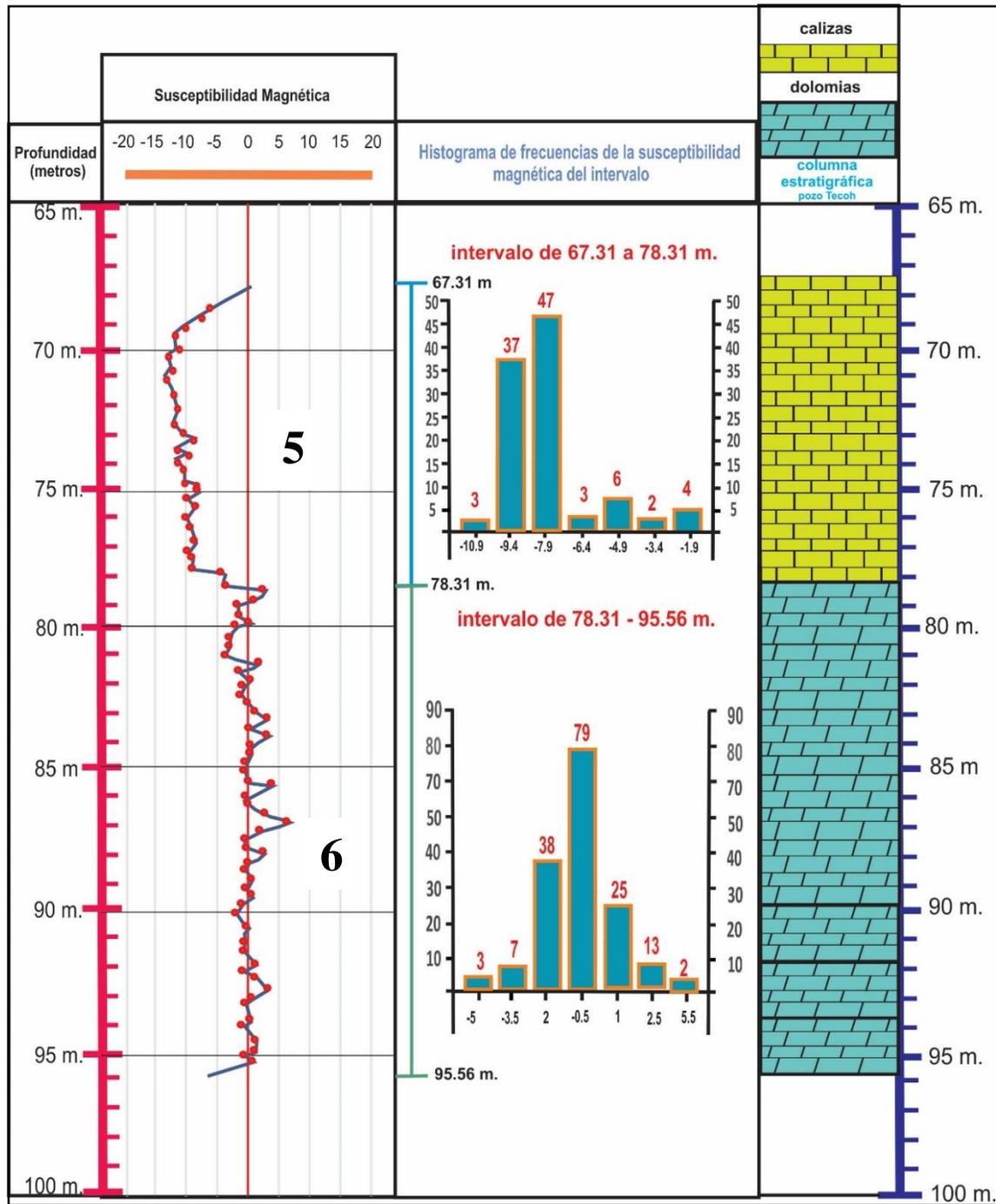


Fig. 4.14 Interpretación del registro de susceptibilidad magnética del intervalo 3

Intervalo 4 de 95.56 a 138.48 Metros.

