



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propiedades Eléctricas y
Magnéticas en Núcleos de
Perforación del Pozo Yaxcopoil-1
(Península de Yucatán)**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Reynaldo Córdova Matías

DIRECTOR

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Contenido

Lista de Tablas, Figuras y Gráficos.....	iii
Resumen.....	xi
Introducción.....	13
1 Rocas Sedimentarias.....	14
1.1 Clasificación de rocas sedimentarias.....	15
1.2 Clasificación de rocas carbonatadas.....	18
1.3 Diferencias entre rocas areniscas y carbonatos.....	22
2 Propiedades Petrofísicas.....	25
2.1 Porosidad.....	25
2.2 Permeabilidad.....	29
2.3 Saturación.....	31
2.4 Mojabilidad.....	32
2.5 Resistividad.....	35
2.6 Factor de formación.....	36
2.7 Susceptibilidad magnética.....	40
2.8 Polarización inducida y cargabilidad.....	45
3 Métodos de Medición de Propiedades Petrofísicas.....	50
3.1 Registros geofísicos de pozo.....	52
3.2 Potencial espontáneo.....	54
3.3 Registro eléctrico.....	56
3.4 Registros radioactivos.....	58
3.5 Registros acústicos.....	59
3.6 Registros de imagen.....	63
3.7 Registro de resonancia magnética nuclear.....	64
3.8 Correlación de registros de pozo.....	65
3.9 Núcleos.....	66
4 Secuencia Carbonatada de la Península de Yucatán.....	68
4.1 Sistema petrolero en la provincia petrolera de la Plataforma de Yucatán.....	74
4.2 Cráter del Chicxulub.....	74
4.3 Pozo Yaxcopoil-1.....	77

5	Actividades en Laboratorio, Resultados y Discusión	87
5.1	Experimentos.....	89
5.2	Experimento 1	93
5.3	Experimento 2	110
6	Conclusiones	144
	Bibliografía.....	147
	Apéndice 1: Imágenes de Especies Foraminíferos en Rocas	151
	Apéndice 2 Manual de Uso: Magnetic Susceptibility Meter MS2.....	156
	Apéndice 3 Manual de Uso: Equipo Medidor SCIP (Sample Core Induction Polarization)	165
	Apéndice 4: Resistividad y Cargabilidad de las Cinco Muestras, en los Tres Escenarios, Experimento 1.....	177
	Apéndice 5: Longitud, Área, Densidad y Porosidad Vs Profundidad de las Muestras, Experimento 2.....	186
	Apéndice 6: Resistividad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2.....	189
	Apéndice 7: Cargabilidad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2.....	192
	Apéndice 8: Susceptibilidad Magnética a Profundidades Puntuales dentro del Intervalo, Experimento 2.....	195

Lista de Tablas, Figuras y Gráficos

Figura 2.1 Esquema del Sistema Poral.....	26
Figura 2.2 Ilustración de la porosidad efectiva, no efectiva y porosidad total	27
Figura 2.3 Ilustración del flujo de un fluido a través de un cuerpo y los factores que intervienen en el cálculo de la permeabilidad.....	30
Figura 2.4 Ángulo de contacto entre dos fases líquidas y una fase sólida y efecto de tubo capilar	34
Figura 2.5 Definición del contacto agua aceite y nivel de agua libre	34
Figura 2.6 Modelo de formación: 100% saturado de agua	37
Figura 2.7 Modelo de formación: saturado de agua y aceite	38
Figura 2.8 Momento magnético orbital de un electrón alrededor de su núcleo de protones y neutrones y momento magnético de su giro axial (spin axial)	40
Figura 2.9 Comparación de permeabilidades para materiales ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnéticos y el vacío.....	41
Figura 2.10 Diferentes tipos de comportamiento magnético (las flechas rellenas indican campo aplicado y las vacías la magnetización del material)	43
Figura 2.11 Polarización. a) Distribución de iones en equilibrio, b) polarización siguiendo la aplicación de un campo eléctrico.....	45
Figura 2.12 Variación del voltaje durante el periodo de carga y descarga.....	46
Figura 2.13 Forma de la onda del voltaje al inyectar corriente eléctrica en medios no polarizables (a) y polarizables (b)	46
Figura 2.14 Polarización de las partículas de arcilla	47
Figura 2.15 Polarización de membrana por efecto de concentración anormal de aniones en presencia de partículas de arcilla.....	47
Figura 2.16 Capa binaria en el límite entre las fases sólida y líquida	48
Figura 2.17 Polarización de electrodos. Efecto de la corriente en los límites electrolito/partícula semiconductora.....	48
Figura 2.18 Curva de decaimiento de la cargabilidad y los elementos para obtenerla	50
Figura 3.1 Diagrama esquemático de la toma de registro	53
Figura 3.2 Ejemplo de un registro de SP en una serie de lutitas y areniscas	55
Figura 3.3 Comparación del SP en arenas gruesas y delgadas.....	56
Figura 3.4 Representación esquemática de la zona lavada, zona de transición y zona virgen alrededor del pozo	57
Figura 3.5 Transmisión de la energía acústica.....	60
Figura 3.6 Ondas acústicas	61
Figura 3.7 Ondas acústicas de fuentes monopolares.....	61
Figura 3.8 Registrado y marcado en la recuperación de núcleos.....	67

Figura 4.1 Provincia petrolera Plataforma de Yucatán	69
Figura 4.2 Modelo esquemático sedimentario de la Plataforma de Yucatán	69
Figura 4.3 Sección geológica esquemática en la Plataforma de Yucatán	70
Figura 4.4 Columna estratigráfica de la Plataforma de Yucatán.....	71
Figura 4.5 Mapa de afloramientos del Paleoceno, Eoceno y Oligoceno.....	72
Figura 4.6 Identificación de materia orgánica en Yucatán: a) Materia amorfa de color amarillo-naranja, b) presencia de asfalto en fracturas y c) laminación de algas y bitúmenes pesados.....	73
Figura 4.7 Diagrama de Eventos del Sistema Petrolero Cretácico Inferior - Cretácico Medio Superior	74
Figura 4.8 Anomalía gravimétrica del cráter Chicxulub, mostrando su estructura de multi- anillo (Sharpton et al., 1993).....	75
Figura 4.9 Sección litológica de la estructura de impacto del Cráter de Chicxulub Urrutia Fucugauchi 1996	75
Figura 4.10 Modelo conceptual en dos dimensiones de la señal gravimétrica de un corte transversal, orientado este-oeste del cráter Chicxulub. (Sharpton et al., 1993).....	76
Figura 4.11 Localización del pozo Yaxcopoil-1	77
Figura 4.12 Equipo superficial rotatorio y barrena tipo corona usados en la perforación del pozo Yaxcopoil-1	78
Figura 4.13 Recuperación y marcado y resguardo del núcleo del pozo Yaxcopoil-1	79
Figura 4.14 Identificación de la secuencia en el pozo Yaxcopoil-1.....	79
Figura 4.15 Litología, bioestratigrafía y cambios paleoambientales inferidos en el pozo Yaxcopoil-1	81
Figura 4.16 Contacto litoestratigráfico entre la brecha de impacto suevítica (parte superior de la unidad H) y las calizas dolomíticas suprayacentes (unidad I).....	84
Figura 4.17 Interpretación general de los procesos geológicos y de la bioestratigrafía entre las cotas 974,59 [m] y 793,87 [m] del pozo Yaxcopoil-1.....	87
Figura 5.1 Fragmentos de núcleo ordenados dentro de los canales de la caja	88
Figura 5.2 Representación esquemática de la posición de las muestras con respecto de la columna total del pozo	90
Figura 5.3 Equipo MS2 y sonda magnética MS2E	91
Figura 5.4 Balanza analítica usada para medir la masa de las muestras	91
Figura 5.5 Equipo Medidor SCIP.....	92
Figura 5.6 Ejemplo de muestra con caras transversales paralelas.....	93
Figura 5.7 Medición de la masa de la muestra 359-15.....	94
Figura 5.8 Medición de la Susceptibilidad Magnética, Muestra 359-15, Experimento 1 ...	96
Figura 5.9 Cronograma de actividades para la medición de la resistividad a las cinco muestras del experimento 1	98
Figura 5.10 Valores y gráfica del Decaimiento de la Cargabilidad (muestra 359-15).....	100

Figura 5.11 Intervalo de núcleo del pozo Yaxcopoil-1 (899.7 a 920.99 m) contenido dentro de las cajas 227 a 236, Experimento 2	112
Figura 5.12 Representación esquemática de un segmento circular	113
Figura 5.13 Caja 234 de 915.15 a 917.44 [m], con dique de brecha suevita entre calizas dolomíticas.	119
Figura 5.14 Fotomicrografía a los 916 [m] (aproximadamente) Fragmento de silicato fundido completamente desvitrificado con textura microesferulítica (izquierda); Clasto de fusión desvitrificado (centro); Fragmento de fusión con textura fluida, parcialmente desvitrificado y fina caliza dolomítica metamorfoseada térmicamente a mármol cristalino grueso (derecha).	119
Figura 5.15 Muestras de mayor Porosidad y menor Densidad, Muestra 229-10 (izquierda) y Muestra 229-13 (derecha), Experimento 2	122
Figura 5.16 Muestra 232-1, con un cambio de facie, Experimento 2.....	123
Figura 5.17 Muestra de menor Porosidad, Muestra 231-11, Experimento 2.....	123
Figura 5.18 Muestra de mayor Densidad, Muestra 234-5, Experimento 2.....	123
Figura 5.19 Muestra inferior del dique de brecha suevita con alta Densidad y baja Porosidad, Muestra 234-12, Experimento 2.....	124
Figura 5.20 Ejemplo de muestras de alta Densidad y baja Porosidad, Muestra 227-8 (izquierda) y Muestra 227-8 (A) (derecha), Experimento 2.....	124
Figura 5.21 Muestras que registraron un aumento en la resistividad, Muestras 229-7 (izquierda) y 229-10 (derecha), Experimento 2	133
Tabla 1.1 Clasificación del tamaño de las partículas sedimentarias según la escala de Wentworth	14
Tabla 1.2 Clasificación de rocas sedimentarias (Grabau, 1904)	16
Tabla 1.3 Clasificación de rocas sedimentarias detríticas (Corrales Zarauza, 1977).....	17
Tabla 1.4 Clasificación de rocas sedimentarias no detríticas (Corrales Zarauza, 1977)...	18
Tabla 1.5 Los once tipos principales de rocas carbonatadas según Folk.....	19
Tabla 1.6 Clasificación de rocas carbonatadas (Folk, 1959)	20
Tabla 1.7 Clasificación de rocas carbonatadas (Dunham, 1962)	21
Tabla 1.8 Clasificación de rocas carbonatadas según Dunham (1962) modificada por Embry y Klován (1972)	22
Tabla 1.9 Principales diferencias entre sedimentos carbonatados y sedimentos clásticos, modificada de James y Leeder (1982)	24
Tabla 1.10 Comparación de la porosidad entre areniscas y carbonatos, (Choquette y Pray, 1970)	25
Tabla 2.1 Exponente de cementación y factor de tortuosidad para arenas y carbonatos (Hallemburg, 1998)	38

Tabla 2.2 Susceptibilidad y grado de anisotropía de minerales selectos, X, Y, Z pueden ser de menor a mayor radio iónico: K, Na, Ca, Fe+2, Mg, Zn, Mn, Cr, Al, Fe+3, Ti, entre otros	44
Tabla 2.3 Susceptibilidades características de diversos tipos de roca (en negritas los valores más comunes reportados, entre paréntesis se indican los valores extremos)	45
Tabla 3.1 Registros Geofísicos clasificados de acuerdo con su Principio de medición	53
Tabla 3.2 Valores característicos de la lentitud de ondas compresionales (Δt_c) y de corte (Δt_s).....	62
Tabla 4.1 Recursos prospectivos de las provincias petroleras en México (Libro de reserva de hidrocarburos Pemex 2010).....	73
Tabla 5.1 Características de las cinco muestras seleccionadas del experimento 1.....	94
Tabla 5.2 Profundidad, masa, volumen, densidad y porosidad de las cinco muestras del experimento 1.....	95
Tabla 5.3 Susceptibilidad magnética de las cinco muestras del experimento 1.....	97
Tabla 5.4 Lectura de la Resistividad y Cargabilidad (muestra 359-15).....	100
Tabla 5.5 Valores promedio de Resistividad para las cinco muestras bajo los tres escenarios, Experimento 1	100
Tabla 5.6 Valores relativos al relacionar la resistividad obtenida entre los escenarios mostrados, Experimento 1	102
Tabla 5.7 Valores promedio de Cargabilidad para las cinco muestras bajo los tres escenarios, Experimento 1	102
Tabla 5.8 Muestras de núcleo del Intervalo medido, Experimento 2	118
Tabla 5.9 Muestras que presentan los primeros picos de alta resistividad, Experimento 2	127
Tabla 5.10 Muestras de la caja 230 que también presentaron altas resistividades, Experimento 2	127
Tabla 5.11 Muestras con alta resistividad del dique de brecha entre los 907 y 909 [m], Experimento 2	128
Tabla 5.12 Muestras del dique de brecha suevítica y suprayacente a los 916 [m], Experimento 2	129
Tabla 5.13 Muestras de roca caliza dolomítica no alterada térmicamente o con mínima alteración que presentaron resistividad por encima de los 100 [Ω -m], Experimento 2	129
Tabla 5.14 Muestras de roca caliza dolomítica sin alteración térmica con resistividades comunes por debajo de los 100 [Ω -m], Experimento 2.....	130
Tabla 5.15 Muestras a los 901 [m], con alteración térmica, con altas reducciones en la resistividad, Experimento 2.....	131
Tabla 5.16 Muestra a los 906 [m], con altas reducciones de resistividad, Experimento 2	131

Tabla 5.17 Muestra a los 912 y 921 [m], roca no alterada térmicamente, con altas reducciones de resistividad, Experimento 2	132
Tabla 5.18 Muestras del dique de brecha entre los 907 y 909 [m], con altas reducciones de resistividad, Experimento 2	132
Tabla 5.19 Muestras del dique de brecha a los 916 [m] y suprayacente, roca superior e inferior con altas reducciones de resistividad, Experimento 2	133
Tabla 5.20 Muestras que presentaron reducciones mínimas de resistividad, Experimento 2	134
Tabla 5.21 Distribución de las reducciones en la resistividad de núcleo seco a núcleo mojado en salmuera sin tomar en cuenta las muestras que tuvieron las reducciones más elevadas, Experimento 2	134
Tabla 5.22 Distribución de la caída porcentual de la resistividad, de núcleo seco a núcleo mojado, Experimento 2	136
Gráfico 5.1 Resistividad de las cinco muestras en cada una de las mediciones realizadas, Experimento 1	101
Gráfico 5.2 Comportamientos individuales de la Cargabilidad, Experimento 1	103
Gráfico 5.3 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 098-11	105
Gráfico 5.4 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 203-3	106
Gráfico 5.5 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 230-3	107
Gráfico 5.6 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 230-6	108
Gráfico 5.7 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 359-15	109
Gráfico 5.8 Curva de decaimiento de la cargabilidad, Núcleo mojado en salmuera, todas las curvas (izquierda), sin curva de 0.5 [μA] (derecha), Muestra 203-3.....	110
Gráfico 5.9 Registros de Densidad y Porosidad en el Intervalo, Experimento 2	121
Gráfico 5.10 Registros de Resistividad en muestras secas y mojadas en salmuera del Intervalo, Experimento 2	125
Gráfico 5.11 Caída relativa de la Resistividad, de núcleo seco a núcleo mojado en salmuera, Experimento 2	135
Gráfico 5.12 Registros de Cargabilidad en muestras secas y mojadas en salmuera, medidas con Corriente (izquierda) y con Voltaje (derecha), Experimento 2	137

Gráfico 5.13 Registros de Resistividad y Cargabilidad en muestras secas (izquierda) y mojadas en salmuera (derecha), con el eje X en escala logarítmica base 10, Experimento 2	139
Gráfico 5.14 Registro de Susceptibilidad Magnética dentro del Intervalo, Experimento 2	142
Apéndice 1, Figura 1 Wackestone de foraminíferos planctónicos laminados, Cenomiano tardío zona R. cushmani (unidad B).....	151
Apéndice 1, Figura 2 Micrografías de sección delgada de Cretácico tardío y temprano: Rotalipora greenhornensis y especies pequeñas, W. archeocretacea, Hedbergella simplex, Whiteinella paradubia, R. cushmani y pequeños heterohelicidos y guembelitríds (Unidad B)	151
Apéndice 1, Figura 3 Foraminífero miliolid (Unidad C)	152
Apéndice 1, Figura 4 Grainstone bioclástica con foraminífero bentónico (Unidad G)	152
Apéndice 1, Figura 5 Brecha Polimíctica (base de la brecha de Suevítica de la unidad H)	153
Apéndice 1, Figura 6 Foraminíferos planctónicos: Globotruncana insignis, Rugoglobigerina rugosa, Rosita contusa, R. rugosa (Unidad Ia).....	153
Apéndice 1, Figura 7 Foraminíferos planctónicos: Parasubbotina pseudobulloides (Unidad Ib)	154
Apéndice 1, Figura 8 Biomicritas bioturbadas wackestone de foraminíferos planctónicos (Unidad I).....	154
Apéndice 1, Figura 9 Grainstone bioclástico con fragmento de algas rojas (10, 11) y foraminíferos bentónicos de origen de plataforma de carbonato de aguas poco profundas (11), Grainstone con bioclastos de foraminíferos planctónicos de mar abierto y origen de la plataforma d.....	155
Apéndice 1, Figura 10 Clastos de wackestone de foraminíferos planctónicos de la zona P1c flotando en wackestone de foraminíferos planctónicos de la zona media del Paleoceno de edad P3a (Unidad K).....	155
Apéndice 2, Figura1 Panel frontal del MS2	157
Apéndice 2, Figura 2 Panel posterior del MS2	158
Apéndice 2, Figura 3 Sonda magnética MS2E.....	158
Apéndice 2, Figura 4 Respuestas características de la sonda MS2.....	159
Apéndice 2, Figura 5 Calibración de la sonda MS2E	161
Apéndice 2, Figura 6 Medición de la susceptibilidad magnética.....	162
Apéndice 2, Tabla 1 Exponente del dígito menos significativo del valor arrojado en la pantalla del MS2 según el rango seleccionado	160

Apéndice 3, Figura 1 Componentes y accesorios del equipo medidor SCIP	165
Apéndice 3, Figura 2 Componentes del Medidor SCIP	166
Apéndice 3, Figura 3 Elementos del conjunto del soporte de muestras del SCIP	167
Apéndice 3, Figura 4 Fijación del soporte y receptáculo del equipo SCIP	168
Apéndice 3, Figura 5 Ilustración del remojo de las esponjas en la solución de sulfato de cobre	168
Apéndice 3, Figura 6 Ajuste de la varilla graduada con el soporte del SCIP	168
Apéndice 3, Figura 7 Contacto de las esponjas mojadas en solución de sulfato de cobre con los electrodos de cobre del soporte del SCIP	169
Apéndice 3, Figura 8 Colocación y fijación de la muestra en el soporte del SCIP	169
Apéndice 3, Figura 9 Conexión de los electrodos de transmisión y recepción a través de los bornes A y B mediante los cables banana-banana del medidor SCIP	170
Apéndice 3, Figura 10 Conexión final de la muestra con los electrodos del equipo medidor SCIP	170
Apéndice 3, Figura 11 Conmutador Cable/Wireless del medidor SCIP	171
Apéndice 3, Figura 12 Selección del programa GDD SCIP en el computador de bolsillo Archer Field PC	171
Apéndice 3, Figura 13 Selección del modo de comunicación entre el computador Archer y el medidor SCIP	171
Apéndice 3, Figura 14 Ventana de inicio del programa GDD SCIP	172
Apéndice 3, Figura 15 Ventana con el valor de la resistencia al contacto de la muestra medida	172
Apéndice 3, Figura 16 Ventana con mensaje de atención que aparece cuando la resistencia al contacto sobrepasa los 50 MOhm	172
Apéndice 3, Figura 17 Ventana de parámetros de la muestra del programa GDD SCIP	173
Apéndice 3, Figura 18 Ventana Windows del programa GDD SCIP	173
Apéndice 3, Figura 19 Ventana Tx con las opciones Voltaje y Corriente del programa GDD SCIP	174
Apéndice 3, Figura 20 Ventana con las lecturas obtenidas por el programa GDD SCIP	174
Apéndice 3, Figura 21 Mensaje que indica que la señal está saturada del programa GDD SCIP	174
Apéndice 3, Figura 22 Recuadro de confirmación para detener la lectura del programa GDD SCIP	175
Apéndice 3, Figura 23 Recuadro para confirmar el guardado de la lectura del programa GDD SCIP	175
Apéndice 3, Figura 24 Ruta indicada para la creación de un archivo con los datos guardados del programa GDD SCIP	176

Apéndice 3, Figura 25 Ventana para el nombre del archivo y el lugar donde será guardado
en la memoria del Archer PC 176

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de propiedades petrofísicas en núcleos de perforación de la secuencia carbonatada del Cretácico en la Península de Yucatán. El sur del Golfo de México se caracteriza por secuencias carbonatadas del Mesozoico y Cenozoico, depositadas en ambientes profundos a someros. La Península representa la porción emergida de la plataforma de Yucatán. En el trabajo se presentan los procedimientos usados en la determinación de propiedades petrofísicas, principalmente la resistividad eléctrica y la susceptibilidad magnética, medidas en muestras del núcleo del pozo Yaxcopoil-1. El pozo se perforó dentro del proyecto de investigaciones del Cráter Chicxulub, formado por el impacto de un asteroide hace 66 millones de años en la frontera Cretácico/Paleógeno (K/Pg). Se exponen los antecedentes y fundamentos de los registros geofísicos, con énfasis en los registros eléctricos y electromagnéticos, el contexto teórico, herramientas y la importancia e implicación en la caracterización de yacimientos petroleros.

Este trabajo se desarrolla en los siguientes capítulos: I Rocas Sedimentarias; II Propiedades Petrofísicas; III Métodos de Medición de las Propiedades Petrofísicas; IV Secuencia Carbonatada de la Península de Yucatán; V Actividades en Laboratorio, Resultados y Discusión y VI Conclusiones.

En el capítulo de **Rocas Sedimentarias**, se mencionan algunas clasificaciones y se indican las principales diferencias entre rocas areniscas y carbonatos, en **Propiedades Petrofísicas** se presenta una revisión de algunas de las propiedades petrofísicas más importantes en la evaluación de un yacimiento petrolero. En el capítulo de **Métodos de Medición de Propiedades Petrofísicas**, se explica el principio físico de medición de estas propiedades en la toma de registros geofísicos y se mencionan algunos estudios que se realizan en laboratorio a núcleos de formación, como porosidad, permeabilidad, paleontológicos, estratigráficos, etc.

Dentro de los métodos directos se menciona el análisis en laboratorio a núcleos de perforación. Dentro de los métodos indirectos se hace una breve explicación de los principios de funcionamiento de los métodos de gravimetría, magnetometría y sísmica, con énfasis en la interpretación de registros geofísicos de pozo.

En el capítulo de **Secuencia Carbonatada de la Península de Yucatán** se presenta una breve explicación de la geología y estratigrafía de la plataforma carbonatada de la Península de Yucatán, del área del Cráter y del pozo Yaxcopoil-1. En el capítulo **Actividades en Laboratorio, Resultados y Discusión**, se describen brevemente las tareas de clasificación, documentación y preservación de los núcleos. Se presentará el procedimiento seguido en dos experimentos realizados en laboratorio, en la medición de propiedades eléctricas, magnéticas, la densidad y la porosidad en función de la profundidad de muestras de núcleo del pozo Yaxcopoil-1. Los equipos utilizados fueron el medidor de resistividad SCIP (Sample Core Induction Polarization), y el medidor de susceptibilidad magnética (Magnetic Susceptibility Meter) y **Conclusiones**.

Los resultados de las mediciones incluyen la adquisición de registros de resistividad y cargabilidad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad y porosidad en función de la profundidad, (experimento 2). Esta información permite observar la relación que tienen dichas propiedades entre sí.

Al comparar los registros de densidad y porosidad se observa una relación inversa entre estas dos propiedades, cuyos gráficos son prácticamente opuestos entre sí. Conforme la roca es más densa tiende a ser menos porosa.

La mayoría de las muestras de roca del intervalo del experimento 2, constituido mayoritariamente por caliza dolomítica homogénea, presenta resistividades entre los 30 y 100 [Ω -m], con un promedio de 47 [Ω -m]. Las muestras pertenecientes o cercanas a brechas y/o que muestran grados variables de alteración térmica reportan resistividades muy elevadas. El promedio de resistividad de las rocas del dique de brecha a los 907 [m] es de 272.6 [Ω -m]. A su vez estas rocas son comparativamente más densas.

La densidad, porosidad y resistividad de estas rocas fueron modificadas como consecuencia del impacto, formando rocas más duras y compactas.

En la medición de la susceptibilidad magnética, la mayoría de la roca medida (más del 70%) presentó valores negativos de -2.8 a -0.1×10^{-5} SI y menos del 30% valores positivos, con valores entre 0.1 y 11.1×10^{-5} SI, la mayoría concentrándose por debajo de 3×10^{-5} SI, indicando comportamientos diamagnéticos y paramagnéticos. La muestra de núcleo ubicada en la brecha de impacto (experimento 1), reportó valores altos y positivos de susceptibilidad magnética con un promedio de 417.2×10^{-5} SI, indicando un comportamiento ferromagnético. En esta muestra en particular, la roca sufrió alteración durante el impacto y efectos del sistema hidrotermal, el material de que se compone tiene alto contenido de minerales ferromagnéticos.

Introducción

El estudio y caracterización de formaciones geológicas nos da una información acerca de los aspectos geológicos y geofísicos de las rocas en el subsuelo, ya sea con fines de estudios científicos o en la búsqueda de materias primas, como hidrocarburos, agua, minerales metálicos, etcétera.

La búsqueda y caracterización de formaciones geológicas con contenido de hidrocarburos se lleva a cabo mediante diversos estudios, que incluyen métodos de adquisición, análisis e interpretación de datos provenientes de estudios geológicos; estudios geofísicos: incluyendo registros geofísicos de pozo y análisis de muestras de núcleos y recortes.

La interpretación conjunta de estos datos describe un contexto geológico y permite determinar cualitativa y cuantitativamente propiedades físicas, y definir su distribución dentro de los sistemas roca y roca-fluidos de un yacimiento o campo. A partir de esto se crean modelos geológicos-petrofísicos del yacimiento, un estudio que sirve en base de la modelación dinámica con la implementación de datos de producción y de presión de pozos.

Este modelo incluye el aspecto geológico estructural y dimensional del yacimiento, la litología, clasificación y distribución de facies, distribución de arcillas, textura de las rocas, sistema de porosidad y permeabilidad, curvas de saturación de fluidos, localización y espesor de los horizontes productores, contactos de fluidos, y con esto cuantificar de primera instancia el volumen inicial de petróleo o gas.

La medición de propiedades, como la porosidad y saturación de fluidos mediante la toma de registros geofísicos, se considera indirecta porque depende de la medición de otras propiedades de la misma formación, como la densidad neutrónica, velocidad de tránsito de una onda sonora, la resistencia eléctrica, la radiación natural, etcétera.

Históricamente, los registros eléctricos han representado una herramienta de suma importancia en la detección y cuantificación de hidrocarburos, dado que un medio geológico cuyos poros están saturados de agua de formación presentará una resistividad baja si se compara con un medio saturado de aceite, el cual opondrá mayor resistencia al paso de una corriente eléctrica proporcionada por la herramienta, haciendo posible la diferenciación de zonas con contenido de petróleo.