A continuación en la Tabla 4.8 se describe el estudio estadístico de los valores de susceptibilidad magnética, se realizó un análisis para cada estrato y ver las tendencias de estas, esto con fin de entender el comportamiento de la susceptibilidad magnética en calizas y dolomías.

El entendimiento de las características específicas de los Carbonatos es de suma importancia para la industria petrolera nacional, ya que la máxima acumulación de hidrocarburos en el territorio mexicano se encuentra almacenados en estos tan complejos sistemas rocosos.

Tabla 4.8	
N. de Estrato	Descripción de los datos de la unidad
Estrato 7 (96.46 – 105.11 m.)	En la unidad 7 se presenta en el histograma una distribución normal, representando el comportamiento de 90 mediciones con variación de -16.9 hasta -2.9, por lo que en su totalidad la unidad tiene Susceptibilidad Magnética Negativa, tres intervalos concentran la mayoría de los datos, que tiene juntos un rango de -12.9 hasta -6.9 arrojando 77 datos, que representan el 85% de las mediciones de la unidad.
Estrato 8 (105.11 - 138.48 m.)	En la unidad 8 su histograma presenta una distribución sesgada con punto aislado, representando un total de 180 mediciones, con una variación de -3.45 hasta 12.55, por lo que es una unidad heterogénea, de litologías negativas y positivas, pero con dominio de litologías de susceptibilidad negativa, esto se refleja cuando se observa que en el segundo intervalo con rango de 1-45 a 0.55, 119 datos arroja dicho intervalo representado un 66% de las mediciones. Se considera que aproximadamente el 50% de los datos son de Susceptibilidad Negativa baja, pero la presencia de Susceptibilidad Positiva, es reflejo de que esta unidad tiene dos litologías dominantes, y el punto indica que 3 mediciones tuvieron una Susceptibilidad Magnética Positiva mayor a 10, pero se interpretaría como la presencia de litologías distintas, pero distribuidas aisladamente a lo largo de la unidad, por lo que serían la continuidad de diferentes estratos, hablando de dimensiones a lo largo a nivel yacimiento, ya que 177 mediciones varían de -3.45 hasta 4.55.

En la Fig. 4.15 se expone el comportamiento de la curva de susceptibilidad magnética e histogramas de frecuencia representativos de cada litología, así como la caracterización de la formación.