El conocimiento de estas variables nos permite estimar el potencial productivo de un área y la conveniencia de poner en marcha un proyecto de desarrollo cuyas dimensiones y costos de inversión estarán en función de las capacidades productivas del yacimiento, o campo descubierto en actividades de exploración.

Bajo este contexto y sabiendo la importancia que juega la correcta determinación de cada variable, las investigaciones continúan tratando de entender cada vez mejor la complejidad que presenta cada formación.

1 Rocas Sedimentarias

Existen tres principales tipos de roca en la corteza terrestre: ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Las rocas ígneas son el resultado del enfriamiento del material magmático proveniente del núcleo de la tierra. El enfriamiento puede ser acelerado en la superficie a través de la expulsión de la roca fundida o enfriamiento lento en alguna parte de la corteza terrestre

La roca metamórfica es roca ígnea o sedimentaria que pasa por un proceso de metamorfismo producto del aumento de la temperatura y la presión en la corteza.

Las rocas sedimentarias son originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias), de restos de plantas y animales y/o de precipitados químicos hasta antes del metamorfismo.

Se clasifican en rocas sedimentarias detríticas y rocas sedimentarias químicas y orgánicas.

Las rocas sedimentarias detríticas son las formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte. La clasificación de estas rocas se basa en los tamaños de los trozos que las componen (Tabla 1.1). Las constituidas por trozos de tamaño grande son los conglomerados, las areniscas poseen granos de tamaño intermedio y los limos y arcillas poseen granos muy pequeños. A continuación, se muestra una tabla de la clasificación de la roca en base a la clasificación del tamaño de su grano por límites de clase, en [mm].

Límites de Clases [mm]	Clases de tamaño		Término para roca	
256	Gravas	Peñascos	Conglomerado Brecha Rudita Rocas rudáceas	
16		Matatenas		
4		Guijarros		
2		Gránulos		
1	Arenas	Arenas muy gruesas	Arenisca Arenita Rocas arenáceas	
1/2		Arenas gruesas		
1/4		Arenas medias		
1/8		Arenas finas		
1/16		Arenas muy finas		
1/32	Limos	Limo grueso	Limolita	Argilita
1/64		Limo medio		Rocas argiláceas
1/128		Limo fino		Lodolita
1/256		Limo muy fino		Rocas lodosas
	Arcilla		Lutita	

Tabla 1.1 Clasificación del tamaño de las partículas sedimentarias según la escala de Wentworth

Las rocas sedimentarias químicas y orgánicas son las formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas o bien por acumulación de sustancias de origen orgánico, respectivamente. Un tipo muy común es la roca caliza, formada en su mayor parte por restos de organismos como corales, algas, etc. aunque también puede originarse por precipitación de cementos calcáreos. El tipo de sedimento y la forma en que se deposita depende de diferentes ambientes sedimentarios, estos se clasifican por ser de origen continental, marino o mixto. De interés en la industria petrolera son principalmente los que se originan en regiones acuosas en donde se dan las condiciones para la formación de yacimientos de petróleo con características propias.

La roca carbonatada pasa por un proceso de formación más complicado, ya que durante su formación sufren una **compleja** variedad de cambios producto de la inestabilidad química del material componente ante condiciones variantes del ambiente, como la presión y temperatura, y cambios en el equilibrio del PH del agua de formación. Durante el enterramiento y compactación de los sedimentos y con el aumento de la presión y temperatura, se desenlaza una serie de procesos diagenéticos debido a la interacción constante de sus elementos químicos, dando lugar a procesos como dolomitización, disolución, precipitación química y recristalización.

A continuación, se presentan algunas clasificaciones de rocas sedimentarias, señalando las bases utilizadas.

1.1 Clasificación de rocas sedimentarias

Clasificación de Grabau

La base de esta clasificación es la genética de las rocas a las cuales se les divide en dos grandes grupos (Tabla 1.2).

- Exógenas. Formadas por fuerzas externas como la erosión y transporte de los sedimentos.
- Endógenas. Formadas por fenómenos químicos y crecimientos orgánicos.

Grupo	Clase	Origen
Exógenas	Piroclastos	Acumulación de partículas sólidas expulsadas por volcanes
	Autoclastos	Material triturado por fallas
	Atmoclastos	Material residual del intemperismo
	Anemoclastos	Acumulación de material acarreado por el viento
	Hidroclastos	Acumulación de material acarreado por el agua
	Bioclastos	Acumulación de restos orgánicos
Endógenas	Hidrolitos	Precipitación química
	Biolitos	Acción de organismos o procesos bioquímicos

Tabla 1.2 Clasificación de rocas sedimentarias (Grabau, 1904)

Clasificación de Pirsson

Esta clasificación se basa en dos elementos principales: modo de formación y las características físicas su composición.

- A. Sedimentos de origen mecánico
 - 1. Depósito de origen acuoso
 - Conglomerados y brechas
 - Areniscas y arenas
 - Lutitas y arcillas
 - 2. Depósito de origen terrestre
 - Loess
 - Dunas de arenas
- B. Sedimentos de origen químico formado a partir de soluciones
 - 1. Concentración
 - Sulfatos: yeso y anhidrita
 - Cloruros: halita
 - Sílice: calcedonia
 - Carbonatos: calizas, travertino
 - Rocas ferruginosas: minerales de hierro

2. Orgánicas formadas a través de la acción de plantas y animales
- Carbonatos: calizas de varios tipos
 - Sílice: calcedonia, diatomita y tierras de radiolarios
 - Fosfatos: rocas fosfáticas
 - Carbón: rocas de la serie carbonífera
 - Sedimentos de contenido hidrocarburo

Clasificación de Corrales Zarauza

Esta clasificación divide a las rocas en dos grandes grupos: rocas detríticas y rocas no detríticas, el detrito es la partícula que proviene de la descomposición de una masa sólida. Dentro de las rocas detríticas establece tres subgrupos de acuerdo con el tamaño de las partículas: rudita, arenisca y lutita (Tabla 1.3).

Grupo	Ø mm	Clase	Sedimento y Tamaño textural		Compactada	Criterios de Subdivisión
Rocas Detríticas	256	Ruditas	Bloques	Grava	Según forma: Conglomerado (redondeado)	1. Génesis 2. Composición de cantos
	2		Cantos			
	1	*Areniscas	Arena muy gruesa		Arenisca	1. Composición %de cuarzo %de feldspatos %de fragmentos de roca %de matriz detrítica 2. Génesis
	1/2		Arena gruesa			
	1/4		Arena media			
	1/8		Arena fina			
	1/16		Arena muy fina			
	1/256	*Lutitas	Limo		Limolita	1. Color 2. Composición 3. Textura

Tabla 1.3 Clasificación de rocas sedimentarias detríticas (Corrales Zarauza, 1977)

Dentro de las rocas no detríticas se establecen seis divisiones en relación con su composición química (Tabla 1.4).

Grupo	Clases	Criterios de subdivisión
Rocas no detríticas	*Rocas Carbonatadas	1.Composición 2.Textura
	Evaporitas	1.Composición
	Rocas Silíceas de origen orgánico y químico	1. Génesis 2.Composición
	Rocas Aluminio-Ferruginosas de origen químico	1.Composición 2.Génesis
	Rocas Organogéneas	1.Composición 2.Textura y Estado físico
	Rocas Fosfatadas	1.Textura y Estructura 2.Génesis

Tabla 1.4 Clasificación de rocas sedimentarias no detríticas (Corrales Zarauza, 1977)
(*Las clases marcadas con asterisco forman en total más del 99% de las rocas sedimentarias)

1.2 Clasificación de rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas son aquellas cuya composición está formada por más del 50 % de minerales carbonatados, como el aragonito, calcita alta o baja en Magnesio, dolomita, entre otros.

Clasificación de Folk

Esta clasificación diferencia las rocas calcáreas ricas en componentes, en aloquímicas, de los carbonatos pobres en componentes, en ortoquímicas, y hace una división en tres familias principales de calizas que se determinan con base en el contenido de sus miembros externos (Tabla 1.5) Asimismo, los carbonatos se clasifican de acuerdo a la textura deposicional y a la presencia o ausencia de lodo calcáreo y el tipo y abundancia de los granos (Tabla 1.6).

1. Aloquímicos (Espáticas y microcristalinas). Son partículas carbonatadas provenientes de la misma cuenca entre las que se distinguen:
 - Intraclastos: Fragmentos de sedimento carbonatado parcialmente compactado de tamaño de arena o rudita y forma variada.
 - Oolitos: Partículas esferoidales y ovoides de estructura radial y/o concéntrica.
 - Fósiles: Caparazones o restos de organismos sin romper. Se consideran interclastos.
 - Pelets: Partículas de forma esferoidal del tamaño de limos o arcillas, sin estructura interna.
2. Ortoquímicos.
 - Micrita: Lodo de calcita microcristalina. Cristales de 1 a 4 micras. Producto de la composición química o bioquímica que puede construir sedimentos o rocas o matriz de rocas carbonatadas con abundancia de aloquímicos.
 - Esparita: Es el cemento de calcita con cristales superiores a 10 micras.

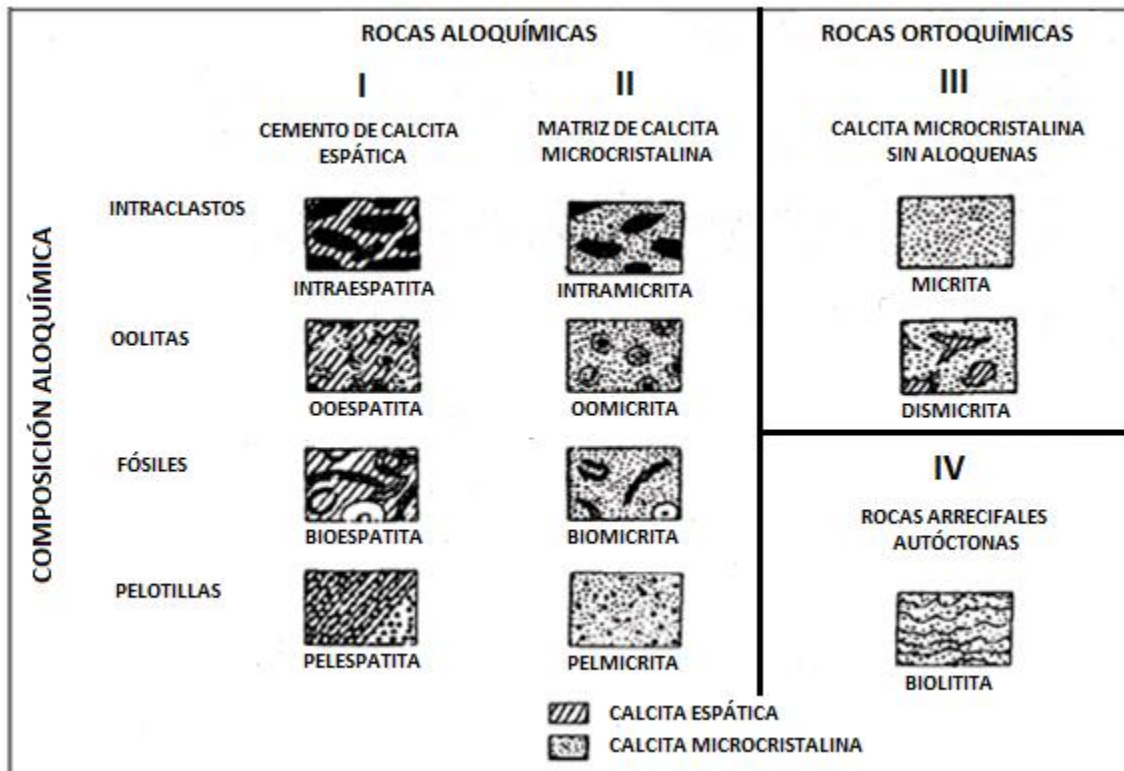


Tabla 1.5 Los once tipos principales de rocas carbonatadas según Folk

Composición volumétrica de Aloquímicos		> 10% de Aloquímicos		< 0% de Aloquímicos			
		Calcita espática > Matriz micrítica	Matriz micrítica > Calcita espática	1-10% Aloquímicos	< 1% Aloquímicos		
> 25% de Intraclastos		Intraesparita	Intramicrocrita	Abundantes Aloquímicos	Intraclastos: Microcrita con Intraclastos	Rocas arrecifales y biohermales sin modificar	
> 25% Ooides		Ooesparita	Oomicrita		Ooides: Microcrita con Oolitas		
< 25% Intraclastos	< 25% Ooides (bioclastos/peloides)	>3/1	Bioesparita		Biomicrita		Microcrita o Dismicrocrita si tiene parches de esparita
		3/1 a 1/3	Biopesparita		Biopelmicrocrita		
		<1/3	Pelesparita		Pelmicrocrita		
				Peloides: Microcrita peletífera	Biolitita		

Tabla 1.6 Clasificación de rocas carbonatadas (Folk, 1959)

Clasificación de Dunham

Esta clasificación divide a las rocas carbonatadas de acuerdo con la relación que existe entre los granos y lodo carbonatado que las componen de acuerdo con los siguientes criterios (Tabla 1.7).

Mudstone: Rocas que en su mayoría están compuestas por una matriz de masa básica micrita y están soportados por esta, donde los granos son menos del 10 % de los granos.

Wackestone: La matriz de micrita aún soporta el cuerpo de la roca y los granos representan un porcentaje mayor al 10 %.

Packstone: Tiene gran porcentaje de granos, los cuales soportan el cuerpo de la roca con matriz micrítica.

Grainstone: La cantidad de granos es mayor que la de una packstone y entre ellos la matriz es la esparita y con muy poco o casi nada de masa micrítica entre sus granos.

Floodstone: 10 % o más de los granos son mayores a 2 mm de diámetro y la matriz es de micrita.

Rudstone: 10m % o más de los granos son mayores a 2 mm de diámetro y la matriz es de esparita.

Boundstone: Los componentes orgánicos se consolidan en la roca desde su depositación, como corales y estromatolitos.

Dunham diferencia dos grupos de calizas: calizas alóctonas y calizas autóctonas.

Las calizas alóctonas son aquellas cuyos componentes primarios son depositados durante la sedimentación y no están asociados a un origen orgánico. Estas agrupan a las primeras seis denominaciones mencionadas anteriormente (Mudstone, Wackestone, Packstone, Grainstone, Floadstone y Rudstone).

Las calizas autóctonas son aquellas cuyos componentes primarios se formaron durante la sedimentación con origen organogénico "in situ". Las calizas autóctonas se dividen en tres grupos: Blaffestone, Bindstone y Framestone, sin embargo, se utiliza el término Boundstone para estas y se refiere a las calizas de origen orgánico.

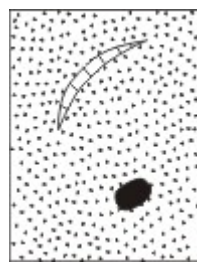
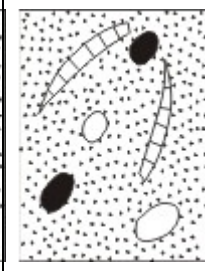
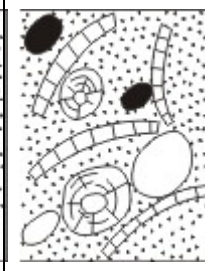
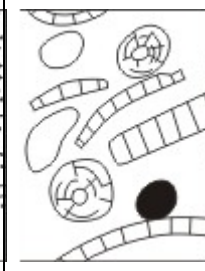
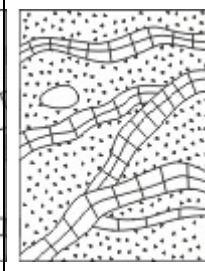
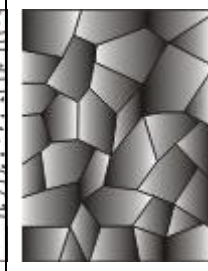
La textura original del depósito es reconocible					La textura no se reconoce
Los componentes originales no están soldados				Component es soldados	Carbonatos cristalinos
Contiene lodo		Sin lodo		Boundstone	
Sostenida por lodo		Sostenida por granos			
% Granos Vs Matriz		Packstone	Grainstone		
<10% Granos	>10% Granos				
Mudstone	Wackestone				
					

Tabla 1.7 Clasificación de rocas carbonatadas (Dunham, 1962)

Calizas alóctonas: Componentes primarios sin relación organogénica durante la sedimentación				Calizas autóctonas: Componentes primarios con relación organogénica durante la sedimentación				
< del 10% de componentes > a 2 mm			> del 10% de componentes > a 2 mm		Relacionados con organismos			
Con micrita < a 0.03 mm		Sin micrita		Mud-supported	Grain supported	Acumular de sedimentos	Aglutinado de sedimentos	Formador de construcci
Mud-supported		Grain-supported						
< del 10% de component	> Del 10% de component							
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floodstone	Rudstone	Blaffestone	Bindstone	Framestone

Tabla 1.8 Clasificación de rocas carbonatadas según Dunham (1962) modificada por Embry y Klovan (1972)

1.3 Diferencias entre rocas areniscas y carbonatos

Lo que diferencia a estos dos tipos de roca es esencialmente su ambiente de deposición, que determinan los elementos minerales, químicos y biológicos y los procesos seguidos que intervienen en su formación.

Areniscas

Las rocas areniscas están constituidas por partículas o granos detríticos de naturaleza siliciclástica que tienden a adoptar formas esféricas o redondeadas, y de predominancia de minerales estables por el efecto del transporte prolongado, como resultado de los procesos sedimentarios que intervienen en su formación, esto las hace menos susceptibles a las alteraciones diagenéticas reductoras de la porosidad y permeabilidad, por lo que estas rocas son consistentes en dichas propiedades, generando estratos por lo general bien definidos.

El transporte prolongado también se traduce en otras características, tales como predominancia de minerales estables y graduación en la granulometría del sedimento que refleja la energía hidráulica del medio.

Las areniscas de tipo almacenador tienden a formar cuerpos en forma lenticular, más que en forma de capas muy extensas (excepto las depositadas en condiciones marinas transgresivas), y a acumularse en ambientes de alta energía.

Carbonatos

La naturaleza mineralógica de estas rocas (minerales inestables) las hace muy susceptibles a cambios diagenéticos, que reducen notablemente su porosidad y permeabilidad primarias. Asimismo, estas propiedades no son consistentes en toda la extensión de un mismo cuerpo, por lo que resultan ser muy heterogéneas desde el punto de vista de estudio de la explotación de los hidrocarburos que almacenan.

A diferencia de las areniscas, las partículas que constituyen las rocas carbonatadas almacenadoras sufrieron un transporte muy reducido o nulo (excepto las que constituyen las turbiditas calcáreas), es decir, se formaron in-situ en la cuenca de depósito.

El depósito de carbonatos químicos o bioquímicas requiere de condiciones ambientales y de energía del medio acuoso muy especiales, si dichas condiciones se mantienen estables esto se refleja en cuerpos de extensas áreas y con gran potencia (espesor), frecuentemente masivos. En cambio, si las condiciones varían frecuentemente, se refleja en cuerpos extensos arealmente pero de escaso espesor generalmente de estratos delgados. La energía del medio acuoso debe ser esencialmente moderada a baja, para repartir el depósito de las partículas que conforman estas rocas.

A continuación, se presentan dos tablas que diferencian formaciones carbonatadas o siliciclásticas. La primera con base a las principales diferencias de sus sedimentos por James y Leeder 1982 (Tabla 1.9). Y la segunda con base a las principales diferencias en su porosidad por Choquette y Pray 1970 (Tabla 1.10).

Sedimentos carbonatados	Sedimentos clásticos
<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría se da en medios tropicales someros • La mayoría son marinos • El tamaño de grano generalmente refleja el tamaño original de las partículas duras calcificadas de los organismos • A menudo la presencia de lodo calcáreo indica crecimiento prolífico de organismos cuyas partes calcificadas están constituidas por agregados de cristales de tamaño del lodo • El tipo de sedimento ha cambiado a través del tiempo, respondiendo a la evolución de la vida 	<ul style="list-style-type: none"> • No importa el clima, se da en todas partes y profundidades • Continentales y marinos • El tamaño de grano refleja la energía hidráulica del medio • La presencia de lodo indica decantación a partir de suspensión • La naturaleza de los granos sedimentarios no ha cambiado en el transcurso de los tiempos geológicos

<ul style="list-style-type: none"> • Los cuerpos arenosos carbonatados de aguas someras se forman primariamente como resultado de la fijación localizada de carbonato, tanto de origen biológico como fisicoquímico 	<ul style="list-style-type: none"> • Los cuerpos arenosos clásticos de aguas someras siempre se forman directamente a partir de la interacción de las corrientes y el oleaje
<ul style="list-style-type: none"> • Las construcciones localizadas de sedimentos modifican el carácter de los ambientes sedimentarios de alrededor, aún sin ser acompañados en origen de alteraciones en el régimen hidráulico 	<ul style="list-style-type: none"> • Los cambios en los ambientes sedimentarios, son generalmente el resultado de cambios generalizados en el régimen hidráulico
<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente en el fondo marino los sedimentos están cementados 	<ul style="list-style-type: none"> • Los sedimentos permanecen sin consolidarse en el medio de depositación
<ul style="list-style-type: none"> • La exposición periódica de los sedimentos durante la depositación, da lugar a una intensa diagénesis (cementación y recristalización esencialmente) 	<ul style="list-style-type: none"> • La exposición periódica de los sedimentos durante la depositación, deja a estos relativamente sin afectar (exceptuando costras duras y paleosuelos)
<ul style="list-style-type: none"> • Las señales de diferentes facies sedimentarias se borran con un metamorfismo de bajo grado 	<ul style="list-style-type: none"> • Las señales de facies sedimentarias sobreviven al metamorfismo de bajo grado

Tabla 1.9 Principales diferencias entre sedimentos carbonatados y sedimentos clásticos, modificada de James y Leeder (1982)

Aspectos de la porosidad a comparar	Areniscas	Carbonatos
Porcentaje de porosidad en los sedimentos	Comúnmente 25 – 40%	Comúnmente 40 – 70%
Porcentaje de porosidad en las rocas	Comúnmente la mitad o más de la mitad de la porosidad inicial 15 – 30%	Normalmente nula o una pequeña fracción de la porosidad inicial, 5 – 15% es común en la facies almacenadoras Predomina generalmente la interpartícula pero también la del tipo intraparticular
Tipos de porosidad primaria	Casi exclusivamente particular	Muy variada debido a las modificaciones post-depositacionales
Tipos de porosidad final	Casi exclusivamente interparticular	
Tamaño de los poros	El tamaño de los poros y de los canales de interconexión está muy ligado al tamaño y clasificación de las partículas sedimentarias	El tamaño de los poros y de los canales de interconexión muestra muy poca relación al tamaño o clasificación de las partículas
Forma de los poros	En general muestra una fuerte dependencia de la forma de las partículas	Muy variada, de fuertemente dependiente a independiente de la forma de las partículas o de los componentes diagenéticos

Uniformidad de la forma, tamaño y distribución	Comúnmente muy uniforme dentro de un cuerpo homogéneo	Variable, desde uniforme hasta extremadamente heterogéneo aún dentro de un mismo cuerpo
Influencia de la diagénesis	Mínima, normalmente reducciones mínimas de la porosidad primaria por compactación y cementación	Grande, puede crear, destruir o modificar en gran medida la porosidad inicial. La cementación y la disolución son muy importantes
Influencia del fracturamiento	Generalmente no es de gran importancia en las propiedades almacenadoras	De gran importancia en las propiedades almacenadoras
Evaluación visual de la porosidad y permeabilidad	Pueden realizarse de manera relativamente fácil estimaciones visuales semicuantitativas	Variables, las estimaciones visuales semicuantitativas varían de fáciles a virtualmente imposibles, comúnmente son necesarias mediciones con instrumentos
Utilidad de los análisis de núcleos para la evaluación del yacimiento	Los tapones de 2.5 [cm] de diámetro normalmente son adecuados para medir la porosidad	Los tapones normalmente son inadecuados, aún los núcleos completos (aprox. 7. [cm] de diámetro) pueden ser inadecuados en caso de poros grandes
Interrelaciones porosidad – permeabilidad	Relativamente consistentes, comúnmente son dependientes del tamaño y clasificación de las partículas	Muy variada, comúnmente son independientes del tamaño y clasificación de las partículas

Tabla 1.10 Comparación de la porosidad entre areniscas y carbonatos, (Choquette y Pray, 1970)

2 Propiedades Petrofísicas

Los parámetros físicos principales que se necesitan para evaluar un yacimiento son: tipo de roca, porosidad, saturación de agua, permeabilidad, espesor de capa permeable y fracturamiento.

El método de estudio de estos parámetros varía de acuerdo con el tipo de roca yacimiento que se está considerando.

2.1 Porosidad

La porosidad es la cantidad de espacio intersticial de la roca que está ocupado por algún fluido, es decir, se trata de un componente más de la roca. Resulta conveniente describir esta propiedad como un sistema de porosidad que hace referencia a su descripción, como su distribución en un espacio tridimensional, relación entre el tamaño de los poros y de las

gargantas de poro, forma de los poros, conectividad de los espacios porosos, fracturamiento, atendiendo a elementos como homogeneidad e isotropía y tipo de fábrica de los elementos sólidos (Figura 2.1).

Se pueden diferenciar la porosidad total, la porosidad comunicada, la porosidad cerrada y la porosidad efectiva (Figura 2.2).