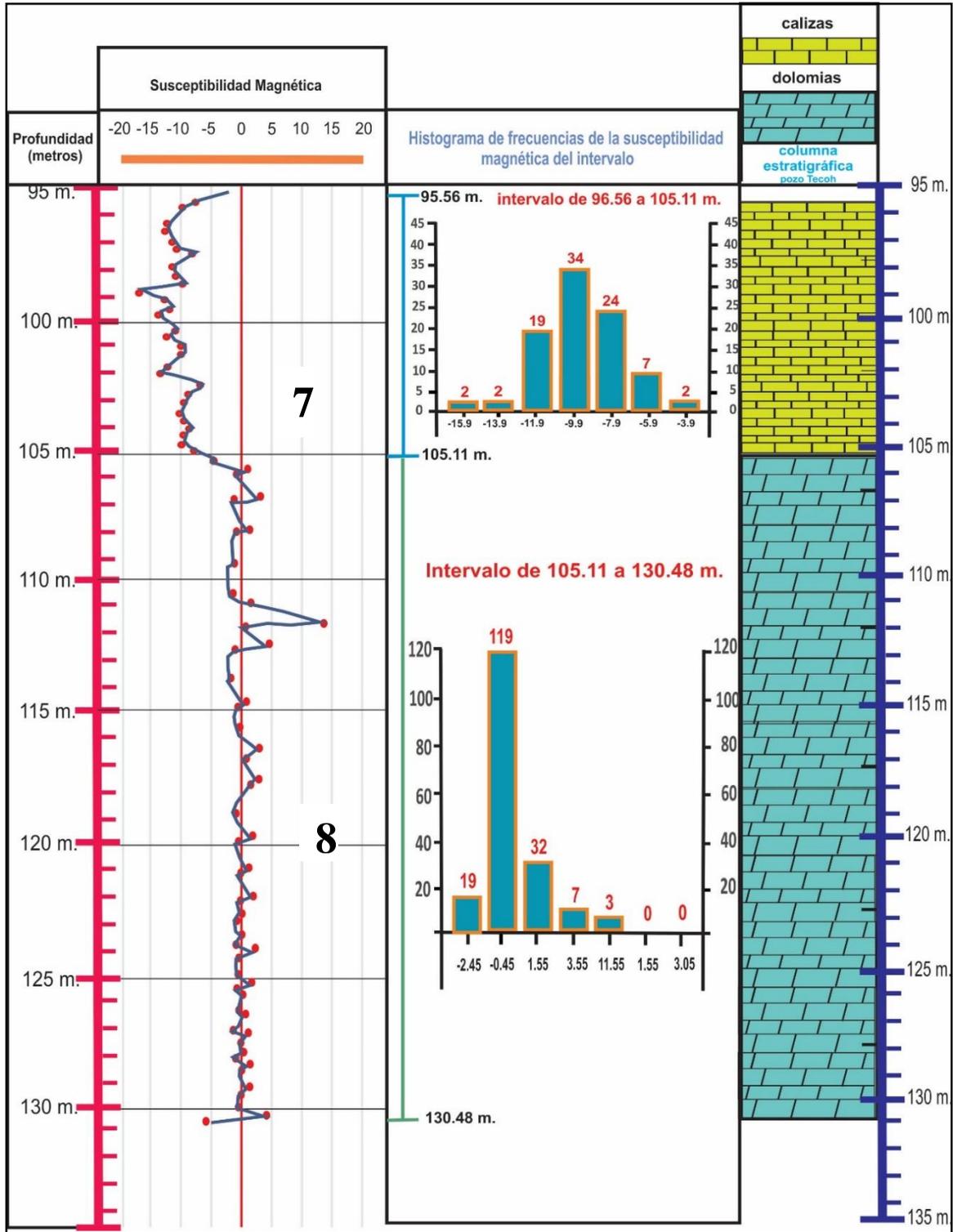


Fig. 4.15 Interpretación del registro de susceptibilidad magnética del intervalo 4

Intervalo 5 de 138.48 a 143.5 Metros.

Con el análisis de los intervalos anteriores y este último es evidente que los procesos de sedimentación son cíclicos, la diagénesis que sufrió cada estrato repercuten en las variaciones de susceptibilidad magnética.

El comportamiento de los estratos es similar en todos los casos para zonas de calizas y dolomías, los valores en la distribución estadística es diferente para cada caso lo cual significa la presencia de diferentes tipos de calizas y dolomías.

Tabla 4.9	
N. de Estrato	Descripción de los datos de la unidad
Estrato 9 (138.48 a 141 m.)	La unidad 9 tiene en su histograma una distribución sesgada, representando a 96 mediciones, con una variación de -12.95 hasta 1.05, por lo que se puede deducir que esta unidad predomina la Susceptibilidad Negativa, pero de acuerdo a la tendencia de los datos, la Susceptibilidad Dominante es menor a -7, los primeros tres estratos concentran un total de 81 datos, representando un 84% de las mediciones, con un rango total de -12.95 hasta -6.95.
Estrato 10 (141 – 143.5 m.)	La unidad 10 representa 45 mediciones, los cuales tuvieron una variación de -1.65 hasta 1.85, por lo que las Susceptibilidades son bajas, sean positivas o negativas, los primeros 3 intervalos concentran la mayor parte de las mediciones que son 34, las cuales representan el 76% de los datos, con un rango de -1.65 hasta -0.15, por lo que se refleja el dominio de la susceptibilidad negativa,

En la Fig. 4.16 se presenta una secuencia de calizas y al final una pequeña sección caracterizada como dolomías que continúan en la sección.

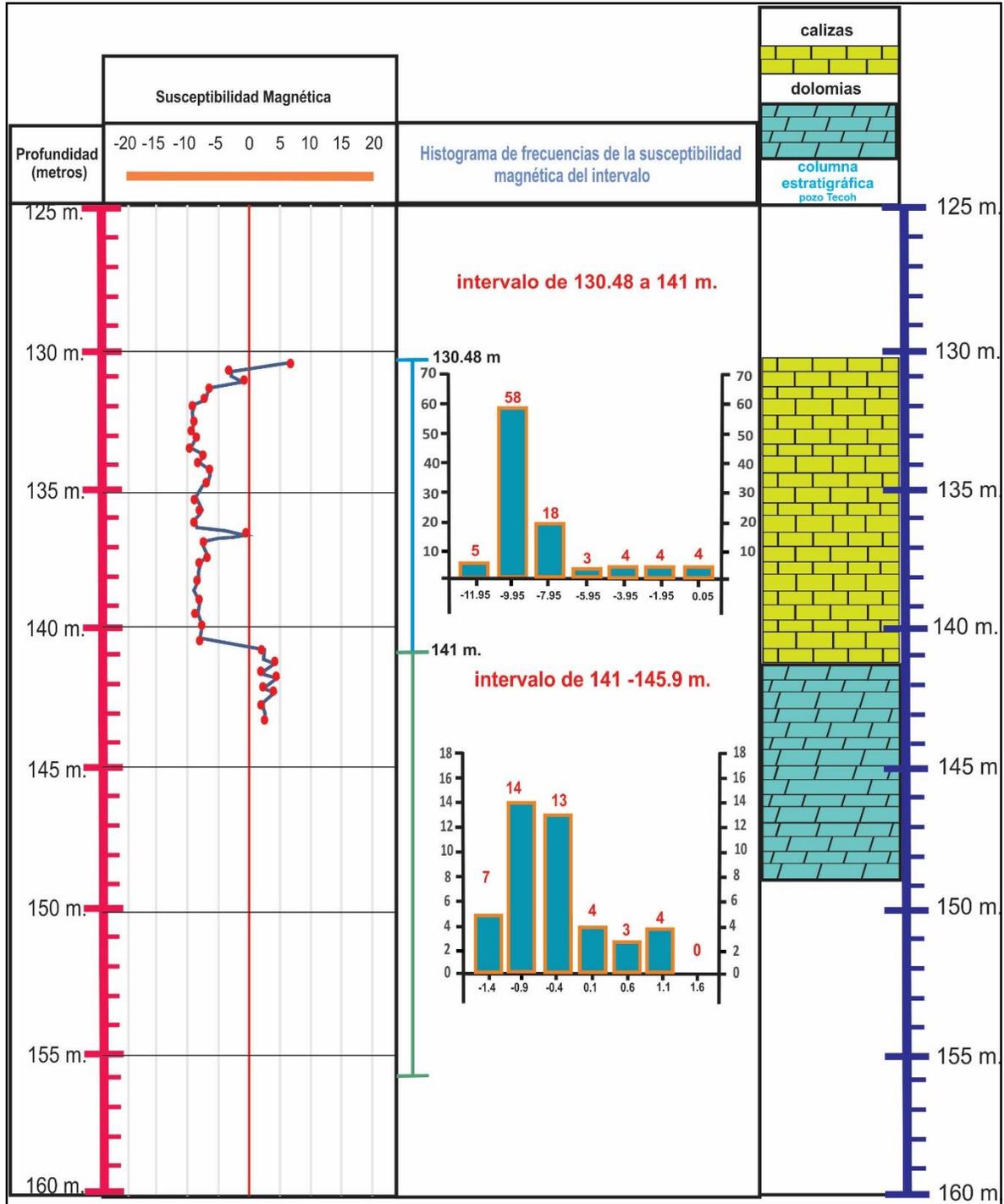


Fig. 4.16 Interpretación del registro de susceptibilidad magnética del intervalo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El método de análisis aplicado a los núcleos del pozo Tecoh fue fundamental para la caracterización de las muestras. Los datos recopilados y procesados fueron de buena calidad con lo cual se obtuvieron resultados precisos que determinan las propiedades de cada formación analizad., Las formaciones analizadas son de gran complejidad por la naturaleza sedimentaria y diagenética de los carbonatos, pese a estas circunstancias las técnicas aplicadas obtuvieron muy buena respuesta.