La porosidad total es el volumen total de espacio “vacío”, como fracción del volumen total de roca tomando en cuenta poros, gargantas de poros, cavernas, vùgulos y fracturas.

$$\phi_t = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_p}{(V_p + V_s)} \quad (1)$$

Donde:

ϕ_t = porosidad total

V_p =volumen de poros

V_t =volumen total

V_s = volumen de sólidos

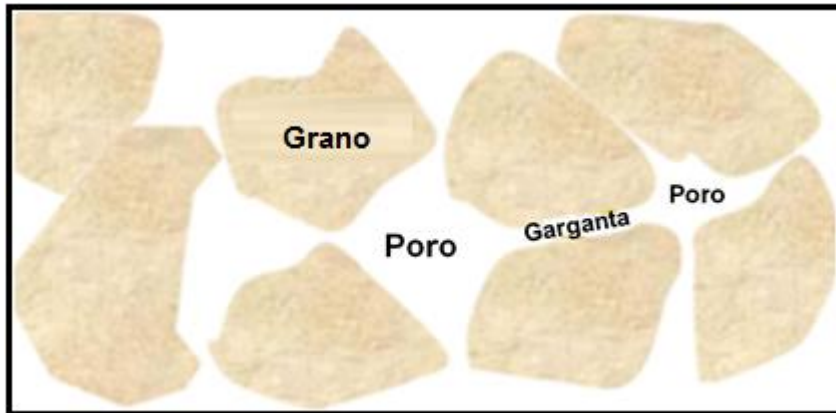


Figura 2.1 Esquema del Sistema Poral

La porosidad comunicada es la cantidad dentro de la porosidad total en que esos espacios se encuentran comunicados. Mientras que la porosidad cerrada es la porosidad que no está comunicada.

$$\phi_t = \phi_c + \phi_{nc} \quad (2)$$

Donde:

ϕ_c = porosidad comunicada

ϕ_{nc} = porosidad no comunicada

La porosidad efectiva es la porosidad accesible a los fluidos libres excluyendo a la porosidad no comunicada y la porosidad atrapada, correspondiente al volumen ocupado por los fluidos adheridos a las superficies de los sólidos por fuerzas capilares.

$$\phi_e = \phi_c - \phi_a \quad (3)$$

Donde:

ϕ_e = porosidad efectiva

ϕ_a = porosidad atrapada

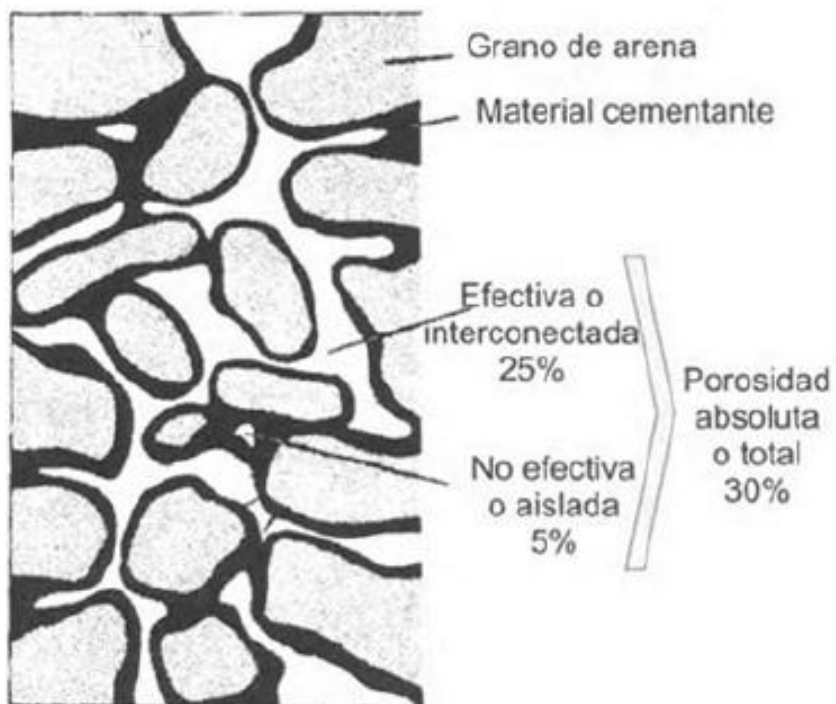


Figura 2.2 Ilustración de la porosidad efectiva, no efectiva y porosidad total

Por otro lado, la porosidad se clasifica en porosidad primaria y porosidad secundaria.

La porosidad primaria es la porosidad que se formó por procesos de deposición y compactación de los sedimentos, y depende de la forma, tamaño y acomodamiento de los sólidos. Los tipos más conocidos de porosidad primaria son: Intergranular (entre granos),

interfosilar (entre fósiles), fenestral (ojo de pájaro), en barrenos (biógena), geopetal, cobijada e intraarmazón (por crecimiento de trama, arrecifal).

La porosidad secundaria es la porosidad que se formó después de la depositación y compactación en procesos posteriores, tanto de naturaleza física como química, como el fracturamiento, la disolución, la cristalización y la dolomitización, dando lugar a fracturas, cavernas y provocando la alteración de la porosidad primaria.

Los tipos de porosidad secundaria más conocidos son: Intercristalina (debida al proceso de dolomitización), intragranular, móldica, intrafosilar, fracturas (originada por eventos geológicos), cavernas y microcavernas (cavidades de disolución y cavidades debido a procesos físico-químicos)

La porosidad en las rocas calcáreas es inferior que, en las areniscas, mientras que la dolomita normalmente presenta porosidad elevada debido a la disminución en el volumen de roca por la transformación de calcita en dolomita. Las calizas y dolomías presentan un sistema poroso muy complejo, producto de las distintas etapas durante su evolución diagenética en las que se pueden desarrollar los poros debido a la constante movilidad química de los minerales.

Las rocas biocontruidas presentan porosidad característica de los organismos que la constituyen, las rocas de texturas granuladas presentarán porosidad intergranular dependiendo de la forma y del tamaño de los granos, las areniscas y los lodos carbonatados son los que presentan mayor porosidad, siendo ésta alrededor del 70% al momento del depósito.

Clasificaciones descriptivas de la porosidad

Las clasificaciones descriptivas se establecen en relación con los elementos descriptivos del sistema poroso como: tamaño, forma, etcétera. Y pueden definir la porosidad numéricamente.

Se atienden a elementos como la porosidad total, tamaño de los espacios vacíos, forma y distribución de los poros, y su localización dentro del seno de la roca.

La porosidad total de acuerdo con sus valores, se puede considerar las siguientes clases (Archie 1952, Sanders1967).

- Porosidad muy baja: menor de 4%
- Porosidad baja: de 4 a 8%
- Porosidad media: de 8 a 16%
- Porosidad alta: de 16 a 32%
- Porosidad muy alta: mayor de 32%

Tamaño de los espacios porosos: Se puede considerar el segundo elemento del sistema poroso por su importancia. Es difícil de tratar dado el amplio rango de tamaño de poros abarcados. Se debe distinguir entre el tamaño de los poros y de las gargantas de poro.

El tamaño de los poros según se establece en la siguiente escala (Choquette y Pray 1970):

- Megaporos: mayores de 2 [mm]
- Mesoporos: poros de 2 [mm] a 60 [μ m]
- Microporos: menores de 60 [μ m]

Tamaño de las gargantas o accesos de poro:

- Macroacceso: accesos mayores a 7.5 [μ m]
- Microaccesos: accesos menores a 7.5 [μ m]

Forma de los poros: La forma de los poros es irregular y muy variable, sin embargo, se aproximan si es posible a formas regulares ideales. De acuerdo con la relación que existe en dichas formas regulares se consideran tres dimensiones. A, B y C y se establecen las siguientes categorías:

- Equidimensionales: cuando $A = B = C$
- Cilíndricos: Cuando $A > B = C$
- Planares: cuando $A = B > C$

El límite “mayor que” se establece en el orden de diez veces

Localización de los poros: Se trata de una característica que requiere un buen conocimiento de la textura, según lo cual se pueden distinguir distintos tipos de poros (Scoffin 1987):

- En relación con los cristales: intercristalinos, intracristalinos, móldicos, etc.
- En relación con los granos: intergranulares, intragranulares, móldicos, etc.
- En estratos masivos: fisuras, burrows, vacuolares, fenestrales, etc.
- En conjunto de estratos: grietas, brechas, etc.

La porosidad se mide en núcleos de perforación en laboratorio:

- Con porosímetros de gas aplicando la ley de Boyle
- Comparación de pesos cuando la muestra es sumergida en un líquido de densidad conocida.
- Moliendo la muestra, donde primero se obtiene el volumen de la muestra y después se muele para obtener el volumen de los granos
- A través de registros geofísico (densidad, sónico)

2.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene la formación de permitir el paso de los fluidos a través de ella, el trayecto de los fluidos es a través de poros intercomunicados o a través de fracturas. La permeabilidad se mide en Darcy y depende en gran medida de las características del sistema poroso.

La Ley de Darcy establece que el caudal de un líquido, de viscosidad definida, que atraviesa un medio poroso es proporcional al área de la sección transversal de la dirección de flujo y el gradiente de presión hidráulico (Figura 2.3). La constante de proporcionalidad es lineal y depende de las características del sistema poroso.

$$Q = k \frac{\Delta P * A}{\mu * L} \quad (4)$$

Donde:

Q= caudal [cm³/s]

ΔP = diferencia de presión [atm/cm]

A= área (cm²)

μ = viscosidad (centipoise) [g/(cm-s)]

L= longitud [cm]

k= constante de proporcionalidad= permeabilidad [D]

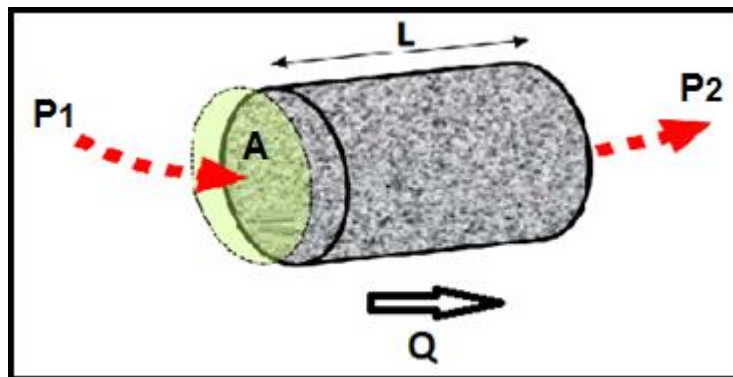


Figura 2.3 Ilustración del flujo de un fluido a través de un cuerpo y los factores que intervienen en el cálculo de la permeabilidad

La permeabilidad se puede clasificar en permeabilidad absoluta, efectiva y relativa. La permeabilidad absoluta (k_a), es la permeabilidad cuando un fluido satura al cien por ciento el medio poroso. La permeabilidad efectiva (k_{ef}), es la permeabilidad del medio poroso al paso de un fluido en particular cuando éste está en presencia de otro fluido inmisible.

La relación entre la permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta se denomina permeabilidad relativa del fluido (k_{rf}):

$$K_{rf} = \frac{K_{ef}}{K_a} \quad (5)$$

En una formación rocosa se puede diferenciar entre permeabilidad horizontal y permeabilidad vertical, siendo la permeabilidad horizontal de mayor magnitud.

La permeabilidad es función directa del radio de la garganta de poro que caracterice la roca. La permeabilidad es mayor en formaciones con tamaño de poro y garganta de poro grande que en formaciones de tamaño de poro y garganta de poro pequeños, sin importar el valor total de la porosidad como porcentaje de la roca.

Por otra parte, el flujo de los fluidos no se da de manera exclusiva a través de los poros y garganta de poro en la matriz de la roca, sino que se realiza también a través de las fracturas de la roca, esto es muy común en carbonatos, en donde el tamaño de poro de la matriz es muy pequeño si lo comparamos con una arenisca, sin embargo, si el carbonato está altamente fracturado habrá buena permeabilidad, ya que el flujo se dará principalmente en las fracturas.

La permeabilidad se puede determinar de tres maneras:

1. Mediante pruebas de variación de presión a pozos
2. Mediante pruebas directas en laboratorio a núcleos
3. Mediante registros geofísicos de pozo (cualitativamente)

2.3 Saturación

La saturación de fluidos se refiere a la fracción de volumen poroso o espacio vacío de la roca ocupado por uno o más fluidos.

$$S_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (6)$$

Donde:

S_f = saturación del fluido

V_f = volumen del fluido dentro de la porosidad

V_p = volumen poroso

Si el fluido que ocupa el espacio hueco es sólo uno, entonces ese fluido está saturando al 100% los poros de la roca y su valor será igual a 1.

En el caso de que el espacio poroso lo ocupen dos o más fluidos a cada uno le corresponderá el porcentaje de saturación correspondiente. La suma de las saturaciones individuales de los fluidos en el espacio poroso debe ser igual a 1.

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (7)$$

Donde:

S_o = saturación de aceite

S_w = saturación de agua

S_g = saturación de gas

En los poros de la roca de la formación se encuentran ocupando el espacio fluidos de formación como el agua, hidrocarburos (gas o petróleo), además de gases como el dióxido de carbono.

El agua queda atrapada en los poros de los fragmentos durante el enterramiento en el momento de la desecación y cementación, donde una parte del agua es expulsada pero otra parte queda atrapada en los poros.

Por otro lado, la materia orgánica depositada sufre a su vez a un proceso de diagénesis paralelo al del sedimento mineral y se transforma en CO_2 y sulfuros como consecuencia de las reacciones químicas presentes.

En la llegada de un fluido de hidrocarburos que se desplaza a través de los estratos de formaciones, desde rocas madre hasta rocas almacenadoras con estructura de trampa geológica, hay un desplazamiento y ordenamiento gravitacional dada las diferencias de densidad de los fluidos involucrados, el gas se coloca en la parte superior del yacimiento, el aceite en la parte media y agua de formación que ocupaba el lugar originalmente al fondo. En estas circunstancias el gas y el aceite desplazan al agua hacia la zona más profunda de la trampa.

Durante el desplazamiento del agua por hidrocarburos no toda el agua es barrida dado que reside en las concavidades entre granos y la fuerza gravitacional no es capaz de moverla debido a la acción de fuerzas de adhesión o fuerzas capilares. Esta agua se denomina agua connata de formación y se encuentra tanto en la zona de gas como en la de aceite.

2.4 Mojabilidad

La mojabilidad es la preferencia de un sólido de estar en contacto con un fluido en lugar de otro, en donde se da un equilibrio entre fuerzas superficiales (fluido-sólido) y fuerzas interfaciales (fluido-fluido).

En un medio poroso el término fuertemente mojable por agua, describe una roca que prefiere estar en contacto con el agua, en caso contrario una roca fuertemente mojable por petróleo exhibirá una preferencia por estar en contacto con el petróleo. En el caso de que el

medio poroso no posea una preferencia marcada hacia algún fluido, esa condición se denomina mojabilidad intermedia.

Por lo general los componentes de una formación (cuarzo, carbonato, dolomía) son mojables por agua hasta antes de la llegada del petróleo. La historia de saturación del medio puede incidir en la mojabilidad de la superficie. Dándose los supuestos de que la formación sea mojable o no por petróleo o se genere una condición de mojabilidad mixta.

La presión capilar es la diferencia de presión en la interface de dos fluidos inmiscibles, uno de los cuales preferentemente moja la superficie sólida.

$$P_c = P_{nm} - P_m \quad (8)$$

Donde:

P_c = presión capilar

P_{nm} = presión de la fase no mojante

P_m = presión de la fase mojante

La presión capilar se puede calcular de la siguiente forma

$$P_c = \Delta \rho * g * h \quad (9)$$

$$P_c = 2\gamma \frac{\cos\theta}{r} \quad (10)$$

Donde:

$\Delta\rho$ = diferencia de densidades entre las fases

g = gravedad

h = altura de la elevación capilar

γ = tensión interfacial

θ = ángulo de contacto

r = radio de capilaridad interno

El ángulo de contacto está en función del equilibrio de fuerzas resultante de la interacción de las tres tensiones interfaciales entre fases y cada fase con la superficie sólida (Figura 2.4).

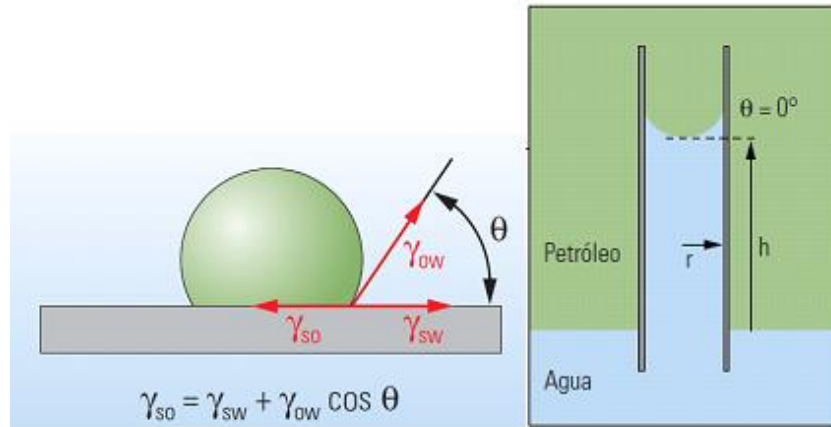


Figura 2.4 Ángulo de contacto entre dos fases líquidas y una fase sólida y efecto de tubo capilar

En la zona del acuífero, dado que sólo existe la fase agua, la presión capilar es igual a cero hasta la frontera del contacto agua/aceite (w/o) donde comienza una zona de transición de dos fases. La presión capilar va en aumentando hacia arriba conforme aumenta la saturación de aceite y/o gas, y disminuye la saturación de agua. La zona de transición termina llegado el momento en que la saturación del agua no se puede reducir más no importando la presión capilar, y a esta agua se le denomina agua irreductible (Figura 2.5).

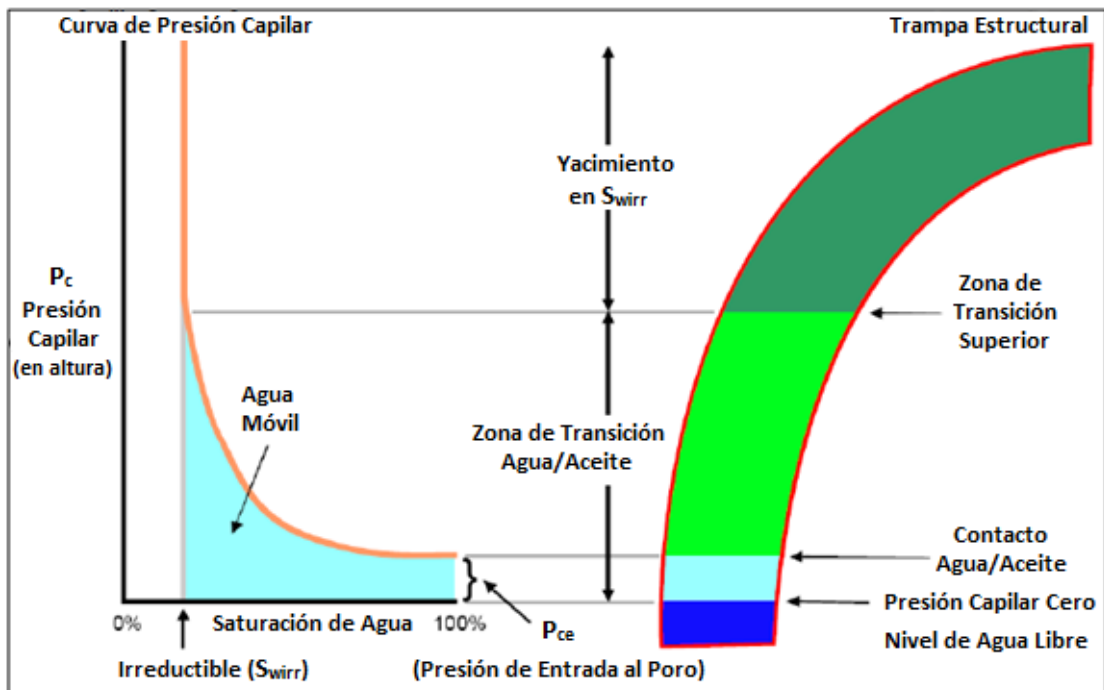


Figura 2.5 Definición del contacto agua aceite y nivel de agua libre

La saturación de aceite irreductible medidas en muestras en laboratorio permite estimar la cantidad de aceite recuperable. La saturación de agua inicial o connata se puede obtener mediante mediciones confiables de la porosidad, la resistividad y el tipo de minerales que componen la formación que pueden provenir de:

- Núcleos tomados de la formación conservando lo más posible las condiciones del yacimiento
- Pruebas de presión capilar en laboratorio de núcleos
- Mediante registros geofísicos

La determinación de la saturación a través de registros geofísicos en formaciones limpias con porosidad intergranular homogénea está basada en la ecuación de Archie.

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a * R_w}{\phi^m * R_T}} \quad (11)$$

Donde:

S_w = saturación de agua

R_w = resistividad del agua de formación [Ohm-m]

R_T = resistividad verdadera de la formación

ϕ = porosidad [%]

n = exponente de saturación

a = factor de tortuosidad (generalmente se asume como 1)

2.5 Resistividad

La resistividad es la resistencia eléctrica específica de un material determinado. La unidad de medida es el Ohm por metro (Ω -m).

$$R = r \frac{A}{L} \quad (12)$$

Donde

R = resistividad eléctrica del elemento

r = resistencia eléctrica del elemento

A = área transversal del elemento

L = longitud del elemento

Las formaciones de roca están constituidas de minerales sólidos y fluidos como el gas, aceite y agua de formación. El material sólido de la formación, así como el aceite y gas hidrocarburos son aislantes eléctricos y presentarán resistividades altas, mientras que el agua de formación conducirá la corriente eléctrica a través de su fase que estará distribuida en el medio poroso, por lo que la resistividad será baja en comparación con los otros componentes de la formación, lo que implica que el flujo de corriente eléctrica será principalmente a través del agua. Dependiendo de la salinidad del agua de formación ésta conducirá de mejor forma la corriente.

La base del análisis de registros eléctricos es comparar la resistividad medida de una formación con la resistividad calculada de dicha formación, mientras su porosidad está saturada al 100% con el agua de la misma formación. La resistividad de una roca saturada 100% con agua de la formación se refiere como resistividad mojada (R_o). Si en la comparación resulta que la resistividad medida de la formación es significativamente mayor a la resistividad mojada, eso indica la presencia de hidrocarburos. Esta relación es la base para la determinación de la saturación del agua de formación al medir el porcentaje de porosidad ocupada por agua, el otro porcentaje pertenecerá a los hidrocarburos. Si el sistema poroso lo ocupan sólo el agua y el aceite es posible calcular la saturación de aceite. La saturación de agua para una formación limpia se calcula usando la ecuación de Archie.

La resistividad para formaciones arenosas está en el rango de 0.2 a 1,000 Ω -m y en formaciones calcáreas del orden de 100 a 40,000 Ω -m.

Los factores que afectan la resistividad de una formación son:

La saturación de agua: ya que a mayor saturación de agua, menor será la saturación de hidrocarburos y menor será la resistividad.

Porosidad: mientras mayor sea el volumen poroso, mayor será el volumen del agua para un mismo valor de saturación.

La temperatura: a medida que aumenta la temperatura en la formación, la resistividad disminuye debido a que los iones que transportan la electricidad se mueven con más rapidez.

La litología: La resistividad es menor en areniscas que en carbonatos ya que el trayecto de la corriente eléctrica es más tortuoso en carbonatos.

2.6 Factor de formación

La resistividad de una formación limpia es proporcional a la resistividad de la mezcla con la que está saturada, la constante de proporcionalidad se define como factor de formación y es característico de una formación en particular.

Considerando una formación con una porosidad dada y suponiendo que está 100% saturada con el agua salina de formación de resistividad dada (Figura 2.6). La resistividad de la formación dependerá de la resistividad del agua de formación y de otros factores que se conjugan en el factor de formación.

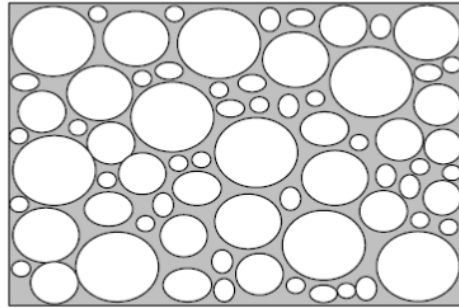


Figura 2.6 Modelo de formación: 100% saturado de agua

$$R_o = F * R_w \quad (13)$$

Donde:

R_o = resistividad de la formación mojada

R_w = resistividad del agua presente en la formación

F = factor de formación

Reacomodando de la ecuación, el factor de formación se calcula como la relación de la resistividad de la formación mojada entre la resistividad del agua presente en esa formación.

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (14)$$

Como se puede observar, el factor de formación es directamente proporcional a la resistividad de la formación mojada, mientras que la resistividad es inversamente proporcional a la porosidad, por lo tanto, el factor de formación es inversamente proporcional a la porosidad de la formación.

$$F \propto \frac{1}{\phi} \quad (15)$$

El factor de formación varía según el yacimiento del que se trate debido a peculiaridades propias de cada uno, las cuales se representan en el factor de tortuosidad (a) y el exponente de cementación (m) (Tabla 2.1).

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (16)$$

Estos parámetros pueden determinarse en laboratorio para un yacimiento en específico. Los analistas de registros utilizan comúnmente un conjunto de valores estándar para el factor de tortuosidad y el exponente de cementación dependiendo de la litología y la porosidad, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Material	m	Material	a
Arenas no consolidadas	1.3	Arenas no consolidadas Porosidad > 16 %	0.62
Arenisca muy escasamente cementada	1.4-1.5		
Arenisca escasamente cementada	1.5-1.7		
Arenisca moderadamente cementada	1.7-1.9	Arenas consolidadas Porosidad < 16 %	0.81
Arenisca o limolita altamente cementada	1.9-2.2		
Carbonatos	2.1		1.0

Tabla 2.1 Exponente de cementación y factor de tortuosidad para arenas y carbonatos (Hallemburg, 1998)

Ahora, si consideramos que la formación tiene en sus poros tanto agua salina de formación como aceite en alguna combinación de porcentajes (Figura 2.7), la resistividad de la formación ya no será la resistividad de la formación mojada que era cuando el agua saturaba al 100 % los poros de la roca. En este caso la resistividad de la formación, que considera tanto la matriz de la roca como los fluidos contenidos en ella, se denomina resistividad verdadera de la formación.

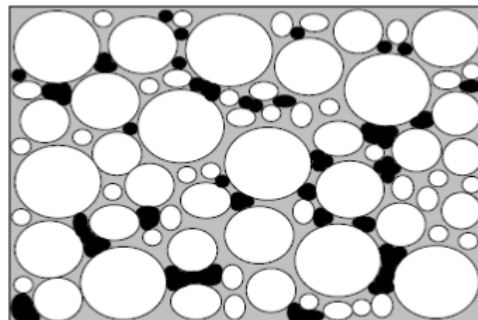


Figura 2.7 Modelo de formación: saturado de agua y aceite

La resistividad mojada de la formación se relaciona con la resistividad verdadera a través de un factor adicional referido como F'.

$$R_o = F' * R_t \quad (17)$$

El factor F' se puede expresar como la relación entre la resistividad teórica mojada de la formación respecto a su resistividad verdadera (R_t).

$$F' = \frac{R_o}{R_t} \quad (18)$$

El factor F' resulta dependiente de la proporción relativa de saturaciones de fluidos conductivos (agua salina de formación) y no conductivos (hidrocarburos).

La saturación de agua puede relacionarse con las propiedades físicas de la formación y a las propiedades conductivas de los fluidos que contiene mediante un exponente que se define como exponente de saturación (n).

$$S_w^n = \frac{R_o}{R_t} = \frac{F * R_w}{R_t} = \frac{a}{\phi^m} * \frac{R_w}{R_t} \quad (19)$$

El exponente de saturación tiene un rango de valores que dependen de las condiciones específicas del yacimiento. Generalmente se supone igual a 2.

Con el conocimiento de las características de producción, es posible determinar valores más aproximados del exponente.

En su forma más simple, la ecuación de Archie se expresa como:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a}{\phi^m} * \frac{R_w}{R_t}} \quad (20)$$

Donde:

S_w = saturación del agua de formación

R_w = resistividad del agua de formación

R_t = resistividad verdadera de la formación

ϕ = porosidad [fracción]

n= exponente de saturación

a= factor de tortuosidad

Estas propiedades no se pueden medir directamente, así que son obtenidas indirectamente de otras propiedades, de naturaleza eléctrica para calcular la saturación de agua, sónicas para calcular la porosidad y radioactivas también usada en el cálculo de la porosidad y en la determinación de tipos de roca.

2.7 Susceptibilidad magnética

Las propiedades magnéticas de un material se generan por los movimientos de las partículas cargadas eléctricamente. Un electrón tiene una magnetización ligada a su giro axial (spin axial) y a su movimiento orbital alrededor del núcleo (Figura 2.8).

Cuando un material se expone a un campo magnético el giro de sus electrones cambia hasta producir un momento magnético paralelo al campo al que está expuesto, en este momento al material se le ha inducido una magnetización (M) que es proporcional (χ) al campo de externo (H).