El método está enfocado al estudio de formaciones carbonatadas. El estudio de las rocas carbonatadas es de dedicación minuciosa. Este método es una forma de determinar las características de las rocas, en forma práctica, rápida, directa y eficaz, estas cualidades están comprobadas de manera formal en este trabajo como objetivo principal.

Con este trabajo se puede visualizar el potencial de esta técnica en la caracterización de formaciones carbonatadas. El método aplicado en este estudio resulta ser muy práctico y de bajo costo, la base fundamental para la aplicación práctica de este método es la caracterización de carbonatos, en esta tesis se presentan los resultados obtenidos con este método y su potencial.

La columna estratigráfica construida del registro de imágenes digitales es bastante representativo de las muestras analizadas y estudiadas. La columna construida con los datos recopilados en las muestras es de gran impacto para actualizar el primer modelo estático que se generó al nuclear el pozo. Una ventaja más del registro de imágenes digitales fue la creación de un inventario de las muestras, con lo cual se obtuvo la documentación precisa de la localización de los núcleos.

La construcción de un modelo estático con un método químico es de gran relevancia. Esta técnica resultó ser de gran importancia, refleja el potencial de la aplicación de ácido clorhídrico para la caracterización de formaciones de una manera práctica, la identificación de formaciones no hubiera sido tan exacta sin esta técnica. La técnica descrita en esta tesis determina aspectos que las otras técnicas no los reflejan, como la determinación de calizas microcristalinas y dolomía para obtener una zonificación más detallada.

Un estudio con referencia a la susceptibilidad magnética como medio de información y propiedad magnética de las rocas, fue un método eficaz para la determinación exacta entre las rocas carbonatadas, tomando en cuenta que son rocas heterogéneas, y que la proporción interna de estas son la causa de una diversidad alta entre ellas, por lo que es difícil su determinación a simple vista.

La implementación de los métodos magnéticos para la caracterización de formaciones no ha sido muy explotado, aquí se presenta un ejemplo de ingeniería practica para su aplicación con esta técnica. La técnica aplicada fue muy eficaz para localizar zonas de calizas y dolomías, las diferentes zonas determinadas y sus propiedades magnéticas se encuentra plasmadas en las imágenes del Capítulo 4, en las cuales se presenta claramente la eficiencia de este técnica en la caracterización de formaciones. La susceptibilidad magnética como la principal variable analizada en este método magnético reflejó un ambiente de depositación cíclico que se ve claramente en las curvas del registro. El análisis estadístico

presentó la calidad de las rocas y contenido mineralógico, esto con el fin de diferenciar calizas y dolomías, como el enfoque principal de esta tesis.

La finalidad de presentar este método con esta familia de registros, se fundamenta en la necesidad de caracterizar carbonatos, tomando en cuenta la necesidad de la explotación de este tipo de yacimientos. En la industria petrolera tiene dos enfoques principales, uno, es un nuevo horizonte para satisfacer las necesidades futuras de la industria en la exploración y explotación del recurso energético en este tipo de yacimientos, el segundo contexto es un nuevo conocimiento innovador y de complejidad magna de un método directo rápido y preciso que se pueda incorporarlo en la industria.