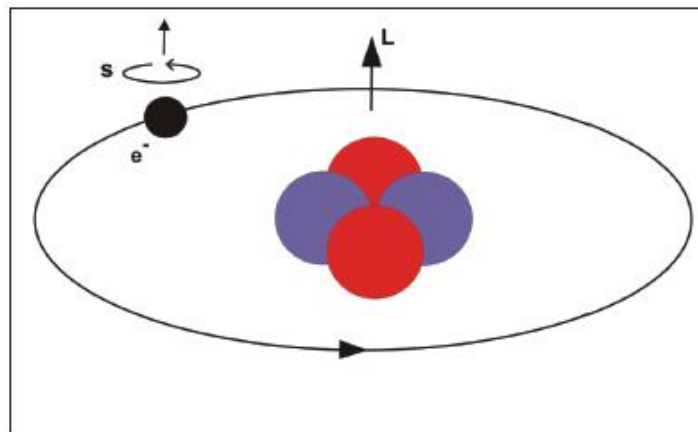


Figura 2.8 Momento magnético orbital de un electrón alrededor de su núcleo de protones y neutrones y momento magnético de su giro axial (spin axial)

La intensidad del campo externo medida en [A/m], es proporcional al campo de inducción magnética (B) en [T] e inversamente proporcional a la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]).

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (21)$$

La magnetización es el momento del dipolo magnético, que es el grado de alineación de los dipolos magnéticos por unidad de volumen [A/m].

El grado de proporcionalidad, es la susceptibilidad magnética, la cual es una constante adimensional para cada material reportada en unidades del Sistema Internacional. La susceptibilidad magnética está determinada por las propiedades físicas del material magnético y puede asumir valores positivos o negativos según el material adquiera una magnetización en el mismo sentido o en sentido contrario al campo externo.

$$M = \chi H \quad (22)$$

Todo material, al ser expuesto a un campo magnético externo experimenta una magnetización. La susceptibilidad magnética indica el grado de magnetización de un material influenciado por un campo magnético y está directamente relacionada a la permeabilidad magnética, la cual es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos y está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material, se representa con el símbolo μ (Figura 2.9).

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (23)$$

En la mayoría de los materiales el momento magnético producido paralelo a un campo magnético externo se pierde tan pronto como el campo es retirado, esto es que tiene susceptibilidades bajas y sólo unos cuantos materiales cuyas susceptibilidades son mayores, son capaces de conservar una magnetización remanente. Existen tres tipos de materiales magnéticos:

- Paramagnéticos: H e B tienen igual sentido y χ es constante
- Diamagnéticos: H e B son opuestos y χ es constante
- Ferromagnéticos: χ variable con H

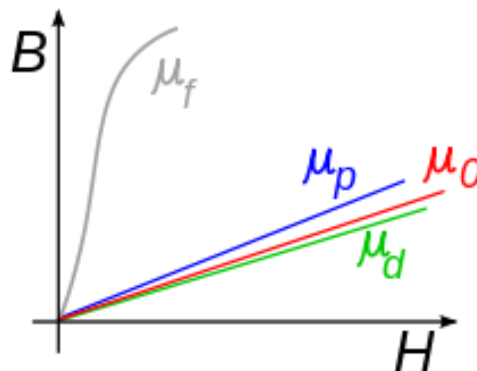


Figura 2.9 Comparación de permeabilidades para materiales ferromagnéticos, paramagnéticos, diamagnéticos y el vacío

Los materiales diamagnéticos son aquellos cuyos spines de sus átomos se orientan paralelo, pero en sentido inverso al campo magnético externo, su magnetización es débil y en sentido opuesto al campo y por lo tanto su susceptibilidad magnética es negativa y de valores muy bajos.

Se puede observar que los materiales diamagnéticos son ligeramente repelidos ante la presencia de un campo magnético, como un imán.

Su característica fundamental es que tienen los niveles energéticos de sus electrones completos con electrones pares en sus capas y no existen momentos magnéticos desapareados. Al aplicar sobre ellos un campo magnético externo se induce un momento que tiende a compensar el flujo magnético que se ejerce sobre los orbitales, efecto que les da una magnetización débil y en sentido opuesto al campo.

Se tienen numerosos ejemplos entre los principales constituyentes de las rocas están: el sílice (cuarzo), el carbonato de calcio (calcita), el silicato-aluminatos (feldespatos), el carbón y materiales orgánicos, así como la mayoría de los metales de la tabla periódica.

Los materiales paramagnéticos son los que, al exponerse a un campo magnético externo, los spines de sus átomos se orientan paralelos y en el mismo sentido que el campo externo, su magnetización es débil y en el mismo sentido del campo. Su susceptibilidad magnética es positiva y de magnitud baja, pero aún mayor que un grupo de diamagnético. Los materiales diamagnéticos se pueden distinguir porque son ligeramente atraídos por un campo magnético como el de un imán. Su característica principal es que los niveles energéticos de sus electrones están incompletos, electrones impares en sus capas. Entre los ejemplos constituyentes formadores de rocas tenemos, principalmente los silicatos de hierro, ejemplo: biotita, anfíboles, piroxenos, olivino, así como carbonato de hierro y manganeso, y arcillas, como la montomorillonita. También muchas tierras raras son paramagnéticas.

Los materiales ferromagnéticos son aquellos que conservan magnetización remanente en ausencia de un campo magnético externo y son fácilmente identificables por ser francamente atraídos hacia un imán. En ellos, los spines de sus electrones se acoplan de forma instantánea, alineándose paralelamente mediante una interacción que permanece aún en ausencia de un campo magnético externo (Figura 2.10), propiedad denominada *magnetización espontánea*. La permanencia de la interacción se debe a que opera una *fuerza de intercambio* que ocurre debido a que la energía de los dipolos vecinos es menor cuando los dipolos están alineados en esa posición que en cualquier otra.

Esta propiedad se presenta en los primeros elementos de la serie de transición de electrones no apareados en el nivel 3d, mitigando la magnetización que surge del movimiento orbital de sus electrones. Ejemplos de materiales ferromagnéticos son el hierro, níquel, cobalto y sus compuestos, así como en los materiales llamados ferritas.

En los compuestos más complejos, como los óxidos de la primera serie de transición, el spin del electrón de los cationes es compartido con la capa de electrones de un anión intermedio y entre ellos opera una *fuerza de superintercambio*, esto implica que la dirección del spin del electrón de los cationes vecinos queda invertida, creando fuerzas opuestas de magnetización que resultan mezcladas. Si la intensidad de ambas fuerzas llamadas *látices* está balanceada no habrá una magnetización neta resultante. En tal caso, a estas sustancias se les denomina antiferromagnéticas, sin embargo, esta condición es muy rara, ya que un leve desbalance de las fuerzas resulta en una magnetización neta resultante, a los materiales con esta propiedad se les denomina ferrimagnéticos.

Ejemplos de antiferromagnéticos imperfectos son: la hematita, goethita, ilmenita y uvoespinela. Ejemplos de materiales ferrimagnéticos son: óxidos de hierro con estructura de espinela como la magnetita, la maghemita y la pirrotita.

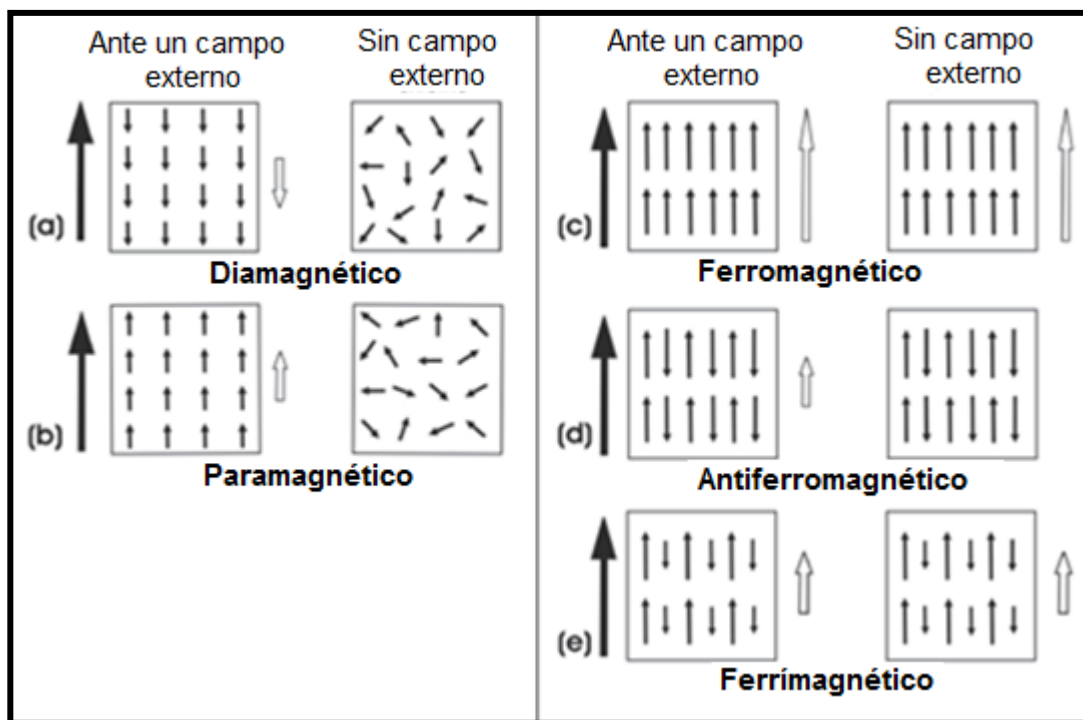


Figura 2.10 Diferentes tipos de comportamiento magnético (las flechas rellenas indican campo aplicado y las vacías la magnetización del material)

Minerales	Composición	Susceptibilidad Magnética K1	Grado de anisotropía P1
<i>Ferromagnéticos</i>		X 10 ⁻³ SI	
Magnetita SD	Fe ₃ O ₄	< 1500	< 5
Magnetita MD		< 3000	
Magnetita PSD		< 5000	
Hematites	αFe ₂ O ₃	2 - 50	2.5 - 100
Pirrotita	Fe ₇ S ₈	50 - 300	> 100
Goethita	αFeOOH	1.3 - 5	2
<i>Paramagnéticos</i>		X 10 ⁻³ SI	
Piroxenos	XY[(Si,Al)O ₃] ₂	0.5 - 5	1.2 - 1.4
Anfíboles	X ₀₋₁ Y ₂ Z ₅ [(Si,Al) ₄ O ₁₁] ₂ (OH) ₂	0.5 - 5	1.08 - 1.3
Biotita	K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH)	1 - 3	1.35
Otras micas		0.05 - 1	1.2 - 1.35
Siderita	FeCO ₃	3.8 - 4.2	1.7
<i>Diamagnéticos</i>		X 10 ⁻⁶ SI	
Cuarzo	SiO ₂	-14.5	< 1.01
Calcita	CaCO ₃	-13.0	1.13

Tabla 2.2 Susceptibilidad y grado de anisotropía de minerales selectos, X, Y, Z pueden ser de menor a mayor radio iónico: K, Na, Ca, Fe+2, Mg, Zn, Mn, Cr, Al, Fe+3, Ti, entre otros

Debido a que existe un amplio rango de susceptibilidades según el comportamiento magnético de los materiales que constituyen las rocas, su contribución en la susceptibilidad total no es proporcional a la cantidad de material como porcentaje total de roca, ya que una pequeña cantidad de material ferromagnético contribuye de forma más marcada, aun cuando la mayoría de sus contribuyentes son diamagnéticos o paramagnéticos, esto ocurre en todas direcciones y se establece un *grado de anisotropía* (Tabla 2.2).

Por ejemplo, un 0.01% del peso de la magnetita en una roca de material diamagnético puede dar susceptibilidades del orden de 10⁻⁴ SI, hecho que sucede en muchas calizas. En ausencia o con muy bajas proporciones de ferromagnéticos, los efectos de los paramagnéticos serán más importantes, por su parte, el aporte de los materiales diamagnéticos será significativo cuando los ferromagnéticos constituyen <0.001% del peso total de roca y los paramagnéticos < 10%.

Los minerales constituyentes de rocas más importantes son el cuarzo, feldespato, carbonato de calcio y magnesio, y son minerales diamagnéticos con susceptibilidades negativas del orden de 10⁻⁵ a 10⁻⁸ SI. Los minerales paramagnéticos como el piroxeno, anfíboles, biotita, granate, olivino, muscovita y clorita tienen susceptibilidades positivas del orden de 10⁻⁷ a 10⁻⁴ SI, y se presentan en proporciones variables menores al 15% en rocas sedimentarias y hasta 25 a 40% en rocas ígneas. Los minerales ferromagnéticos con susceptibilidades mayores a 10⁻⁵ se presentan usualmente en cantidades menores al 1% y ocasionalmente en el orden de 5% en rocas ígneas y metamórficas.

Tipo de roca Sedimentaria	K (SI X10 ⁻⁵)	Tipo de roca Ígnea	K (SI X10 ⁻⁵)	Tipo de roca Metamórfica	K (SI X10 ⁻⁵)
Limolita	2.5 - (20)	Basalto	(2.2) 100 - 7700 (10000)	Gneis	0.6
Lutita	1.26 - (10)	Riolita	25 - 100	Esquisto	0.13
Arenisca	1.26	Ignimbrita	25 - 2500	Pizarra	0.13
Lechos rojos	0.063 - 0.63	Gabro	10 - 10000		
Caliza	< 0.013 - 0.025 (10)	Diorita	0.6		
		Ultrabásicas	0.3		
		granitos A e I	100 - 1000		
		granitos M y S	1 - 100		

Tabla 2.3 Susceptibilidades características de diversos tipos de roca (en negritas los valores más comunes reportados, entre paréntesis se indican los valores extremos)

2.8 Polarización inducida y cargabilidad

La polarización inducida es un fenómeno eléctrico en donde los iones en la superficie de cuerpos o sustancias químicas se redistribuyen en polos opuestos, atraídos o repelidos por el campo eléctrico generado por una corriente eléctrica inducida, en este proceso una cantidad de carga es acumulada en el cuerpo del material, es decir, se origina una reacción de transferencia de carga eléctrica. (Figura 2.11).

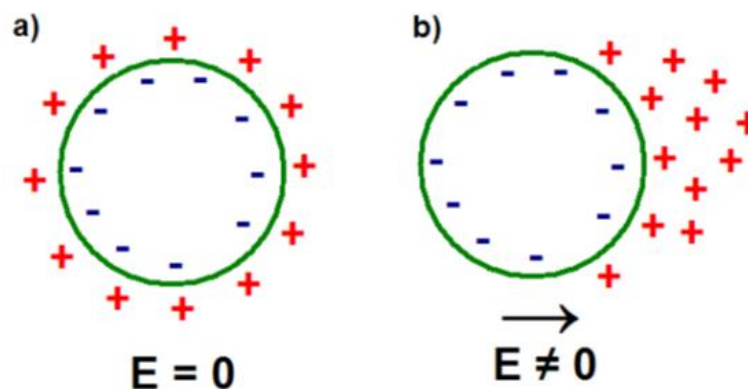


Figura 2.11 Polarización. a) Distribución de iones en equilibrio, b) polarización siguiendo la aplicación de un campo eléctrico.

Al ser interrumpida la corriente, los iones polarizados tienden a volver a su equilibrio electrostático y la carga retenida es liberada generando un movimiento residual de carga eléctrica (Figura 2.12), por lo que el voltaje no decae a cero inmediatamente, sino que lo hace lentamente.

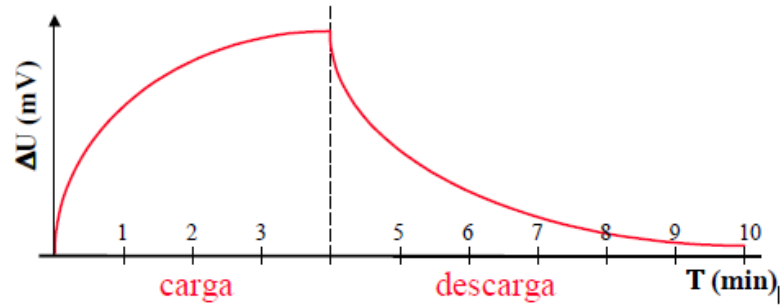


Figura 2.12 Variación del voltaje durante el periodo de carga y descarga

Al inyectar corriente en el suelo y medir la diferencia de potencial entre dos electrodos, si hay una ausencia del efecto de polarización inducida el suelo es no polarizable, el potencial medido presentara una variación exactamente igual a la forma de onda de la corriente eléctrica de la fuente o transmisor, sin ningún retraso (decaimiento o incremento) en el potencial. En el caso contrario, cuando el suelo es polarizable, el potencial se incrementará y después decaerá con cierto tiempo de retraso (Figura 2.13).

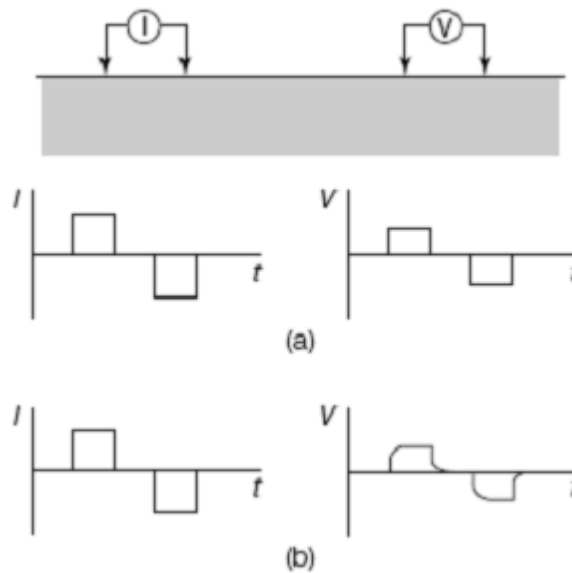


Figura 2.13 Forma de la onda del voltaje al inyectar corriente eléctrica en medios no polarizables (a) y polarizables (b)

Los minerales metálicos y los minerales arcillosos pueden provocar anomalías de polarización inducida. A nivel microscópico, estos fenómenos se denominan polarización electrónica: un metal y un fluido, y polarización de membrana: un no metal (sílice o minerales arcillosos) y un fluido.

La polarización inducida está directamente relacionada con la alteración de capas eléctricas binarias, ya sea en el interior de los conductos porales de las rocas sedimentarias con contenidos arcillosos, dando lugar a la polarización de membrana (Figura 2.15), o en los límites de las fases sólida y líquida de medios complejos constituidos por minerales semiconductores en estado natural y electrolitos líquidos, como el agua subterránea, dando lugar a la denominada polarización de electrodos (Figura 2.17).

Los poros y capilares de las rocas contienen casi siempre partículas de arcilla las cuales normalmente tienen un exceso superficial de cargas negativas, que hace que iones positivos (cationes) del electrolito inmediato formen una capa rígida adyacente alrededor de la partícula (Figura 2.14). Conforme los cationes se alejan de la partícula de arcilla hay una capa difusa con déficit de iones negativos cuya concentración aumenta hasta llegar a una zona donde los iones positivos y negativos del electrolito tienden a estar en equilibrio.

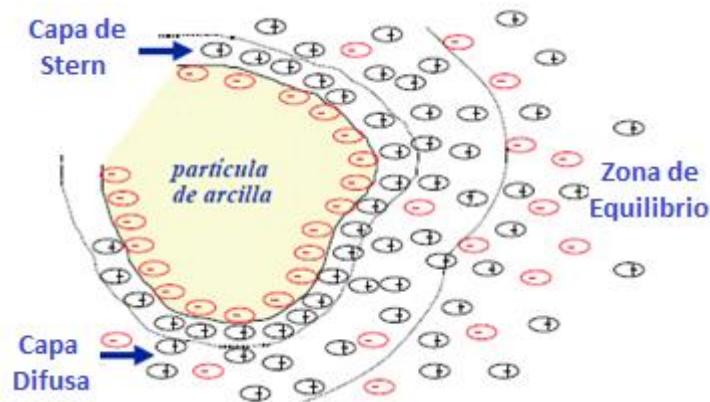


Figura 2.14 Polarización de las partículas de arcilla

Polarización de las partículas de arcilla

Una corriente eléctrica exterior alterará el equilibrio desplazando gran parte de cationes de la capa difusa a lo largo de los capilares donde se encuentra la arcilla, lo que provocará una concentración anormal en la solución, provocando la aparición de un potencial de difusión conocido como polarización de membrana.

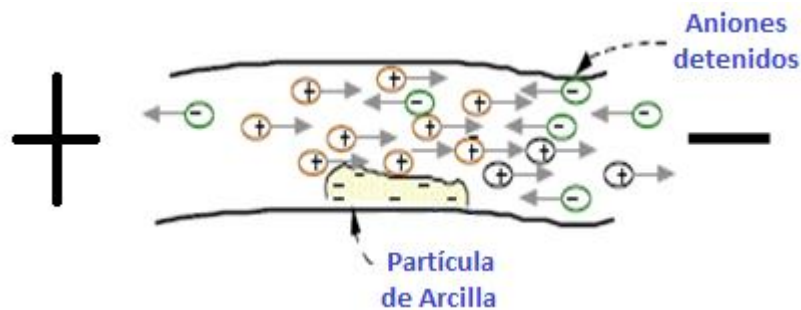


Figura 2.15 Polarización de membrana por efecto de concentración anormal de aniones en presencia de partículas de arcilla

En el límite entre un electrolito y un mineral de conducción electrónica (minerales metálicos) en equilibrio electrostático (Figura 2.16), existe también una capa binaria debida al exceso de cargas negativas de la superficie del mineral y la consecuente polarización positiva de la solución contigua, el exceso de cargas negativas en la superficie de la partícula mineral se debe a la entrega de cationes al electrolito, por influencia de las moléculas de agua fuertemente polarizadas.

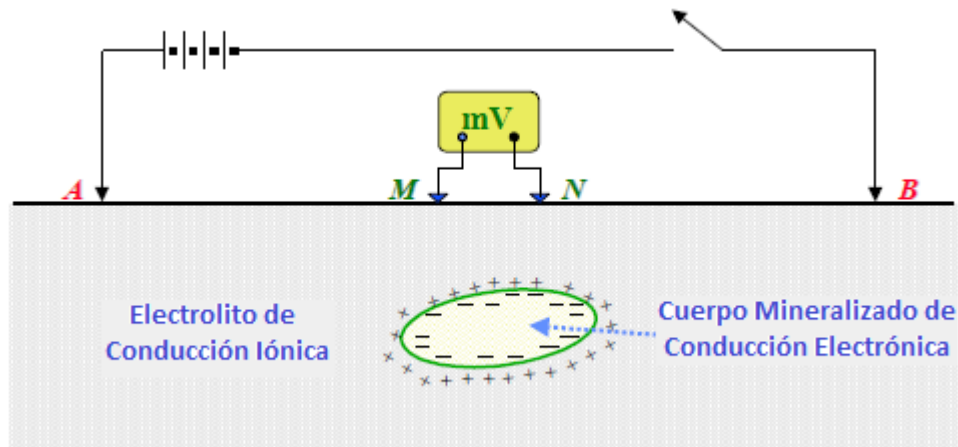


Figura 2.16 Capa binaria en el límite entre las fases sólida y líquida

Capa binaria en el límite de las fases sólida y líquida

Al pasar por este sistema una corriente eléctrica, el equilibrio cambia, la capa limítrofe del electrolito del lado del electrodo de alimentación positiva adquiere un exceso de cargas positivas, mientras que del lado de alimentación negativa un defecto de ellas y hasta un exceso de cargas negativas. La partícula se bipolariza y se convierte en un dipolo diferente de la partícula con sobrecarga negativa, anterior al paso de la corriente.

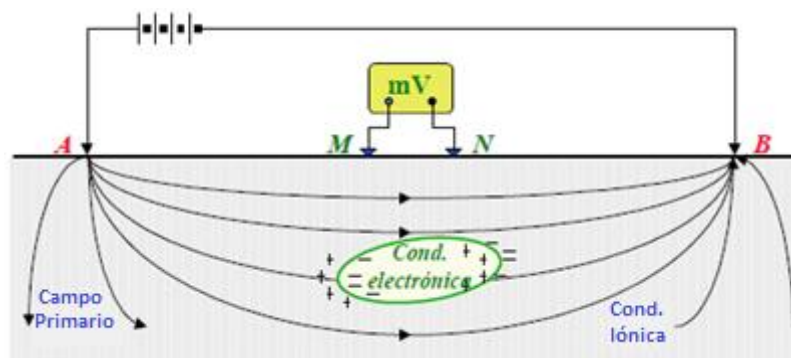


Figura 2.17 Polarización de electrodos. Efecto de la corriente en los límites electrolito/partícula semiconductor

Al interrumpirse la corriente, se restablece lentamente el equilibrio original hasta que el potencial remanente, provocado por la aparición de la diferencia de potencial entre las caras opuestas del mineral vuelve a cero.

Existen dos posibles formas de medir el efecto de la polarización inducida, la primera es con una curva de decaimiento de voltaje, en el dominio del tiempo, la segunda es como la diferencia de voltaje con la variación de la frecuencia, en el dominio de la frecuencia.

En el dominio del tiempo, la cargabilidad es definida como el cociente del voltaje después de interrumpir la corriente (V_s) entre el máximo valor de voltaje (V_p), un cociente adimensional que se conoce cargabilidad inmediata:

$$m(t) = \frac{V_s}{V_p} \quad (24)$$

O bien la integral de la curva de decaimiento del potencial V_p al ser interrumpida la corriente se le llama la cargabilidad global, con unidades en milisegundos:

$$M(t) = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (25)$$

En la práctica se usa ésta última integral normalizada (Van Schoor et al, 2009) y sus unidades son [mV/V]:

$$M(t) = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (26)$$

La siguiente figura (Figura 2.18) muestra un esquema para la curva de decaimiento, donde V_0 es el potencial instantáneo cuando la corriente es inyectada, V_p es el voltaje primario que se tiene cuando se interrumpe la corriente, V_s es el voltaje secundario, t_1 es el tiempo de retraso entre el muestreo del decaimiento de la polarización inducida y cuando la corriente se detiene, t_{mi} define el ancho de las ventanas de tiempo utilizadas para determinar la cargabilidad.

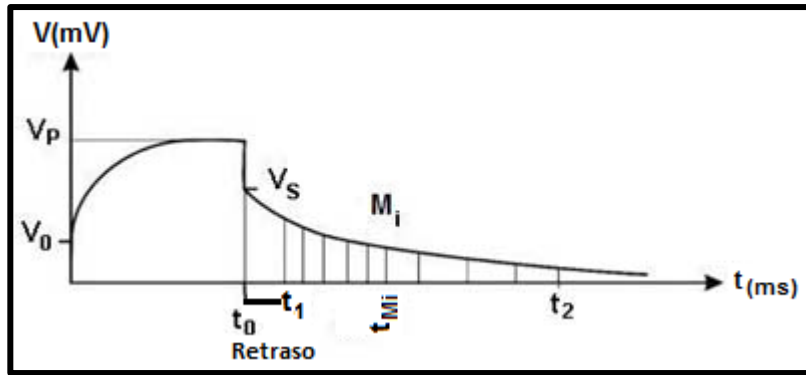


Figura 2.18 Curva de decaimiento de la cargabilidad y los elementos para obtenerla

La corroboración de estas propiedades en laboratorio mediante la realización de mediciones directas, es pieza clave en la correcta evaluación de formaciones petroleras. Los datos obtenidos en laboratorio al ser mediciones directas tienen una mayor credibilidad que los datos provenientes de fuentes indirectas con lo que sirven para ajustar y corregir los valores de los registros de pozo.

3 Métodos de Medición de Propiedades Petrofísicas

Una revisión de la información geológica disponible del área investigada, ya sea en tierra o mar como mapas geológicos y estructura presentes junto con estudio de grande áreas de extensión mediante el fotografiado aéreo o subacuático, y estudios geológicos de campo y laboratorio ayudan a identificar áreas de interés: como por ejemplo, cuencas sedimentarias que fueron creadas en ambientes de acuosos en donde se haya dado la depositación y acumulación de materia orgánica entre sedimentos, y con el tiempo dado paso a la generación de hidrocarburos y los elementos del sistema petrolero.

Una vez identificada una posible área de prospección se realizan estudios geofísicos de magnetometría y gravimetría que obtienen información acerca de anomalías en los campos magnético y gravitacional del subsuelo en el área de estudio que podrían interpretarse como la lectura de zonas de posibles acumulaciones de hidrocarburos.

Magnetometría

La prospección magnética es un método basado en la medida y estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, obteniéndose medidas del valor total del campo magnético o bien, opcionalmente, del gradiente de dicho campo magnético. Estas variaciones, son debidas a la presencia de cuerpos susceptibles de ser magnetizados y que, por tal motivo, contribuyen a modificar el campo magnético terrestre en su entorno. El campo geomagnético no es constante sino sufre variaciones con el tiempo y con respecto a su forma. La imantación inducida depende de la susceptibilidad magnética de una roca o de un mineral y del campo externo existente.

Con esta información se determina la profundidad de las rocas pertenecientes al basamento (roca ígnea o metamórfica). A partir de estos conocimientos se puede localizar y definir la extensión de las cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento, que posiblemente contienen reservas de petróleo.

Gravimetría

El método de gravimetría aprovecha las diferencias en el campo de gravedad de la tierra en distintas áreas o sectores haciendo uso de campos de potencial natural igual al método magnético.

El método consiste en realizar mediciones relativas, es decir, se mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro, estas variaciones son originadas por variaciones en la densidad de las rocas del área investigada, siendo que a mayor cantidad de materia en un mismo volumen la fuerza de gravedad es mayor. El campo de potencial natural se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas que constituyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada y permite diferenciar rocas consolidadas y densas de rocas deleznable y porosas, así como la presencia de minerales y saturación de fluidos. La aplicación de este método consiste principalmente en localizar domos salinos.

Sísmica

Conforme se avanza en el estudio de la cuenca geológica y se van dando indicios de posible acumulación de hidrocarburos se realizan levantamientos y procesamiento de datos sísmicos 2D o 3D, que una vez interpretados arrojan una imagen plana o cúbica de la estructura geométrica de las formaciones geológicas en donde se pueden identificar configuraciones de roca que sirvan de trampa.

La sísmica de reflexión se puede adquirir en tres tipos de ambientes: marino, terrestre y zonas de transición.

Este método utiliza una fuente de energía impulsiva o vibratoria para generar las ondas elásticas que se propagan hacia el subsuelo, pasando por capas de rocas que poseen propiedades físicas y litológicas de interés.

Las ondas experimentan una partición de energía cada vez que encuentran a su paso una interfaz entre dos capas con velocidades y densidades diferentes, una parte de la energía se transmite y otra se refleja. La energía que se refleja forma el campo de ondas que contiene información de las amplitudes, longitudes de onda, fases y tiempos dobles de los reflectores del subsuelo. Cuando estos campos de onda llegan a la superficie son captados por instrumentos de escucha llamados en general geófonos y esta información se almacena en forma digital en cintas o discos duros en los equipos de registro del sismógrafo

El proceso comienza con un grupo de geólogos y/o geofísicos que hacen un estudio del subsuelo y definen un área en donde la geología sugiere qué hidrocarburos podrían estar

almacenados en esa área. Después, se realizan el levantamiento topográfico del proyecto, el corte y preparación de las líneas sísmicas. Se determina en que área se colocará la nueva línea 2D o grilla 3D. Los datos son suministrados a un procesador quien al final crea una sección sísmica 2D o un volumen de datos 3D para que el intérprete analice los resultados y determine si es viable la perforación de pozos de producción.

Todos estos indicios ayudan a localizar estratégicamente los sitios u objetivos más favorables y que tengan el mayor porcentaje de éxito de encontrar depósitos de hidrocarburo. Sin embargo, la única manera de saber a ciencia cierta si hay acumulaciones del valioso recurso es mediante la perforación de pozos exploratorios.

3.1 Registros geofísicos de pozo

Durante el proceso de perforación se diseña un plan de toma de información que incluye corridas de registro geofísicos y toma de núcleos que van a medir las propiedades físicas y petrofísicas de las formaciones atravesadas como la litología, textura, porosidad, saturación de fluidos, permeabilidad, etc.

Los registros geofísicos son representaciones analógicas o digitales de una propiedad física de la roca que se mide contra la profundidad del pozo (Figura 3.1). Se pueden tomar tanto en agujeros descubiertos o entubados, y dentro de la formación podemos encontrar tres zonas: de invasión, de transición y zona virgen.

Los registros geofísicos nos permiten identificar las características petrofísicas de las formaciones rocosas del subsuelo, obtenidas mediante mediciones de los parámetros físicos, como eléctricos, acústicos, radiactivos, etc. La importancia de conocer estos parámetros físicos es con el objetivo de evaluar y definir los intervalos atractivos de contener hidrocarburos.

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.

Las sondas son cilindros de metal que tienen en su parte interior circuitos electrónicos 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 que envía una señal hacia la formación y uno o varios receptores que miden la respuesta de la formación a cierta distancia del emisor.

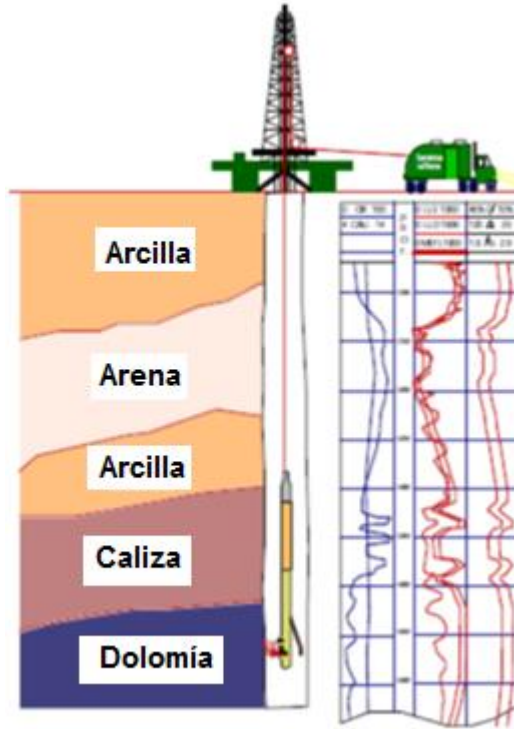


Figura 3.1 Diagrama esquemático de la toma de registro

Los de registros pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de herramienta usada, las cuales están en función del principio físico que operan (Tabla 3.1).

Los principalmente usados son:

- Resistivos: cuya fuente es una corriente eléctrica
- Radioactivos: cuya fuente son emisiones de radioactividad
- Sónicos: cuya fuente son ondas acústicas

Registros Eléctricos	Registros Radioactivos	Registros Sónicos
Inducción	Neutrón compensado	Sónico de porosidad
Doble inducción	Lito densidad compensada	Sónico dipolar de imágenes
Doble Laterolog	Espectroscopía de rayos gamma	Imágenes ultrasónicas
Microesférico	Rayos gamma naturales	
Micro imágenes resistivas		

Tabla 3.1 Registros Geofísicos clasificados de acuerdo con su Principio de medición

O bien, en función de la propiedad física a medir, así se clasifica en: registro de porosidad, registro de saturación de agua, registro de litología, registro de imagen, registro magnético, entre otros.

3.2 Potencial espontáneo

El potencial espontáneo (SP) es un potencial natural ocasionado por la diferencia de salinidad entre el fluido de perforación y el agua de formación, la cual es medida mediante el uso de un electrodo colocado en la presa de lodo en la superficie y otro que va recorriendo las paredes del pozo y registrado en función de la profundidad.

La curva del SP es una indicadora de la permeabilidad iónica y su principal uso es para diferenciar capas impermeables, como las lutitas, que son eléctricamente conductivas, de capas permeables (Figura 3.2).

La magnitud de las deflexiones de las curvas SP está en función de la diferencia de resistividad entre el lodo de perforación y el agua de formación, así pudiéndose conocer la resistividad del agua de formación conociendo la resistividad del lodo de perforación.

Las curvas del SP tiene una tendencia estable, dibujando una línea más o menos recta mediante se van registrando capas impermeables conocida como línea base de lutitas (Figura 3.3). Las deflexiones hacia la derecha o izquierda de la curva dependen de si la salinidad del agua de formación sea menor o mayor que la del fluido de perforación respectivamente e indican capas permeables.

El registro del SP no se puede aplicar en pozos entubados o en donde se perfora con un fluido de perforación no conductivo debido a que no se puede establecer una continuidad eléctrica entre los electrodos.

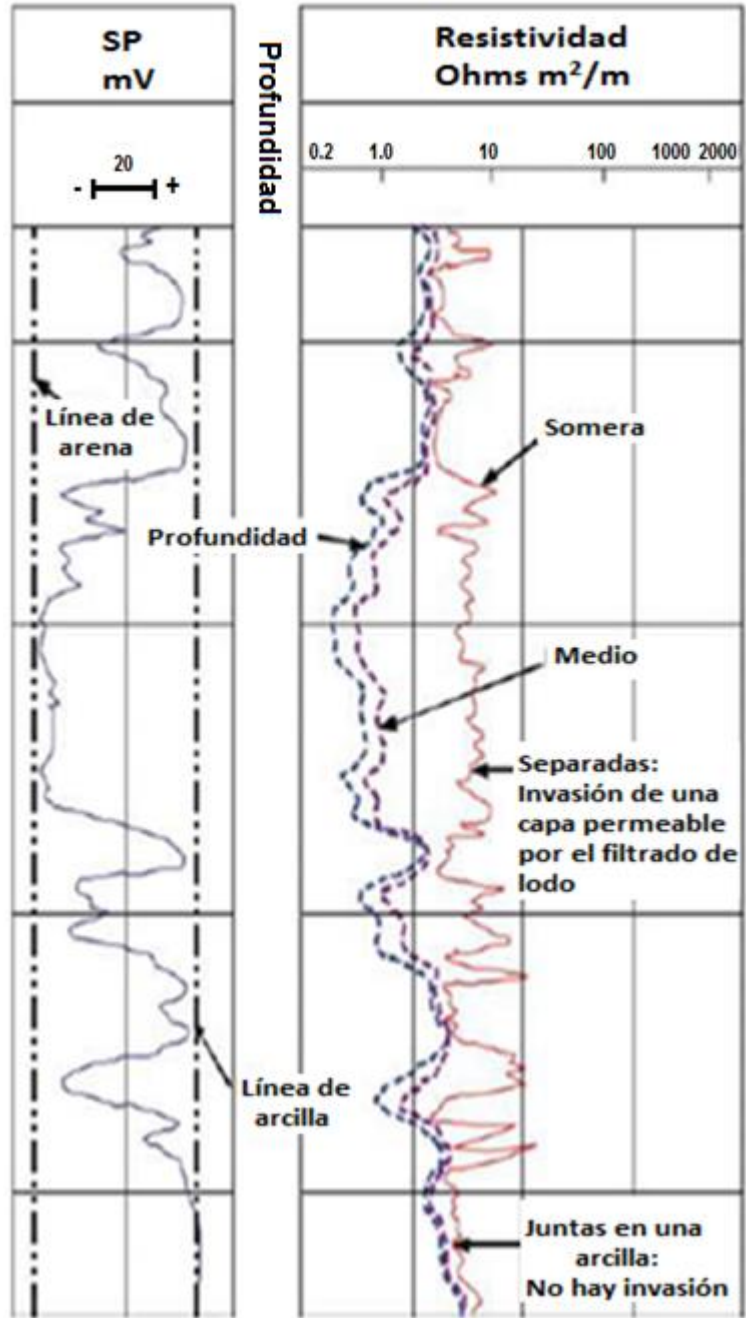


Figura 3.2 Ejemplo de un registro de SP en una serie de lutitas y areniscas

En el registro SP se genera una deflexión menor en la curva frente a una arena delgada que frente a una arena gruesa, debido a que el área transversal disponible para el flujo de corriente será menor en la arena delgada (Figura 3.3).

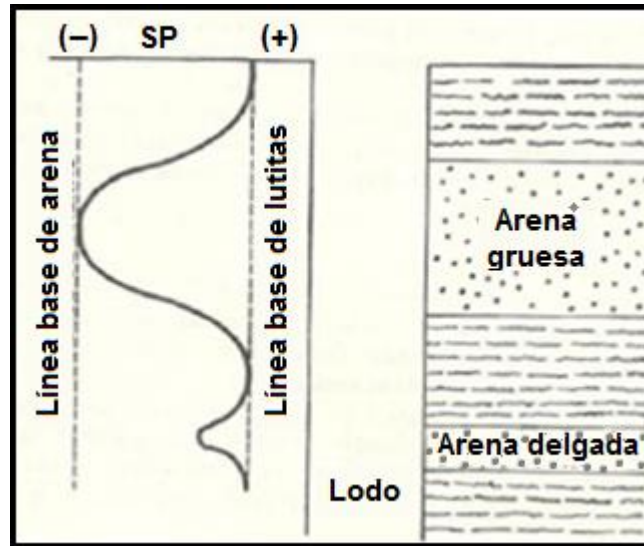


Figura 3.3 Comparación del SP en arenas gruesas y delgadas

3.3 Registro eléctrico

El registro eléctrico está compuesto por electrodos de corriente y electrodos de potencial, los cuales están colocados con determinado espaciamiento en la sonda. El espaciamiento de los electrodos proporciona la profundidad de penetración de la corriente dentro de la formación.

La resistividad se mide tanto en la zona lavada por el lodo de perforación, la zona de transición y la zona no invadida.

Las mediciones de la resistividad junto con la porosidad y la resistividad del agua de formación se usan para deducir o determinar la saturación del agua de formación dentro de los poros. La saturación obtenida entre la zona cercana al pozo y la zona virgen se comparan para evaluar la productividad de la formación.

La resistividad de una formación pura, saturada con agua, es proporcional a la resistividad del agua con la que se encuentra saturada.

$$R_o \propto R_w \quad (27)$$

$$R_o = F * R_w \quad (28)$$

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (29)$$

Donde:

R_o = Resistividad de la roca saturada con agua

R_w = Resistividad del agua de formación

F= Factor de formación

La resistividad de la formación depende del fluido con que está saturado y del tipo de minerales con que está constituido el cuerpo sólido de la roca

Para medir la resistividad de la formación, cuando la resistividad es baja del orden de 500 Ω -m, por lo general es preferible usar la herramienta de inducción. Cuando las resistividades son mayores es preferible usar la herramienta de doble laterolog, ya que proporciona información más confiable.

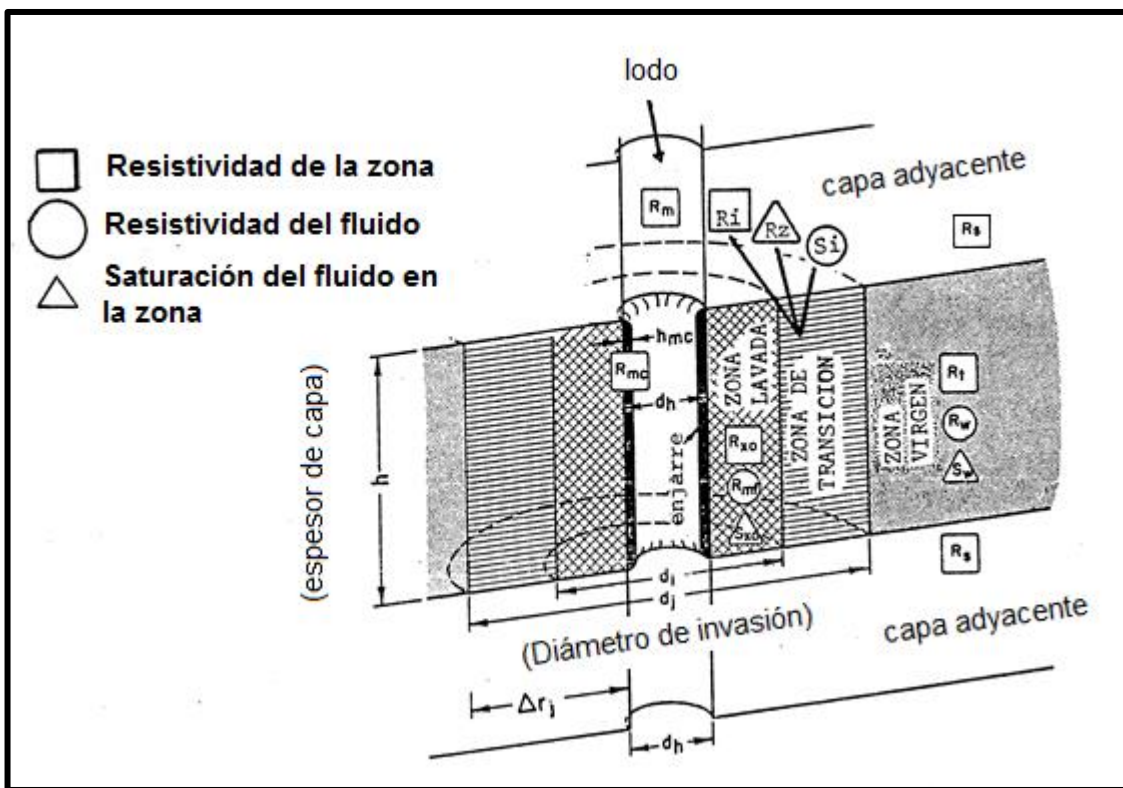


Figura 3.4 Representación esquemática de la zona lavada, zona de transición y zona virgen alrededor del pozo

Doble inducción fasorial

Principales aplicaciones de la herramienta.

1. Interpretación de formaciones con diámetro grande de invasión.
2. Formaciones con contrastes medios-altos de resistividades.
3. Gráficos de invasión
4. Pozos con lodos no conductivos

Doble Laterolog telemétrico

Aplicaciones principales

1. Resistividad en la zona virgen y en la zona lavada
2. Perfiles de invasión
3. Correlación
4. Detección de vista rápida de hidrocarburos
5. Control de profundidad
6. Indicador de hidrocarburos móviles

Microesférico Enfocado

Principales aplicaciones:

1. Resistividad de la zona lavada
2. Localización de los poros y zonas permeables
3. Indicador de hidrocarburo móvil
4. Calibrador

3.4 Registros radioactivos

Las herramientas nucleares pueden obtener de forma indirecta la porosidad de la formación, esta información se puede cotejar con la porosidad obtenida de igual forma indirectamente con herramientas acústicas.

Las herramientas nucleares utilizan fuentes de radiación y se tienen de tres tipos de ellas, de Radiación Natural, Neutrones y Rayos Gamma.

Las herramientas para medir la radiación natural no necesitan una fuente de emisión radioactiva, ellas captan la radiación natural proveniente de la formación, con esta información se puede conocer o determinar la arcillosidad y la presencia de minerales radioactivos

Las herramientas de neutrón compensado y rayos gamma necesitan una fuente radioactiva que emiten neutrones rápidos y rayos gamma de alta energía, respectivamente. La forma de interactuar de estas partículas con los elementos de la formación y la respuesta de la

formación ante este impulso arroja información acerca de los elementos que componen la formación misma.

La forma diferente en que reacciona la formación ante diferente estímulo resulta de suma utilidad en la comparación de las respuestas para detectar zonas con gas, arcillas, entre otros aspectos.

Neutrón compensado

Principales aplicaciones

1. Determinación de la porosidad
2. Identificación de litología
3. Análisis del contenido de arcilla
4. Detección de gas

Litodensidad compensada

Principales aplicaciones.

1. Análisis de porosidad
2. Determinación de litología
3. Calibrador
4. Identificador de presiones anormales

Rayos gamma naturales

Aplicaciones principales

1. Indicador de arcillosidad
2. Correlación
3. Detección de marcas o trazadores radioactivos

Espectroscopia de rayos gamma

Aplicaciones Principales

1. Análisis del tipo de arcilla
2. Detección de minerales pesados
3. Contenido de potasio en evaporitas
4. Correlación entre pozos

3.5 Registros acústicos

Estas herramientas miden el tiempo de tránsito de una señal acústica audible generada desde un transmisor para propagarse a través del lodo de perforación, la pared de la formación, devuelta a través del lodo hacia un arreglo de receptores que van a captar la señal transmitida por la fuente. Este tiempo equivale al tiempo de viaje acumulado a través

de diversos medios atravesados. La velocidad de la onda acústica es la velocidad del sonido que atraviesa las formaciones que están en contraposición de los receptores que la captan.

El sonido es una forma de energía que se propaga en ondas de naturaleza mecánica (Figura 3.5). Este movimiento es vibratorio debido a que las moléculas conservan un lugar promedio, cada molécula transfiere su energía, empujando a la siguiente molécula antes de regresar a su posición original. Cuando una molécula transfiere su energía a otra su espaciamiento con esta es mínimo, en contraposición con el espaciamiento entre la molécula que a su vez le transfirió su energía a ella y que ha vuelto a su posición original. Las áreas de distancias mínimas entre las moléculas se llaman áreas de compresión y las áreas de mayor distancia se llaman áreas de rarefacción. En un impulso de sonido se mostrará un área de compresión seguida de un área de rarefacción.

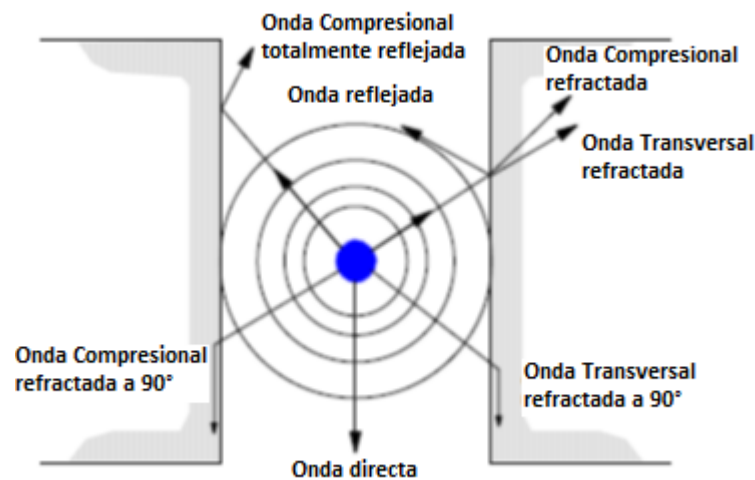


Figura 3.5 Transmisión de la energía acústica

Las ondas acústicas se pueden propagar de distintos modos a través de los medios sólidos, como las ondas de compresión y ondas de corte los cuales poseen distintas velocidades, además de éstos se pueden encontrar otros modos de propagarse como onda de Rayleigh, de lodo y de Stoneley.

Las ondas de Rayleigh son ondas dispersivas dependientes de la frecuencia, que se desplazan a lo largo de la superficie del pozo.

Las herramientas sónicas miden el tiempo que requiere un pulso acústico de sonido para viajar desde un transmisor hasta un arreglo de receptores. La onda acústica impacta el pozo, viaja a través de la formación y luego vuelve a arribar a la herramienta en la que los receptores miden la amplitud de la señal contra el tiempo. A medida que la onda acústica atraviesa la roca, se generan diferentes tipos de onda (Figura 3.6). Los primeros arribos corresponden a las ondas compresionales, u ondas P, seguidas de las ondas de corte, u ondas S. Estas dos son las más importantes porque se utilizan para computar la porosidad y las propiedades mecánicas. Las ondas de Rayleigh, de lodo y Stoneley arriban más tarde.

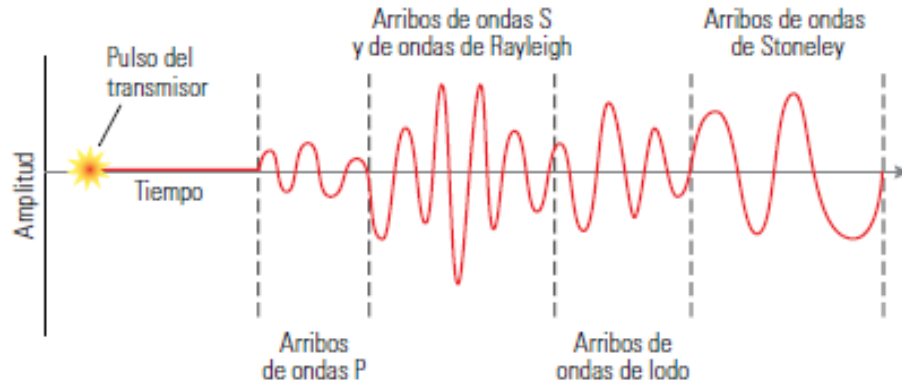


Figura 3.6 Ondas acústicas

Las herramientas sónicas monopolares generan un pulso de energía que impacta la formación, y luego se propaga a lo largo del pozo como una onda cónica compresional (Figura 3.7). En las formaciones duras o rápidas (*parte superior izquierda*), la onda compresional (P) genera ondas de corte (S), que arriban más tarde en el tiempo que las ondas compresionales (P) (*parte inferior izquierdo*). Las formaciones blandas o lentas, (*parte superior derecha*) sustentan las ondas de corte, pero éstas se refractan en la formación y pueden no arribar a los receptores (*parte inferior derecha*). Las ondas Stoneley (*verde*) arriban más tarde en el tiempo que las ondas P y S.

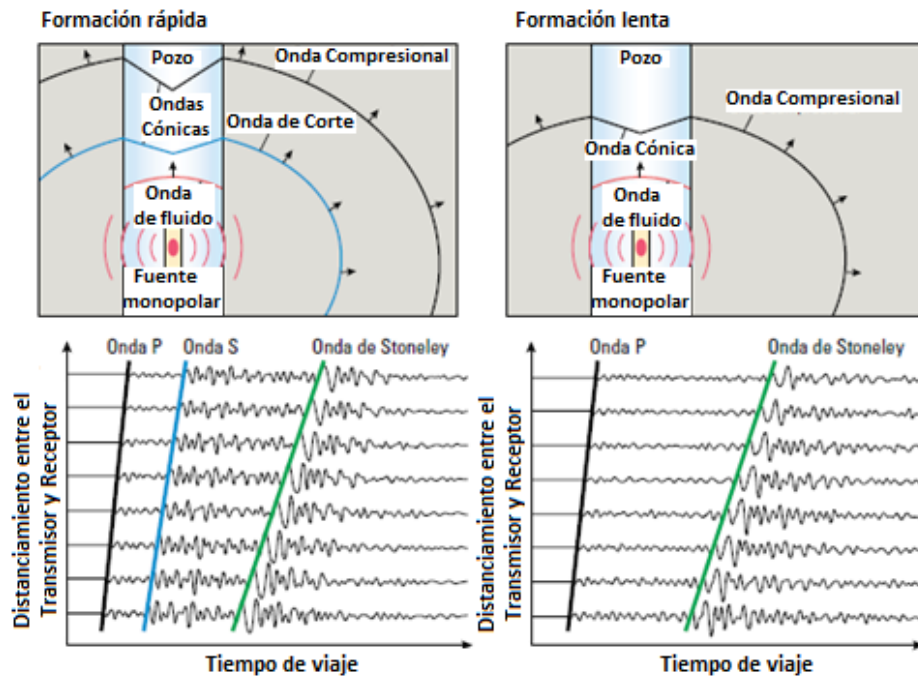


Figura 3.7 Ondas acústicas de fuentes monopolares

Las ondas compresionales viajan a través de la arenisca de porosidad nula con una velocidad aproximada de 182 [$\mu\text{s}/\text{m}$], y a través de la caliza con una velocidad aproximada de 155 [$\mu\text{s}/\text{m}$].