RECOMENDACIONES

- Un estudio con referencia a la susceptibilidad magnética como medio de información y propiedad magnética de las rocas, fue un método eficaz para la determinación exacta entre las rocas carbonatadas, tomando en cuenta que son rocas heterogéneas, y que la proporción interna de estas son la causa de una diversidad alta entre ellas, por lo que es difícil su determinación a simple vista.
- Este estudio realizado en el pozo Tecoh está dentro de la etapa de aplicación de este método, por lo que a simple vista, tomando en cuenta la primera impresión de ser rocas que se ven abandonadas, esto da idea que solo con dedicación y empeño, se puede visualizar que son el resultado de un estudio de alto impacto, por lo que este trabajo es solo un pilar de un cambio científico en la búsqueda de la verdad que data desde 65 millones de años.
- El tiempo que se invirtió en conocer las rocas carbonatadas es la antesala de un conocimiento basto de la diversidad del área de estas rocas, por lo tanto el estudio de las rocas carbonatadas en campo debe ser un estudio exhaustivo y dedicado para la determinación de decisiones.
- En este trabajo se realizaron tres métodos de investigación a los núcleos del Pozo Tecoh, químico, fotográfico y susceptibilidad magnética, dando como origen una metodología de registrar datos del pozo, en diversas formas, para la identificación de los datos en rubros de localización física, propiedades, y caracterización de rocas.
- Este método también representa en sí, inversión de tiempo y a su vez ahorro de tiempo de estudio, ya que el estudio de las rocas carbonatadas es de dedicación minuciosa, pero este método es una forma de determinar las características de las rocas, en forma práctica, rápida, directa y eficaz.
- La necesidad de presentar el método de los registros por susceptibilidad magnética fundamenta la idea tomando en cuenta la necesidad de la exploración de yacimientos de rocas carbonatadas en la industria petrolera tiene dos contextos, un nuevo horizonte por explorar donde las necesidades futuras de la industria es la exploración y explotación del recurso energético en este tipo de yacimientos requiere el segundo contexto nuevo conocimiento innovador y de complejidad magna por lo que un método directo rápido y preciso es necesario incorporarlo en la industria.

REFERENCIAS

- Petrophysics, DjebbarTiab y Erle C. Donaldson 2ª Edición., 2004 Ed. Elsevire- Gulf Professional Publishing
- Petrophysics, Peters Ekwere, 2007, Departament of Petroleum & Geophysics Engineering, The University of Texas at Austin.
- Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos, Magdalena Paris de Ferrer, 2010, ed Goajiro Blanco
- López – Doncel, Rubén, Manual para la clasificación de rocas carbonatadas, 2004, Folleto Técnico 127, Instituto de Geología, Editorial Universitaria, ISSN 0581-5207.
- Curso Geología General 1, UNAM, 2012.
- Análisis de Registros de Pozo de propiedades magnéticas en rocas carbonatadas y brechas. Jesús Gaspar Hernández Juárez, 2013, UNAM, Tesis Licenciatura
- Metodos no convencionales para caracterización de calizas y dolomías: estudio en la plataforma Carbonatada de Yucatan, Salomon Davila, Jose Daniel; Vazquez Sanchez, Claudio, Julio 2012, UNAM, Tesis Licenciatura
- Universidad de Chile Proyecto MECESUP UCH 0303 Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra www.dgf.uchile.cl/mece (provisorio) Área Temática: Mineralogía y Petrología. Desarrollado por: Marcelo Solari Corvalán. E-mail: msolari@cec.uchile.cl
- Introduction to carbonate Enviroments, Facies, and Facies Tracts, Robert G. Loucks, Charles Kerans, and Xavier Janson, Bureau of Economic Geology
- Microfacies of carbonate rocks: Analysis, Interpretation and Application, Flugel, Erik, 2004 Ed. Springer
- Petrofísica y Registros de Pozo, Curso Básico de Registros impartido por el Ing. José Bernardo Martell Andrade, UNAM, 2014.
- Bases Teóricas e Interpretación de Registros Geofísicos de Pozos, Arroyo Carrasco Alejandro, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1996.
- Interpretación de Perfiles, Volumen I, Documento de Schlumberger, Nueva York, 1972.
- Principios/Aplicaciones de la Interpretación de Registros, Documento de Schlumberger,
- Registros de Pozos, Parte 1. Teoría e Interpretación, Orlando Gómez Rivero, 1976,
- Caracterización de los sedimentos del Holoceno tardío del lago Santa María de Oro, Nayarit, utilizando métodos de magnetismo ambiental. Gabriel Vázquez Castro, Tesis de Maestría en Ciencias (Física del Interior de la Tierra), Mayo 2004, Ciudad Universitaria, México DF.
- Fracturamiento Hidráulico Multietapas, Alvarez Lopez Blanca Ingrid, Tema de Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero, México DF CU,
- NORMA ASTM D4373
- Apuntes de Electromagnetismo, Patricio Cordero, C. Romero, I.Saavedra, C. Utreras, Version 2009, Universidad de Chile.