A continuación, se muestra una comparación de las velocidades de propagación de distintos materiales.

Material	Lentitud de ondas compresionales Δt_c $\mu\text{s}/\text{m}$ [$\mu\text{s}/\text{ft}$]	Lentitud de ondas de corte Δt_s $\mu\text{s}/\text{m}$ [$\mu\text{s}/\text{ft}$]
Acero	187 [57]	338 [103]
Arenisca	182 [55.5]	289 [88]
Caliza	155 [43.7]	290 [88.4]
Dolomía	143 [43.5]	236 [172]
Lutita	200 a 300 [61 a 91]	Varía
Agua dulce	715 [218]	No corresponde
Salmuera	620 [189]	No corresponde

Tabla 3.2 Valores característicos de la lentitud de ondas compresionales (Δt_c) y de corte (Δt_s)

Las ondas compresionales que viajan a través de formaciones que contienen agua, petróleo y/o gas, tienen tiempos de tránsito más largos que las que atraviesan rocas muy poco porosas y con poca cantidad de fluido. El cambio del tiempo de tránsito está relacionado con el fluido que satura el espacio poroso y que está en función de la porosidad.

El tiempo total que requiere un impulso para llegar a los receptores a través de la roca es proporcional a la cantidad de matriz y a la cantidad de fluido en el espacio poroso de la roca. La ecuación que relaciona la medición del tiempo de tránsito con la porosidad se muestra a continuación.

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (30)$$

Donde:

ϕ =porosidad (%)

Δt = tiempo de tránsito medido por la herramienta

Δt_{ma} = tiempo de tránsito de la matriz

Δt_f = tiempo de tránsito del fluido

Los dos últimos dependen del tipo de roca y del tipo de fluido y son valores conocidos.

Sónico digital

Principales aplicaciones

1. Correlación de datos sísmicos
2. Sismogramas sintéticos
3. Determinación de porosidad primaria y porosidad secundaria
4. Detección de gas
5. Detección de fracturas
6. Características mecánicas de la roca
7. Estabilidad de agujero
8. Registro sónico de cemento

3.6 Registros de imagen

Los registros de imagen miden las propiedades de resistividad eléctrica o bien el tiempo de tránsito y la reflectancia acústica y convierten esta información en imágenes a color los 360° del pozo.

Las imágenes de la pared del pozo ayudan a definir y caracterizar las facies y procesos diagenéticos, la posición estructural del yacimiento y a definir características como pliegues y fallas y proporcionan información detallada para el análisis de las paleocorrientes.

Se identifican dos grandes grupos de registros de imagen: Los registros eléctricos de imagen y los registros acústicos de imagen.

Registro de imagen resistivos

Principales aplicaciones:

1. Interpretación de límites estructurales
2. Zonificación estructural por análisis de buzamiento
3. Determinación de fallas
4. Caracterización y descripción de las fracturas y cavidades y su distribución
5. Integración del análisis de Curvatura con los registros y datos sísmicos
6. Análisis del régimen de esfuerzos y parámetros geomecánicos
7. Determinación del espesor de arena neta
8. Evaluación de la porosidad secundaria
9. Determinación de la textura y estructura interna de la matriz diagenética en yacimientos carbonatados

Registros de imagen acústicos

Principales aplicaciones:

1. Intervalos y orientación de las fracturas
2. Cambios en la porosidad de la roca

3. Identificación de litofacies
4. Ubicación de estratos delgados
5. Análisis estructural
6. Orientación de esfuerzos locales in situ

3.7 Registro de resonancia magnética nuclear

Los registros de RMN miden los momentos magnéticos de los núcleos de hidrógeno (protones) en el agua y en los hidrocarburos. Los protones tienen solo una carga eléctrica, y su spin crea un momento magnético débil. El principio de medición está basado en excitar magnéticamente los núcleos de hidrógeno y analizar las señales que éstos emiten. La amplitud de las señales será proporcional a la cantidad de núcleos de hidrógeno presentes en la zona medida.

Las herramientas de adquisición de registros usan potentes imanes permanentes para crear un fuerte campo de polarización magnética estático dentro de la formación, una antena que rodea los imanes emite energía de radiofrecuencia de amplitud, frecuencia y duración en lapsos controlados hacia la formación. Un tiempo de relajación longitudinal T_1 , describe con qué rapidez se alinean o polarizan los núcleos en el campo magnético estático. La polarización completa de los protones de los fluidos que ocupan los poros lleva varios segundos y puede completarse mientras la herramienta está en movimiento, pero los núcleos deben estar expuestos al campo magnético durante la medición.

Los protones alineados se inclinan para formar un plano perpendicular al campo magnético estático, estos protones inclinados tienen un tiempo de precesión en torno a la dirección del fuerte campo magnético inducido. En su movimiento de precesión los protones crean campos magnéticos oscilantes que generan una señal débil pero medible. Sin embargo, esta señal decae rápidamente y tienen que ser regenerada mediante la aplicación reiterada de una secuencia de pulsos de radiofrecuencia. Los protones responden emitiendo pulsos de ondas electromagnéticas de la misma frecuencia que la antena emisora, las que se denominan *ecos de spin*. Durante el tiempo entre pulsaciones la antena se usa para escuchar la señal de eco decadente de los protones de hidrógeno que están en resonancia con el campo magnético de los imanes. La velocidad a la cual la precesión de los protones decae o pierde su alineación se denomina tiempo de relajación transversal T_2 .

Existe una relación directa entre T_1 y el tamaño creciente de los poros e inversa respecto a la viscosidad de los fluidos de la formación.

Los procesos T_1 y T_2 son afectados predominantemente por la interacción molecular de un fluido de poro y por la interacción de los fluidos que ocupan los poros con las superficies granulares de la matriz de roca, que se conocen como características de relajación de superficie. Tanto las mediciones de T_1 como las de T_2 muestran un proceso de evolución temporal exponencial. Las mediciones T_1 un crecimiento exponencial y las de T_2 u decaimiento exponencial.

Debido a que existen diferencias en tiempos de relajamiento y/o difusividad entre los fluidos, los datos se pueden usar para distinguir agua asociada con la arcilla, agua capilar, agua movable, gas, petrolero ligero, petróleo viscoso, además de dar información acerca del tamaño de poro, cavidades, fracturas y tamaño de granos.

Principales aplicaciones:

El uso de esta herramienta permite obtener

1. Mediciones de la porosidad independiente de la mineralogía,
2. Volumen de fluido atrapado
3. Volumen de fluido libre
4. Permeabilidad
5. Detección de hidrocarburos
6. Distribuciones de T_2

3.8 Correlación de registros de pozo

La selección de las combinaciones de registros depende de una variedad de factores entre los que se encuentran el sistema de lodo, tipo de formación, conocimiento previo del yacimiento, tamaño del agujero y desviación, tipo de información deseada. Son típicamente los pozos exploratorios los que requieren un programa integral de registros, en cambio los pozos de relleno y desarrollo pueden requerir solamente servicios básicos.

Los registros geofísicos tienen dos aplicaciones primordiales:

1. Elaborar correlaciones y estudios estratigráficos
2. Evaluar la litología y los fluidos de la formación.

La correlación de registros entre pozos consiste en establecer comparaciones entre los patrones de comportamiento de las curvas en los registros para un punto o zona específica del pozo registrado con el fin de establecer la continuidad, espesor, y movimientos estructurales de las diferentes formaciones de interés a lo largo y ancho de la estructura en exploración y explotación. Las curvas más utilizadas en los procesos de correlación entre pozos y la generación de secciones estructurales son los registros de rayos gamma y microresistividad.

El uso combinado de las diferentes curvas generadas en el proceso de registro de un pozo y su correlación entre los diferentes pozos perforados en un yacimiento hace posible definir los límites de extensión de un yacimiento y de las diferentes formaciones en la columna estratigráfica y generar modelos geológicos para el yacimiento, para usar en etapas futuras de explotación en un campo.

Al correlacionar los registros entre pozos, los geólogos primero identifican en la sección registrada de la columna estratigráfica patrones característicos también conocidos como

marcadores que son de fácil identificación y luego buscan su correspondencia entre los diferentes pozos para cada dirección específica de análisis.

El proceso de correlación de registros entre pozos se inicia con la selección de un “*datum*”, o marcador, el cual puede ser ubicado y distinguido a través de todos los puntos de observación, pozos en el campo y/o yacimiento. En general, un buen *datum* lo constituyen las lutitas, ya que aparecen sobre extensas zonas por encima y/o por debajo de las formaciones de interés, además, las lutitas son depósitos de baja energía que han sido depositadas en su mayoría en forma horizontal constituyéndose en un plano de estratificación.

Una vez seleccionado el *datum* se eligen en el mapa del campo pozos representativos para la interpretación de la estratigrafía del área y con ellos se orienta la línea del corte o dirección en la cual se haría la correlación. Esta línea es la representación de una sección vertical, donde se proyectarán los pozos. Luego, en la sección se colocan con su distancia a escala las curvas o registros de los pozos elegidos, y se relacionan a partir de la línea de referencia o *datum*. Estas secciones destacan las diferencias en distancia vertical y espesor para las formaciones por encima y por debajo del plano de referencia o *datum* utilizado.

3.9 Núcleos

Los núcleos de perforación son muestras cilíndricas representativas de la formación perforada tomadas con el objetivo de realizar en ellos estudios de diversos tipos para que la caracterización de un yacimiento sea más precisa y arroje mejores predicciones de producción. Estos estudios pueden ser de tipo: paleontológicos, estratigráficos, petrográficos, geoquímicos, saturación de fluidos, porosidad y permeabilidad, etc.

Los núcleos son cortados con una herramienta especial llamado barril muestreador, conectado a una corona de diamantes en la parte inferior de la sarta de perforación en lugar de la barrena. El barril se divide en barril exterior e interior, éste último es en donde se aloja el núcleo de roca cortado para posteriormente ser obtenido en superficie a través de la tubería.

Los núcleos sirven para:

- Delimitar la petrofísica de formaciones
- Obtener datos paleontológicos
- Correlacionar edades y medios sedimentarios
- Obtener datos y patrones estratigráficos
- Evaluar el contenido de fluidos de una formación y propiedades petrofísicas.

Al recuperar un núcleo, lo primero que se debe hacer es orientar, medir y marcar longitudinalmente con dos líneas paralelas a lo largo del mismo (Figura 3.8). Una línea de color negro a la izquierda y otra de color rojo a la derecha hacen referencia a la posición vertical con su base hacia abajo, posteriormente el núcleo es cortado en tramos de un

metro y se escribe en cada sección el nombre del pozo, número de núcleo, número de tramo, intervalo en metros se marca la parte superior y la parte inferior de cada extremo de cada sección del núcleo.

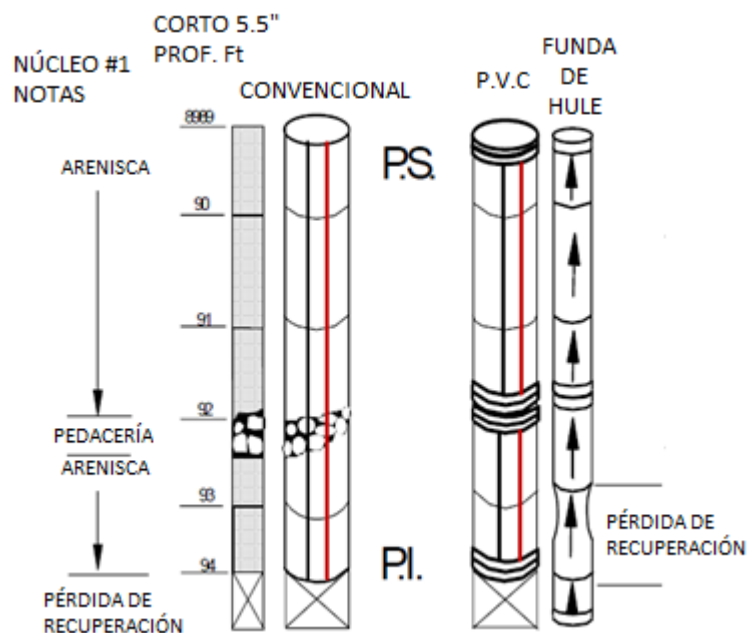


Figura 3.8 Registro y marcado en la recuperación de núcleos

Las características que se deben analizar en una descripción de núcleo son:

1. Porcentaje de recuperación total del núcleo cortado y se determina en %
2. Petrofísica, geoquímica, entre otros estudios, mediante el envío del núcleo al laboratorio de micropaleontología
3. Litología general de las partes inferior, media y superior del núcleo; buscando porosidad, impregnación de hidrocarburos, macrofauna y otras características
4. Análisis de gas, salinidad, solubilidad y fluorescencia
5. Búsqueda e identificación de contenido faunístico, minerales, procesos diagenéticos entre otras características, mediante muestreo y corte de láminas delgadas a los cortes del núcleo
6. Tipo de roca y su ambiente de depósito

Algunas pruebas realizadas en los núcleos son las siguientes:

1. Porosimetría por inyección de mercurio: proporciona una evaluación cualitativa de la estructura de la garganta de poro
2. Mediciones de presión capilar: proporciona las curvas de presión capilar de aire-salmuera o aceite-salmuera para la evaluación de saturaciones de hidrocarburo dentro yacimiento
3. Evaluación de la mojabilidad: Proporciona una evaluación de la mojabilidad del núcleo al agua y al aceite y diferencia entre mojabilidades mixtas y neutrales

4. Parámetros de la resistividad de la formación (a, m, n): estos parámetros son únicos para un yacimiento y permite la evaluación precisa de los registros eléctricos para la determinación de la saturación de agua
5. Parámetros de permeabilidad relativa: son medidos a condiciones de presión y temperatura del yacimiento y son necesarios en las simulaciones de producción de aceite e inyección de fluidos dentro yacimiento
6. Pruebas de recuperación de la permeabilidad líquida: Proporciona una evaluación de cualquier efecto perjudicial al exponer un yacimiento a fluidos extraños, como el lodo de perforación, fluidos de terminación y/o reparación, agua u otros fluidos inyectados al yacimiento
7. Pruebas de pérdida de lodo de perforación: Proporciona una evaluación de la pérdida de lodo y daño a la formación en sistemas de lodo propuesto para aplicaciones de perforación horizontal

A partir de estos análisis se obtiene un conjunto de datos que son usados por ingenieros petroleros, geólogos y geofísicos en la evaluación del yacimiento en estudio como son:

- Litología
- Porosidad
- Permeabilidad
- Saturación de aceite, gas y agua
- Interfaces aceite/agua, aceite/gas
- Rumbo y echado de las capas
- Propiedades mecánicas de las rocas

La correlación de los datos obtenidos mediante el análisis a núcleos en laboratorio y los datos obtenidos mediante la toma e interpretación de registros geofísicos es pieza clave en la correcta evaluación de un yacimiento petrolero.

4 Secuencia Carbonatada de la Península de Yucatán

La provincia petrolera de la Península de Yucatán se encuentra al sureste de México siendo gran parte de esta provincia territorio marino. En la parte terrestre ocupa espacio de los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tabasco (Figura 4.1).

La plataforma está limitada del Golfo Profundo por el escarpe de Campeche que es un talud continental que va desde el oeste al norte de la plataforma, por el lado oriental hacia el mar caribe la plataforma presenta fallamiento, en el sur limita con bloques de basamentos levantados, el domo los Cuchumatanes en Guatemala y las montañas mayas en Belice y al suroeste limita con la Provincia petrolera Cinturón Plegado de Chiapas y Las provincias Geológicas de la Cuenca Macuspana y el Pilar Reforma Akal.

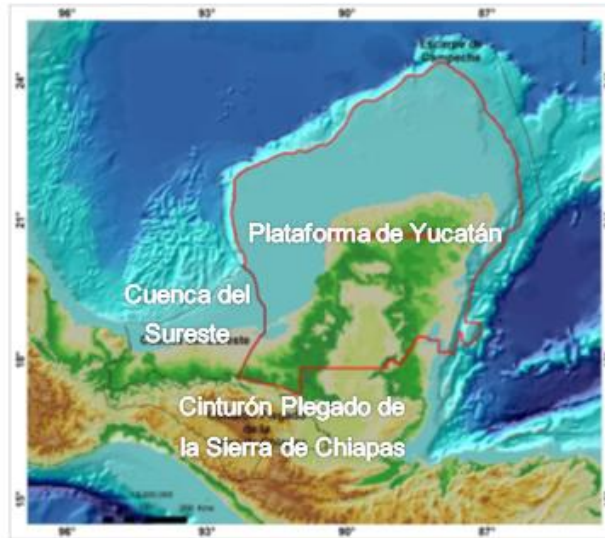


Figura 4.1 Provincia petrolera Plataforma de Yucatán

La sedimentación carbonatada de más de 4.5 kilómetros de espesor, corresponde a rasgos tectónicos sutiles asociados a zonas cratónicas (poco deformadas). La columna sedimentaria inicia con un paquete de calizas y evaporitas de espesor variable de edad Jurásico Tardío de hasta 1,000 metros de espesor (Figura 4.2), sobre esta secuencia reposan rocas carbonatadas de plataforma y evaporitas de edad Cretácico Temprano-Oligoceno, con múltiples ciclos de facies transgresivas que se acuñan contra un borde de plataforma agrandante.

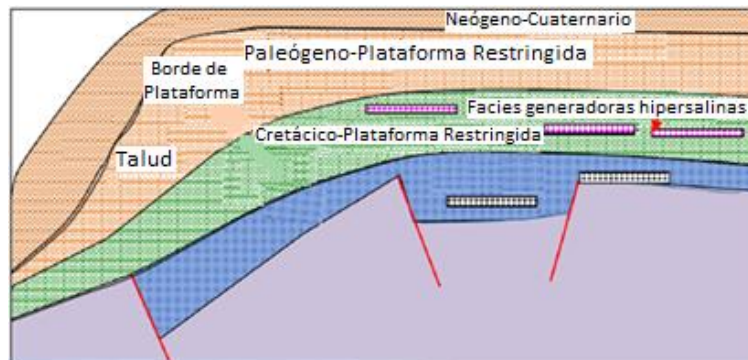


Figura 4.2 Modelo esquemático sedimentario de la Plataforma de Yucatán

Las facies sedimentarias se presentan en forma horizontal con flexuras locales tenues que corresponden a la propagación vertical de fallas profundas. Se trata de una provincia fisiográfica que carece de red fluvial, donde el escurrimiento es casi totalmente subterráneo, dando lugar a la creación de cenotes y sistemas de cuevas con cientos de metros de profundidad y decenas de kilómetros de longitud.

Hacia el norte de la Península de Yucatán la columna del paleógeno conserva su espesor, pero la columna del Cretácico Superior se engrosa hacia el norte y la del Cretácico Medio e Inferior parece conservar su espesor (Figura 4.3).

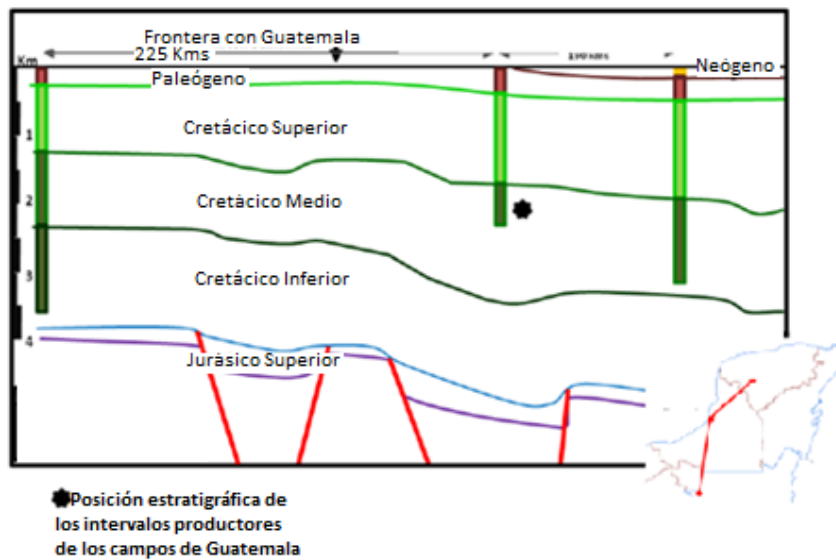


Figura 4.3 Sección geológica esquemática en la Plataforma de Yucatán

Las secuencias de rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas presentan un grosor de más de 3,500 [m] y descansan sobre un basamento paleozoico y por encima tienen una columna de rocas jurásicas. El cretácico forma parte de toda la plataforma.

El espesor de la formación llamada Evaporitas de Yucatán demuestra que estas tuvieron su origen en dos cuencas principales. La primera en el sur de la Península y con extensión hacia Guatemala, donde el grosor de más de 2,000 [m] refleja una zona de prolongada subsidencia que se reduce gradualmente hacia el norte, con un espesor de 1,000 [m] hacia el centro de la Península y menor a 500 [m] en el oriente de esta.

La secuencia de rocas pelágicas se encuentra en todo el subsuelo y consiste principalmente de calizas, areniscas y evaporitas del Paleógeno y del Eoceno. El Oligoceno está ausente, excepto en la parte nororiental, compuesto de calizas y lutitas, donde se reconocen los depósitos marinos de Neógeno y las calizas de la Formación Carrillo Puerto. Durante el Mioceno fueron depositados los sedimentos calcáreos de la Formación Río Dulce, en el oriente (Figura 4.4).

Del Barremiano al Aptiano inferior se presentan tres facies marinas:

1. Somera, con depósitos carbonatados y anhidrita de plataforma interna restringida. Base de la Formación Cobán.
2. Somera, con depósito carbonatado de plataforma interna a plataforma externa.
3. Depósitos de plataforma externa a borde de la plataforma.

COLUMNA GEOLÓGICA				PENÍNSULA DE YUCATÁN		
ERA	PERIODO	ÉPOCA	EDAD	NOMBRES FORMACIONALES		
C E N O Z O I C O	QUATERNARIO	HOLOCENO	VERCILIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL		
		PLEISTOCENO	CALABRIANO			
	T E R C I A R I O	PLIOCENO	SUPERIOR	PIACENZIANO	BACALAR ESTERO FRANCO CARRILLO PUERTO	
			INFERIOR	ZANCLEANO		
		MIOCENO	SUPERIOR	MESSINIANO TORTONIANO		SIN NOMBRE FORMACIONAL
			MEDIO	SERRAVALLIANO LANGHIANO		
			INFERIOR	BURDIGALIANO AQUITANIANO		
			OLIGOCENO	SUPERIOR	CHATTIANO	
		EOCENO	MEDIO	RUPELIANO	CHICHÉN ITZÁ	
			INFERIOR	PRIABONIANO BARTONIANO LUTECIANO YPRESIANO		
			PALEOCENO	SUPERIOR		THANETIANO
		M E S O Z O I C O	C R E T Á C I C O	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO	COBÁN
					CAMPANIANO	
					SANTONIANO CONIACIANO TURONIANO	
				MEDIO	CENOMANIANO	
	INFERIOR			ALBIANO		
	J U R Á S I C O		SUPERIOR	APTIANO BARREMIANO HAUTERVIANO VALANGINIANO BARRIASIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL	
TITONIANO						
KIMMERDGIANO						
MEDIO			OXFORDIANO CALLOVIANO BATHONIANO BAJOCIANO AALENIANO			
INFERIOR			TOARCIANO PLEINSBACHIANO SINEMURIANO HETTANGIANO			
TRIÁSICO			LECHOS ROJOS			
PALEO- ZOICO	PÉRMICO			BASAMENTO		
	CARBONÍFERO					
	DEVÓNICO					

Figura 4.4 Columna estratigráfica de la Plataforma de Yucatán

Para el Cretácico Medio se depositaron anhidritas con dolomías y calizas en un ambiente somero en la Formación Cobán. Principalmente presenta parches arrecifales de ruditas desarrollados principalmente en la parte norte de la plataforma. En este tiempo se establece el límite de la provincia geológica Escarpe de Campeche en la posición del actual margen de la plataforma.

El Cretácico Superior consiste en intercalaciones entre calizas, dolomías y anhidritas de la formación Cobán. Estos depósitos de ambientes marinos someros en el oeste cambian a conglomerados marinos y en el este a rocas carbonatadas marinas pelágicas profundas. Estos cambios a ambiente marinos profundos se atribuye al inicio del fallamiento en bloques a lo largo de la zona Rio Hondo provocado por el desplazamiento de la Placa del Caribe.

En la transición Cretácico Superior-Paleoceno hacia el talud occidental, en la Cuenca del Sureste, se depositó una secuencia de brechas dolomitizadas donde se tiene el área más prolífica en producción de hidrocarburos. Estas brechas fueron cubiertas por lutitas de ambientes marinos profundos del Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno-Plioceno.

Para el Paleógeno las rocas de formación Icaiche y Chichen Itzá consisten en calizas, dolomías y magras que contienen microfósiles de ambientes marinos someros. Estas unidades afloran en la Península de Yucatán (Figura 4.5). Los depósitos del Oligoceno son calizas cretosas, con nódulos de pedernal negro intercalados con lutitas, magras y calcarenitas de la plataforma. El mioceno Inferior son magras con intercalaciones de caliza de plataforma. Para Mioceno Medio-Pleistoceno de la formación Carrillo Puerto son calizas cretosas que afloran en la porción norte y este de la Península.

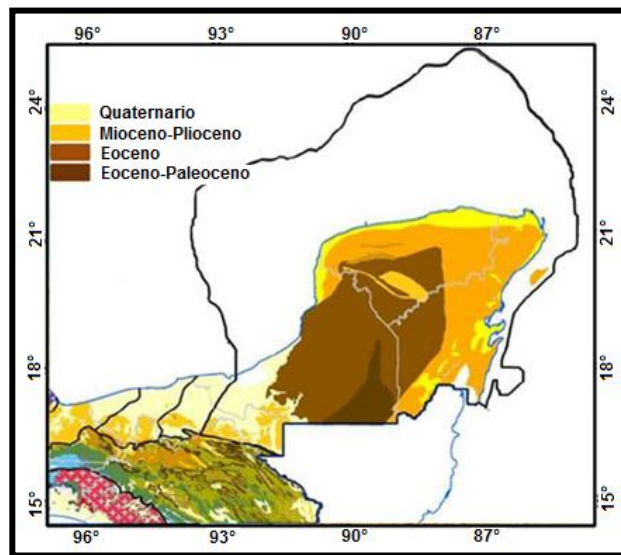


Figura 4.5 Mapa de afloramientos del Paleoceno, Eoceno y Oligoceno

La Península de Yucatán muestra dos unidades morfológicas principales: la primera está ubicada al norte y en ella predominan las planicies y las rocas sedimentarias Neogénicas y al sur las planicies alternan con lomeríos de hasta 400 metros sobre el nivel del mar en rocas sedimentarias Oligocénicas.

La provincia petrolera de la Plataforma de Yucatán cuenta con una extensión aproximada de 130,000 km en los cuales la información de estudios geológicos-geofísicos de 24 pozos, de los cuales ninguno ha resultado productor, no ha podido determinar un sistema petrolero activo y se ha clasificado como especulativo. Se ha estimado un recurso prospectivo de 300 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (Tabla 4.1)

Provincia Petrolera	Recurso prospectivo en mmmbpce a 2010
Sabinas	0.3
Burgos	3.0
Tampico Misantla	1.7
Veracruz	0.7
Sureste	15.0
Golfo de México profundo	29.5
Plataforma de Yucatán	0.3
Total	50.5

Tabla 4.1 Recursos prospectivos de las provincias petroleras en México (Libro de reserva de hidrocarburos Pemex 2010)

Basados en información de pozos en Guatemala y Belice y los pozos del sureste de México las rocas generadoras son del Cretácico Temprano-Medio, dentro de la secuencia de calizas y dolomías de la Formación Cobán. Estudios de tipificación de la materia orgánica en fragmentos de núcleos ha identificado materia orgánica algácea y lignocelulósica y bitúmenes sólidos tipo epimsonita y gilsonita en fracturas y estilolitas (Figura 4.6).

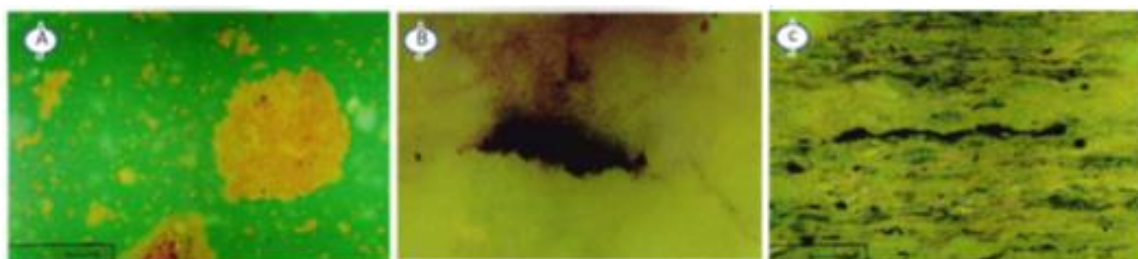


Figura 4.6 Identificación de materia orgánica en Yucatán: a) Materia amorfa de color amarillo-naranja, b) presencia de asfalto en fracturas y c) laminación de algas y bitúmenes pesados

4.1 Sistema petrolero en la provincia petrolera de la Plataforma de Yucatán

La secuencia de eventos y elementos esenciales del sistema petrolero en la Provincia Petrolera de la Plataforma de Yucatán fue determinada con escasa información y considera que la generación inició hace 40 M.A. (Figura 4.7). Se espera que parte de estos hidrocarburos estén almacenados en trampas anteriormente formadas, algunas evidencias de generación de bitúmenes se han reconocido en los estudios de materia orgánica lo cual nos indican una incipiente madurez.

Roca almacén

Las rocas almacenadoras potenciales son las calizas y dolomías de la plataforma de edad Cretácico Inferior, Medio y Superior. Las dolomías presentan entre 10 y 12 % de porosidad.

Roca sello

El sello potencial corresponde a las intercalaciones de evaporitas intercaladas con calizas y dolomías en trampas cretácicas.

Trampa

Las trampas estructurales son sutiles debido a la poca deformación de la plataforma, pueden además existir trampas estratigráficas debido a la heterogeneidad de facies carbonatadas de plataforma y dolomías,

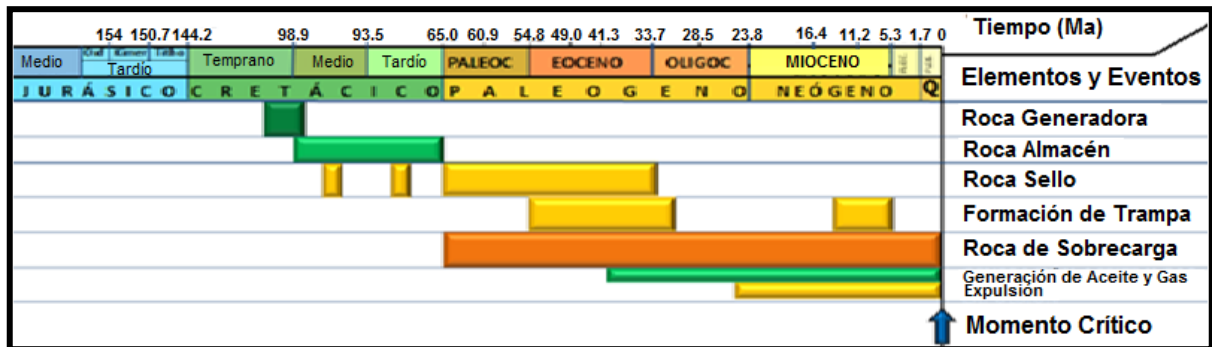


Figura 4.7 Diagrama de Eventos del Sistema Petrolero Cretácico Inferior - Cretácico Medio Superior

4.2 Cráter del Chicxulub

El Cráter del Chicxulub está localizado en el noreste de la Península de Yucatán, sepultado por una secuencia de rocas carbonatadas y evaporíticas del Mesozoico-Cenozoico, entre los 300 y 1100 metros de profundidad, la estructura tiene un diámetro aproximado de 180 a 200 kilómetros.

Es una cuenca multianillada con levantamiento central (Figura 4.8), donde se ha encontrado con la desaparición masiva del límite Cretácico-Terciario (K-T) a consecuencia

de la colisión del meteorito Chicxulub, de diámetro que se calcula de alrededor de 10 km, con la Tierra. Mediante un programa de Pemex en el que se perforaron 8 pozos exploratorios se encontraron ocurrencias inusuales de rocas cristalinas y brechas del Cretácico Superior pensándose que se encontraba con un campo volcánico (Figura 4.9).

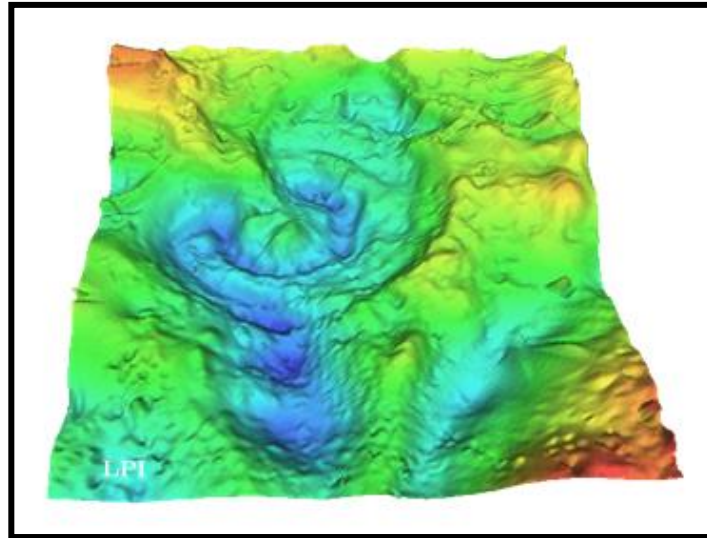


Figura 4.8 Anomalía gravimétrica del cráter Chicxulub, mostrando su estructura de multi-anillo (Sharpton et al., 1993)

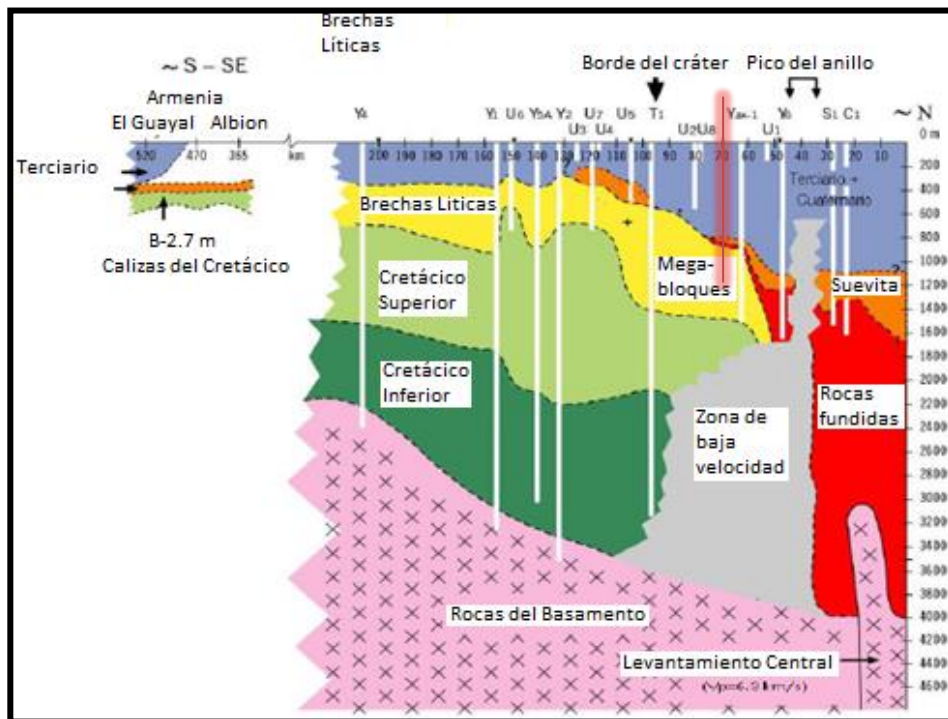


Figura 4.9 Sección litológica de la estructura de impacto del Cráter de Chicxulub Urrutia Fucugauchi 1996

El cráter se encuentra completamente sepultado por una secuencia de carbonatos y evaporitas de edad cretácica, de aproximadamente cuatro kilómetros. Estudios gravimétricos y magnéticos han mostrado anomalías en forma de anillos concéntricos a la cuenca de impacto (Figura 4.10).

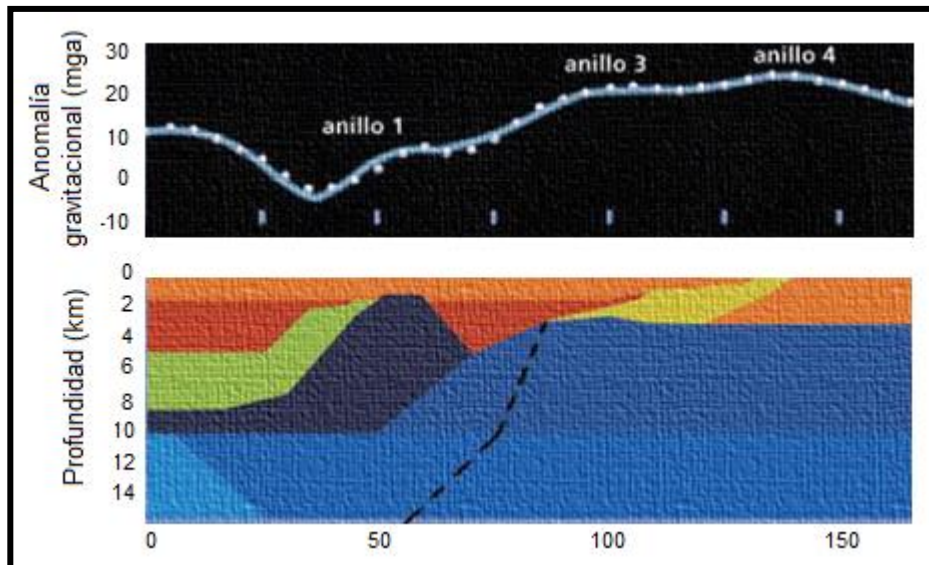


Figura 4.10 Modelo conceptual en dos dimensiones de la señal gravimétrica de un corte transversal, orientado este-oeste del cráter Chicxulub. (Sharpton et al., 1993)

En azul se representan las rocas sedimentarias preimpacto del Mesozoico; en rojo, amarillo, verde y azul oscuro, se muestran las rocas producto del impacto. En naranja se muestran las postimpacto que cubren el cráter. Los puntos representan los datos obtenidos en campo y la línea continua el comportamiento teórico del campo gravitacional.

Los datos y el modelo corresponden a un perfil orientado aproximadamente este-oeste y desplazado unos diez kilómetros al sur del cráter. Las principales unidades que conforman el cráter son:

1. Unidad fundida de impacto y brecha de impacto (rojo)
2. Unidad de brecha interna alógena (verde)
3. Basamento cristalino levantado y fracturado por el impacto (azul oscuro)
4. Brecha externa alógena
5. Sedimentos cretácicos de plataforma
6. Basamento cristalino
7. Basamento de profundidad intermedia (corteza intermedia)
8. Levantamiento central de basamento profundo
9. Secuencia carbonatada de Cenozoico.

La unidad fundida presenta una composición y texturas similares a una roca volcánica andesítica.

Una zona de anomalías gravimétricas limitada a la zona interna del primer anillo se caracteriza por un mínimo y un máximo orientado este-oeste estimándose una dirección promedio de magnetización remanente para la unidad fuente con una declinación de 90 grados de inclinación entre 0 y 30 grados.

4.3 Pozo Yaxcopoil-1

El pozo exploratorio Yaxcopoil-1 se localiza en el sector sur del cráter, dentro del anillo externo, en la *zona de terrazas* (Urrutia Fucugauchi, 2004) (Figura 4.11). Para localizar este sitio se realizaron estudios de geofísica que permitieron documentar la estructura del cráter y cubierta sedimentaria de esta zona. Además de los estudios geofísicos se contó con información de programas anteriores de perforación llevados a cabo por Petróleos Mexicanos y por la Universidad Nacional Autónoma de México.

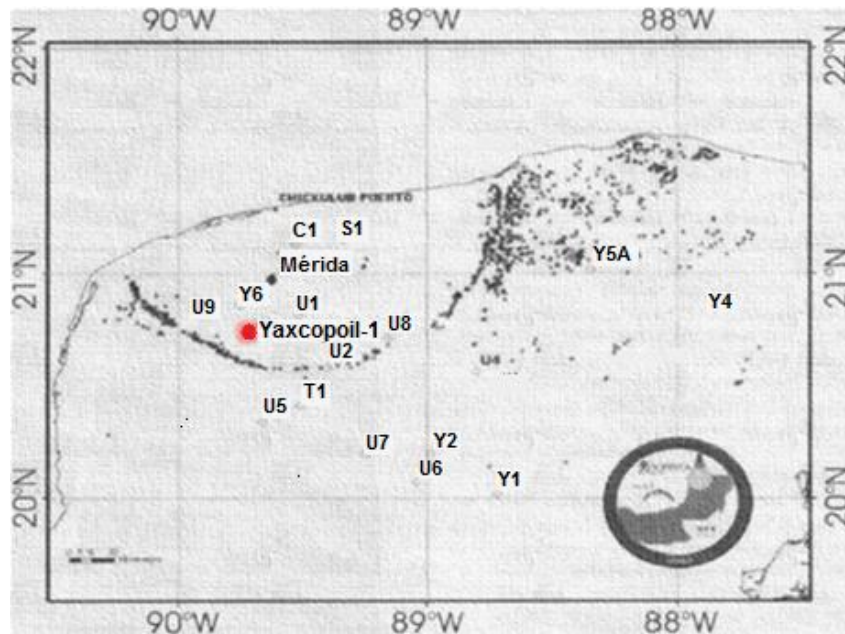


Figura 4.11 Localización del pozo Yaxcopoil-1

El pozo fue perforado por un sistema rotatorio desde la superficie hasta los 404 metros, a partir de lo cual se obtienen una recuperación continua desde esta profundidad hasta los 1,511 metros (Figura 4.12), la recuperación del núcleo fue de 98.5% (Figura 4.13).

El trabajo consistió en dos partes, la primera de ellas trato la descripción macroscópica de los núcleos de la secuencia calcárea depositada sobre el material de impacto, con el objetivo de dar a conocer posibles unidades y subunidades (Figura 4.14). En la segunda parte se llevó a cabo la descripción petrográfica de dichas facies para determinar un estudio geológico de los sedimentos post impacto del cráter.

Las técnicas convencionales de perforación rotativa se integraron con la tecnología de extracción de minería de cable que se aplicó para perforar el pozo a unos 40 km al suroeste de Mérida, Yucatán, México. Durante el transcurso del proyecto, se recuperaron aproximadamente 900 [m] de muestras de núcleo intactas, incluidas las transiciones de eyecciones retrabajadas a sedimentos posteriores al impacto y la de grandes bloques de material objetivo inclinado a rocas generadas por impacto, es decir, brechas de derretimiento por impacto (suevitas). El nucleado se complementó con mediciones geofísicas de cable para obtener un conjunto continuo de datos petrofísicos in situ de las paredes de los pozos. Los datos adquiridos se componen de contenidos de elementos radiactivos naturales, velocidades de ondas sonoras compresivas, así como valores de resistividad eléctrica.



Figura 4.12 Equipo superficial rotatorio y barrena tipo corona usados en la perforación del pozo Yaxcopoil-1



Figura 4.13 Recuperación y marcado y resguardo del núcleo del pozo Yaxcopoil-1

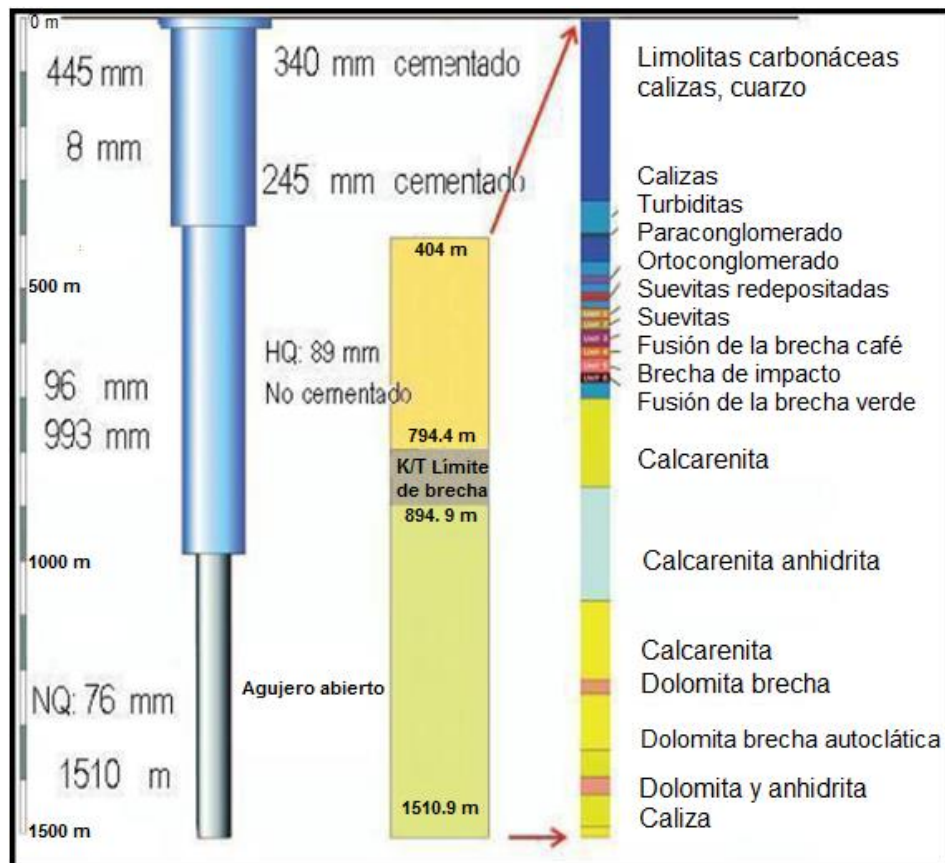


Figura 4.14 Identificación de la secuencia en el pozo Yaxcopoil-1

Cerca de la base del agujero de los 1,495 a 1,452 [m] se depositó una roca caliza margosa rica en materia orgánica, en un ambiente de plataforma marina abierta durante el Cenomiano tardío (zona superior de *Rotalipora cushmani*).

De las cotas 1,495 a 894 [m] encontramos una secuencia superpuesta de calizas, dolomitas y anhidritas, que indica la depositación en diversos entornos de plataforma de carbonato (ej. Sahkhas, lagoons).

Las cotas 894 a 794 [m] comprenden una unidad impactoclástica, suevitas y brechas de impacto, de 100 metros de grosor, evidencia del evento del impacto Chicxulub. Las impactitas están formadas por una unidad inferior de fundido de impacto (suevita) y otra compuesta por una serie de brechas polimícticas, situada entre calizas, dolomías y anhidritas preimpacto y margas calcáreas relacionadas con la depositación del cráter.

Por encima de esta unidad impactoclástica o brecha suevítica tenemos 46 [cm] de areniscas calcáreas dolomitizadas representando posiblemente materiales de relleno tras la invasión marina del cráter recién formado, con conjuntos de foraminíferos planctónicos indicativo del género *Plummerita hantkeninoides* con un rango cronoestratigráfico que abarca los últimos 300,000 años del Maastrichtian superior (Cretácico superior).

Por encima del contacto brecha/dolomita hay una superficie de erosión de 50 [cm] que marca el límite Cretácico superior y sobre esta unidad existe un hiato o laguna estratigráfica que afecta al Daniense inferior. Calizas por encima de este contacto contienen los primeros foraminíferos terciarios planctónicos *P. eugubina* indicativos de una zona superior de que define el piso del Daniense. A lo largo de las cotas 794.04 a 775 [m] encontramos presencia de conjuntos de foraminíferos planctónicos. Desde la cota 794.04 hasta la cota 404 [m] se encontraron rocas carbonatadas magras calcáreas y calizas.

La secuencia de carbonato cretácico parece ser autóctona con una secuencia estratigráfica comparable a los sedimentos cretácicos conocidos desde fuera del cráter Chicxulub en el norte y sur de Yucatán, incluyendo roca caliza margosa rica en materia orgánica del Cenomiano tardío.

No hay evidencia de que estos sedimentos representen relleno del cráter debido a desplazamientos de megabloques en el cráter, como la irrupción importante de sedimentos o cambios drásticos en la litología. Las brechas que están intercaladas en la secuencia de plataforma de carbonato son de origen intraformacionales.

Los núcleos del pozo Yaxcopoil-1 fueron medidos y examinados para comprender cambios litológicos, microfósiles, traza de fósiles, bioturbación, superficies de erosión y sedimentos duros. Un total de 180 muestras se analizaron para microfacies, microfósiles, mineralogía y química.

Se identificaron diez principales unidades bio-litoestratigráficas dentro de una secuencia analizada de 775 a 1,511 [m] (Unidades A-K) (Figura 4.15),

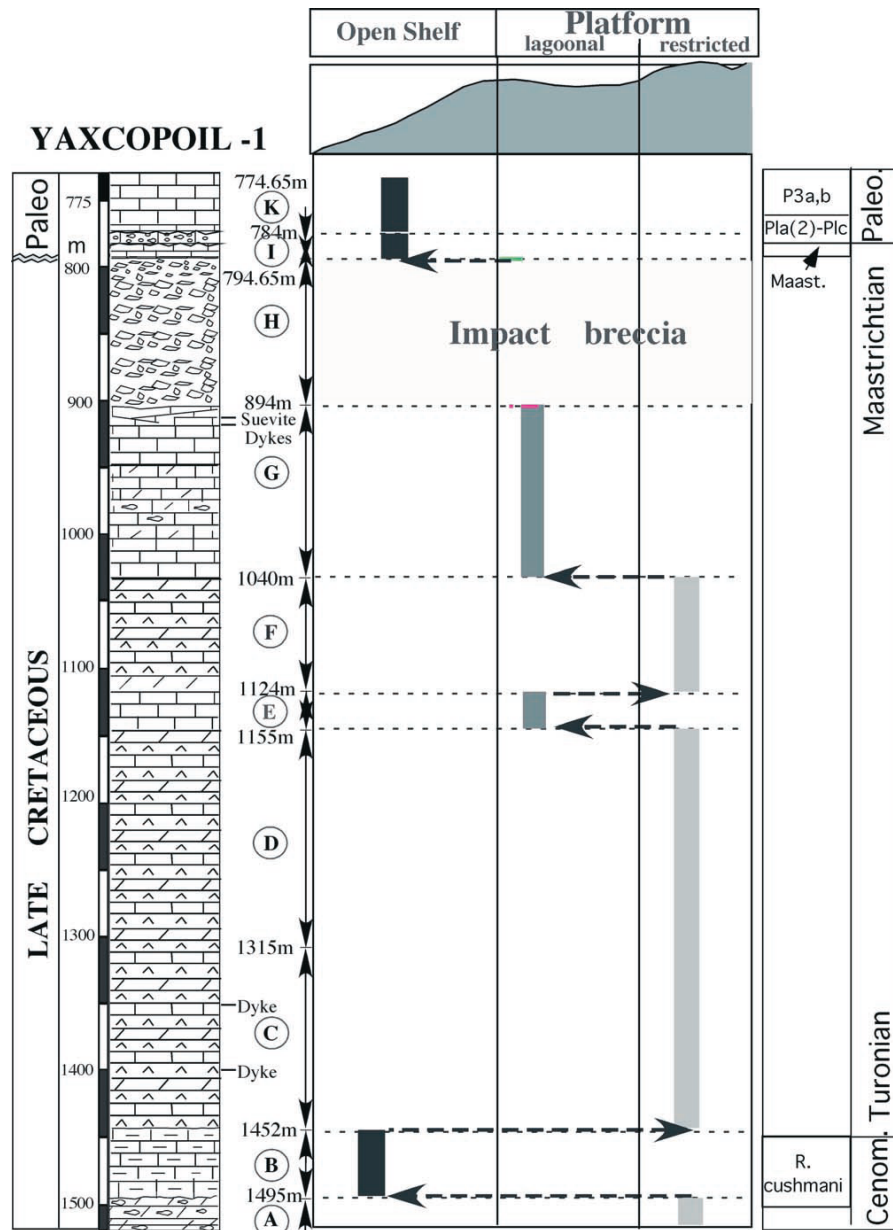


Figura 4.15 Litología, bioestratigrafía y cambios paleoambientales inferidos en el pozo Yaxcopoil-1

Unidad A, de 1,511 a 1,495 [m]

La unidad A consiste en una brecha de 16 m de espesor con capas intermedias estratiformes menores de dolomita y anhidrita, en la base del núcleo. Los clastos de la brecha consisten en dolomita, calizas dolomíticas y anhidrita (<10%). Algunas capas de brechas indican una brechificación in situ de dolomita con clastos angulares y vacíos rellenos de cemento calcáreo de grano fino, mientras que otras capas de brechas contienen clastos aislados flotando en una matriz de piedra caliza dolomítica de grano fino.

Unidad B, de 1,495 a aproximadamente 1,452 [m]

La unidad B consiste en una piedra caliza margosa, bituminosa, de lecho y laminada de 42 [m] de espesor gris a gris oscuro, que se extiende desde 1.495 hasta aproximadamente 1.452 [m] (Apéndice 1, Figura 1).

El análisis de una delgada sección revela bioclastos wackestones (biomicrita) con presencia de foraminíferos planctónicos, raros cerca a la base, a abundantes en la parte superior (ej. *Whiteinella archaeocretacea*, *W. baltica*, *Rotalipora cushmani*, *R. greenhornensis*, *Hedbergella*; Apéndice 1, Figura 2). Las faunas foraminíferas planctónicas indican la edad superior de Cenomaniano (parte superior de la zona, *R. cushmani*) y depositación en un ambiente marino abierto de bajo oxígeno que es indicativo del evento anóxico oceánico que caracteriza Cenomaniano tardío.

Unidad C, de 1,452 a 1,315 [m]

La Unidad C consiste en una dolomía de 137 [m] de espesor, predominantemente gris, con varias capas de brechas estratiformes y camas bituminosas con pequeños nódulos de anhidrita (<10 [cm] de diámetro). Las capas de anhidrita y dolomita están presentes entre 1,429 y 1,444 [m] en un intervalo bituminoso. Los fósiles son raros en esta unidad y están restringidos a fragmentos de bivalvos (ostra) y foraminíferos bentónicos (ej., *miliólidos*; Apéndice 1, Figura 3), que ocurren en peloidal packstones y grainstones. La mayoría de las capas dolomíticas parecen ser debido a la transformación diagenética de lime-mudstones, los intervalos de brecha ocurren repetidamente a través de los 137 [m] de espesor y son intraformacionales. Los clastos consisten en dolomita, piedras calcáreas dolomíticas (ej., mudstones, peloidal packstones, grainstones) y anhidrita (<10%). La capa de dolomita y las capas de brecha estratiforme indican que la depositación se produjo nuevamente en un ambiente restringido de plataforma interior de carbonato.

Unidad D, de 1,315 a 1,155 [m]

La unidad D tiene 160 [m] de espesor y se caracteriza por abundantes capas de anhidrita de 2 a 11 [m] de espesor, de color gris, con capas intermedias menores de dolomita y caliza dolomítica que van desde unos pocos decímetros hasta 2 [m] de espesor. El contacto con la unidad subyacente C es conformable y transitorio. La mayoría de las capas de anhidrita son masivas, pero algunas están laminadas. Aproximadamente el 10% de la unidad consiste en capas de dolomita de color beige a amarillo y ocasionalmente contienen estratificación estromatolítica y estructuras de ojo de pájaro, nódulos de anhidritas ocurren en la dolomita. Las microfacies de dolomitas revelan litologías mudstone como sedimentación original antes de la dolomitización, esto sugiere que las capas de dolomita y anhidrita se depositaron en una plataforma interior restringida o en un ambiente de sabkha con una configuración evaporítica intermareal a supramareal.

Unidad E, de 1,124 a 1,155 [m]

La unidad E mide 19 [m] de espesor, y consta de calizas calcáreas blancas y grises y calizas dolomíticas de color tostado con raros cristales de yeso y nódulos de anhidrita. No

hay capas de anhidrita presentes. Estas calizas fangosas son en gran parte libre de fósiles. Sin embargo, hay algunas packstone peloidal y wackestone bioclásticas que contienen fragmentación de ostras, bivalvos y miliólidos. Estas litologías indican que la deposición de sedimentos continuó en un ambiente de plataforma interior, con una configuración submareal poco profunda donde la evaporación sólo en raras ocasiones alcanza la precipitación de yeso o anhidrita.

Unidad F, de 1,040 a 1,124 [m]

La unidad F con un grosor de 84 [m], consiste en un espesor masivo de anhidrita color gris, alternada con calizas dolomíticas de color gris, marrón y amarillo, y con dolomías con raros nódulos de anhidrita. Algunas capas de brecha de hasta 1 [m] de espesor están intercaladas y consisten en una mezcla de clastos de dolomita y anhidrita "flotantes" en una matriz de grano fino. Las capas de dolomita se laminan de vez en cuando y una sola capa a 1.100,5 [m] muestra el lecho cruzado. La bioturbación es común, pero estas calizas fangosas están en gran parte desprovistas de fósiles. La depositación ocurrió en un ambiente de sabkha, donde capas de brecha colapsadas se formaron debido a la disolución de evaporitas y carbonatos.

Unidad G, de 894 a 1,040 [m]

La unidad G tiene 146 [m] de espesor y consta de capas de dolomita de color marrón y gris, capas de piedra caliza dolomítica gris claro y calizas. No hay anhidrita. Las texturas de roca caliza están dominadas por packstones peloidal y grainstones, pero wackestones con foraminíferos bentónicos (ej., *lenticulinidos*, *miliólido*; Apéndice 1, Figura 4) y ostrácodos también son comunes. Estas litologías y fósiles sugieren un entorno de plataforma de aguas poco profundas, en un ambiente submareal somero con corrientes ocasionales. El ambiente de depósito es menos restringido que en las unidades C a F y parece ser lagunar o incluso mar abierto.

Unidad H, de 794.6 a 894 [m]

La unidad H es una brecha suevita de impacto de 100 [m] de espesor, con contactos erosivos inferiores y superiores. Los clastos son angulares a subredondeado y promedian unos pocos centímetros de radio, aunque clastos de hasta un diámetro de radio están presentes (Apéndice 1, Figura 5). Es una brecha polimíctica que contiene clastos de dolomita, piedra caliza (por ejemplo, con foraminíferos bentónicos) y rara ocasión areniscas. La cantidad de clastos de anhidrita es baja.

Además de los clastos no digeridos de la cubierta del sedimento mesozoico del norte de Yucatán, existen constituyentes menores pero significativos de roca fundida y rocas cristalinas de origen basamento continental, como granito, granodiorita, gneis, cuarcita, esquistos albita-verde y micaesquistos. Los clastos tienen diferente historia diagenética. Clastos de calizas y dolomías frecuentemente presentan alteraciones térmicas, es decir, bordes alterados, y otros no muestran ninguna alteración con microfacies intactas.

La mayor parte de la unidad se considera un depósito balístico de caída al aire libre, pero también están presentes depósitos turbulentos, y surgimientos de masa (basal de 10 [m]). Los 15 [m] superiores de brecha de la unidad H se depositaron por el transporte de corriente, tras la depositación de la brecha de impacto, como se indica por brechas estratificadas con capas alternadas de clastos subredondeados a redondeados, clasificados y granodecrecientes hacia arriba. Con una tendencia general de estabilización ascendente entre los diámetros máximos de clastos de 3-5 [cm] en la base hasta aproximadamente 2-5 [mm] cerca de la parte superior. Estratificación horizontal y estructuras de estratificación cruzada en el metro superior sugieren reelaboración, como también se indica por la alternancia de capas de arena gris friable (clastos de aproximadamente 2 [mm]) con horizontes microconglomeráticos ligeramente mayores (clastos de 2 a 5 [mm]) (Figura 4.16).

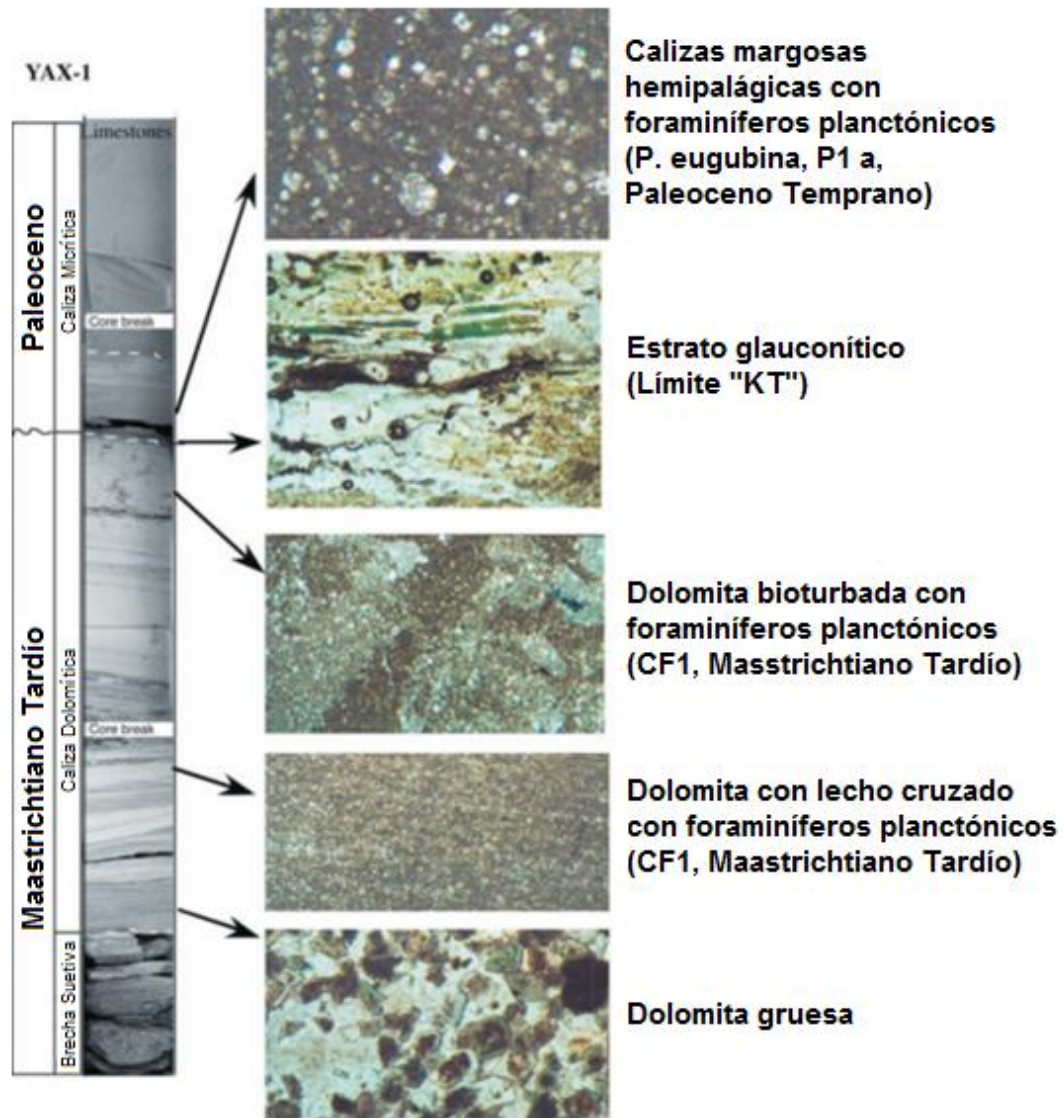


Figura 4.16 Contacto litoestratigráfico entre la brecha de impacto suevítica (parte superior de la unidad H) y las calizas dolomíticas suprayacentes (unidad I).

Unidad I, de 784 a 794.6 [m]

La Unidad I tiene aproximadamente 10 [m] de espesor, y está formada por caliza dolomítica y caliza. La unidad se superpone a una superficie superior ondulatoria y erosiva de la unidad H. En este contacto (794.54-794.60 [m]), la parte superior de la unidad H consiste en arenisca calcárea laminada de color gris claro, friable. Entre esta disconformidad y el límite K-T se encuentra un intervalo de espesor de 50 [cm] de caliza dolomítica predominantemente laminada.

Unidad Ia, de 794.60 a 794.10 [m]

Este intervalo de 50 [cm] de espesor está entre las disconformidades en la parte superior de la brecha y el límite K-T. El intervalo consta principalmente de piedra caliza micrítica laminada, con microcapas o parches de cristales de dolomita anhedral y una capa gruesa de dolomita de 5 [cm] de espesor en la base. La piedra caliza micrítica indica depositación en condiciones de depositación de agua tranquila de baja energía, mientras que la dolomita formada por sustitución diagenética de la caliza precursora con la textura laminada original todavía es visible. En los 20 [cm] inferiores de esta unidad hay tres capas delgadas (1 [cm]) con estratificación oblicua, que pueden haberse formado de débiles corrientes de fondo por aguas ligeramente agitadas, sin embargo, la ausencia de cambios en el tamaño de grano sugiere que esto puede ser una característica diagenética o relacionados con la sedimentación (Figura 4.16).

Cinco capas delgadas de microclastos arcillosos verdes están incrustadas en las calizas laminadas a 794,43, 794,34-794,35, 794,24, 794,19 y 794,11 [m], de las cuales esta última marca el límite K-T y un hiato significativo. Los residuos insolubles de estos intervalos revelan que los microclastos son de origen glauconítico y / o tienen un revestimiento in situ de glauconita. Las cinco capas de microclastos revelan largas pausas en el ambiente de depositación generalmente tranquilo con sedimentación reducida y la formación de glauconita seguida de sedimentación, generación de clastos y transporte a pequeña escala por menor actividad de corriente.

El examen de las secciones delgadas revela que los intervalos micríticos laminados son ricos en los foraminíferos planctónicos del Maastrichtiano tardío. Se han identificado varias especies (por ejemplo, *Rugoglobigerina*, *Plummerita hantkeninoides*, *Globotruncana*, *Heterohelix*, *Hedbergella* y *Globigerinelloides* (Apéndice 1, Figura 6) y data de este intervalo como la última zona de Maastrichtian (*P. hantkeninoides*, 65,3 - 65,0 M.A.).

Unidad Ib

La unidad Ib, o sección ascendente, consiste en calizas micríticas homogéneas moteadas de blanco a gris claro (wackestone con foraminíferos planctónicos), que son sólo ligeramente dolomíticas.

Los sedimentos moteados y la bioturbación por *chondrites* y de los *Thalassinoides* son comunes, mientras que los intervalos de estratos *flaser* que contienen gránulos ligeramente

más gruesos son raros. Los primeros foraminíferos planctónicos del Daniano y abundante *Thoracosphaera* están presentes en una mudstone calcárea 2 cm por encima de la disconformidad glauconita y hiato.

En este intervalo se observan, raros miliólidos y foraminíferos planctónicos *P. eugubina* de principios del Daniense. En los 5 [cm] por encima de este intervalo (794.05-794.09 [m]) se observa un conjunto diverso de foraminíferos plantónicos del Daniense temprano, incluyendo *P. eugubina*, *Guembelitra cretacea*, *G. daubjergensis*, *G. pentagona*, *W. hornerstownensis*, *C. midwayensis*, *P. pseudobulloides* y *S. triloculinoides*, Apéndice 1, Figura 7), esto indica que las primeras muestras del Paleoceno son de edad de la zona superior de *P. eugubina*.

Los 50-100 [cm] más bajos de la unidad I reflejan una menor actividad de la corriente de fondo, como se indica por la caliza dolomítica de lecho cruzado de pequeña escala y de lecho flotante y dos microconglomerados de 1 [cm] de espesor.

Aparte de estas capas microconglomeradas, no hay evidencia de clastos reelaborados derivados de la unidad de brecha de impacto suevítica H. Sin embargo, se observó un fragmento de vidrio en la muestra 10, 5 [cm] por debajo del límite K / T. La unidad I se caracteriza por biomicritas bioturbadas ricas en foraminíferos planctónicos (Apéndice 1, Figura 8), lo que sugiere que la deposición se produjo en un ambiente de agua tranquila en la zona nerítica intermedia a exterior.

Unidad K, 784 a 774.65 [m]

La unidad K se compone de calizas margosas hemipelágicas intercaladas con capas conglomeradas que van desde unos pocos centímetros a 3 [m] de espesor. Los clastos del conglomerado son subredondeados a redondeados, hasta 5 [cm] de diámetro, y consisten en calizas bioclásticas y micríticas (Apéndice 1, Figura 9).

Estos clastos se derivan claramente de ambientes de plataformas de carbonatos poco profundos e indican su transporte hacia aguas más profundas, probablemente por los flujos de escombros. Para algunas capas de conglomerado, se identificaron litologías clasificadas por tamaños que también sugieren un origen como flujos de gravedad del sedimento. En algunas capas, los clastos flotan en una matriz de caliza margosa (wackestone de foraminíferos planctónicos, Apéndice 1, Figura 10), mientras que otras capas, especialmente en la parte superior de la unidad K, están apoyadas por clastos e indican imbricación.

La deposición de sedimentos de la unidad K se produjo en una rampa proximal de aguas someras con algún influjo de aguas poco profundas cercanas y ambientes de plataformas carbonatadas. Los conglomerados de la unidad K parecen ser de flujo de desechos y turbidita y están dominados por calizas esqueléticas de origen de aguas poco profundas. Litologías características de la unidad K continúan por encima de los 774,65 [m] (Figura 4.17).

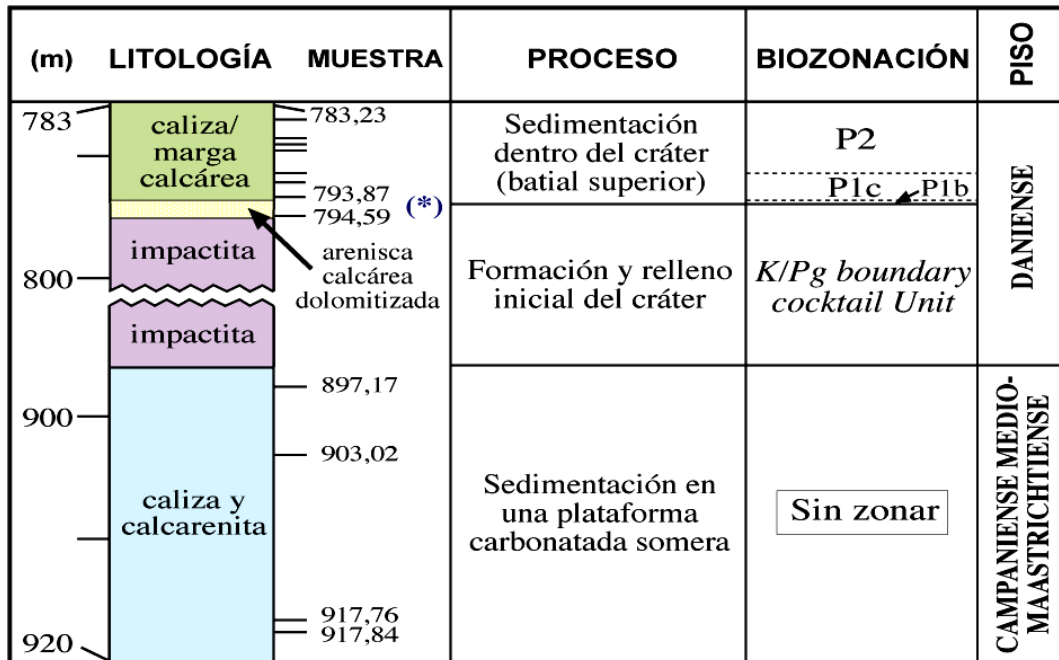


Figura 4.17 Interpretación general de los procesos geológicos y de la bioestratigrafía entre las cotas 974,59 [m] y 793,87 [m] del pozo Yaxcopoil-1

5 Actividades en Laboratorio, Resultados y Discusión

En primer lugar, las actividades se dirigieron a la preservación, documentación y clasificación de las muestras del núcleo del pozo Yaxcopoil-1. En segundo lugar, las actividades se enfocaron en dos experimentos para la medición de algunas propiedades petrofísicas (densidad, porosidad, resistividad y cargabilidad eléctrica y susceptibilidad magnética) hechas sobre algunas muestras del núcleo.

Los núcleos fueron transportados en cajas desde un viejo almacén hasta su actual localización en el Laboratorio de Análisis de Núcleos del Instituto de Geofísica de la UNAM en donde se clasificaron y almacenaron.

El núcleo entero del pozo Yaxcopoil-1 fue cortado a la mitad longitudinalmente y una de las dos mitades permanece resguardada en el Laboratorio para su estudio.

Las cajas tienen canales internos en donde son colocados de forma ordenada alrededor de 2 metros de núcleo.

Las cajas tienen pegada una etiqueta a un costado, con los espacios dispuestos para el “nombre del pozo” (en este caso marcado como yax-1); el “número de caja” ordenadas de acuerdo con la profundidad en [m] del núcleo; y la profundidad del “tope” y “fondo” del intervalo de núcleo guardado en cada caja en [m], que corresponde a la primera y última pieza de la caja respectivamente.

Estos datos también están escritos con plumón permanente directamente sobre la caja, donde las profundidades del *tope* y el *fondo* del intervalo pueden ser ligeramente diferentes con respecto a los datos de la etiqueta. Esto se explica porque los datos de profundidad del *tope* y *fondo* marcados con plumón sobre las cajas son hechos cuando el intervalo de núcleo recién perforado viene saliendo del pozo y se realiza un cálculo preventivo de estas profundidades, las cuales después son corregidas en laboratorio mediante una lectura más meticulosa y los datos oficiales son impresos en la etiqueta.

Las cajas transportadas se colocaron en las mesas y en estantes del laboratorio para que las piezas de núcleo fueran envueltas en plástico adherente y marcadas con un par de números que identifican cada pieza, esto con la finalidad de que las piezas fragmentadas o con riesgo de fragmentarse quedan envueltas en un empaque compacto y puedan ser fácilmente identificadas.

El núcleo entero está fragmentado y por lo general cada fragmento consta de una pieza sólida que encaja con la siguiente, sin embargo también se encuentran a lo largo del núcleo piezas fracturadas y/o con riesgo de fragmentarse; piezas ya fragmentadas, piezas deleznales y material suelto. La envoltura de la pieza en el plástico adherente permite que cada fragmento permanezca ordenado dentro el cuerpo principal del núcleo y de esta forma no se pierda la forma y posición de cada fragmento.

Cuando se envuelve una pieza completamente fragmentada es necesario armar esta pieza como si fuera un rompecabezas para después envolverla en el plástico adherente y de esta forma se evitar que los pequeños fragmentos se dispersaran por toda la caja y se perdiera la posición (profundidad) de los mismos.

En la siguiente imagen (Figura 5.1) se puede observar una caja con fragmentos de núcleo en donde la mayoría del intervalo consta de piezas “no fragmentadas” y en menor medida de piezas fragmentadas acomodadas en orden dentro de los canales de la caja



Figura 5.1 Fragmentos de núcleo ordenados dentro de los canales de la caja

Después de envolver la pieza de núcleo en el plástico se marca con plumón permanente dos números que identifican la pieza: un número que corresponde con el número de caja y otro número que corresponde con el número de la pieza dentro esa caja.

Así, por ejemplo, la primera pieza del intervalo de núcleo de la caja 431 sería 431-1, la segunda pieza sería 431-2 y así sucesivamente hasta la última pieza del intervalo de la caja.

Las piezas son colocadas de en sentido vertical dentro de la caja guiándose de las marcas roja y azul (estas marcas deberían ser en estricto sentido rojo y negro), pintadas en el núcleo para evitar que su sentido se invierta. La franja negra (en este caso pintada de azul) marcada a la derecha y la franja roja a la izquierda indican que el núcleo está orientado en el sentido de orientación del pozo.

Una vez envueltas todas las piezas de una caja, ésta ya puede ser colocada en los anaqueles en el espacio disponible para su ordenamiento. Los anaqueles tienen etiquetas pegadas a un costado en donde se indica el lugar donde van colocadas las cajas de acuerdo con su número.

Las cajas están hechas de un material plástico hecho de fibras que se degrada con el uso, y es frágil al peso, por lo que un máximo de tres cajas es lo que se permite apilar. Como en cada espacio del anaquel se pueden colocar tres cajas apiladas, las etiquetas vienen marcadas con tres números que corresponden con los números de tres cajas de orden consecutivo.

Los espacios señalados con las etiquetas están ordenados de acuerdo con el número de cajas y en consecuencia a la profundidad del núcleo. De tal forma que el primer espacio corresponde a la zona más alta del núcleo y el último espacio corresponde con la zona más profunda del núcleo.

Posteriormente se prosiguió a realizar una serie de experimentos en algunas piezas de núcleo, los cuales son explicados a continuación.

5.1 Experimentos

Se realizaron dos experimentos:

En el primero se tomó la densidad, la porosidad, la resistividad y cargabilidad eléctrica y la susceptibilidad magnética a cinco piezas del núcleo distribuidas a diferentes profundidades del pozo, bajo tres condiciones diferentes: núcleo seco, núcleo mojado en agua y núcleo mojado en salmuera.

El segundo experimento se realizaron a una serie de mediciones a piezas en el intervalo (899 - 921 [m]), donde se tomaron mediciones de resistividad, cargabilidad, susceptibilidad, se calculó la densidad y porosidad de las muestras.

El total de muestras medidas es de 107, de tal forma que las mediciones hechas pueden verse como un registro de las propiedades medidas contra la profundidad en un intervalo de aproximadamente 22 metros.

La posición de las muestras seleccionadas con respecto a la columna total del núcleo se presenta de forma esquemática (Figura 5.2)

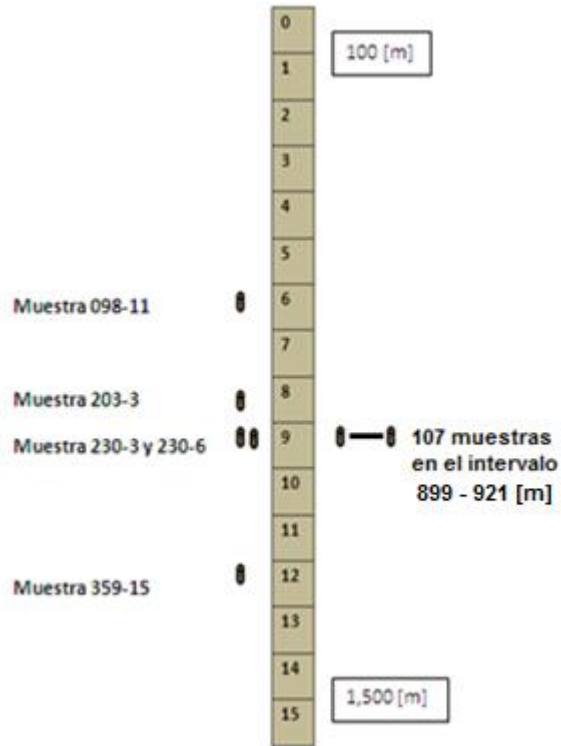


Figura 5.2 Representación esquemática de la posición de las muestras con respecto de la columna total del pozo

Para medir la susceptibilidad magnética se usó equipo Magnetic Susceptibility Meter MS2 (medidor de susceptibilidad magnética), y la sonda magnética MS2E (Figura 5.3) que forman parte del MS2 Magnetic Susceptibility System (sistema de susceptibilidad magnética).



Figura 5.3 Equipo MS2 y sonda magnética MS2E

Los circuitos dentro del medidor MS2 accionan los sensores y procesan la información de medición producida por ellos. Las mediciones se obtienen digitalmente utilizando un método dependiente del tiempo. Los sensores están calibrados de forma independiente.

Para obtener la densidad y porosidad se hizo uso de una balanza analítica, un flexómetro, un recipiente donde sumergir las piezas en agua.

Para medir la densidad y porosidad se hizo uso de una balanza analítica para medir la masa (Figura 5.4), un flexómetro para medir las dimensiones de la muestra (longitud y radio) y calcular su volumen, un recipiente donde se sumergieron las piezas en agua para obtener el peso de la muestra empapada en agua, y con este valor hacer una aproximación de la porosidad.

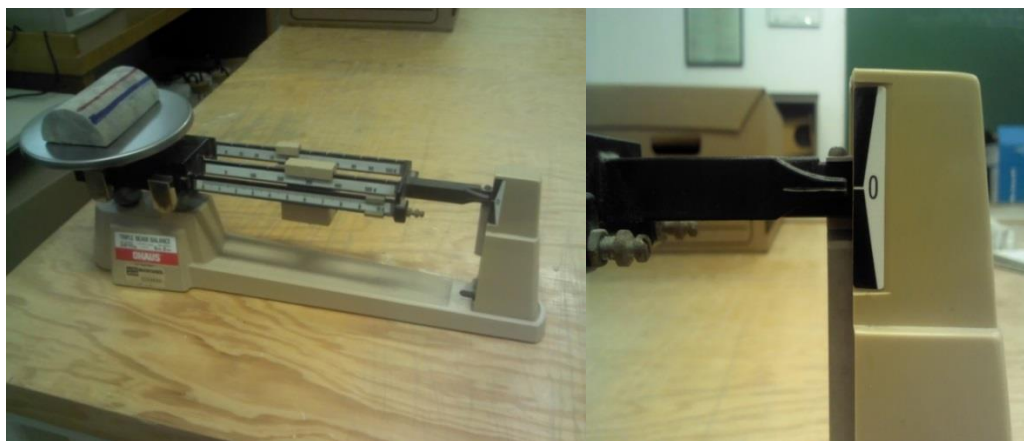


Figura 5.4 Balanza analítica usada para medir la masa de las muestras

Para la medición de la resistividad y cargabilidad se usó el equipo medidor SCIP (Sample Core Induced Polarization) (Figura 5.5), el cual es un equipo que sirve para evaluar las propiedades eléctricas de sus muestras.

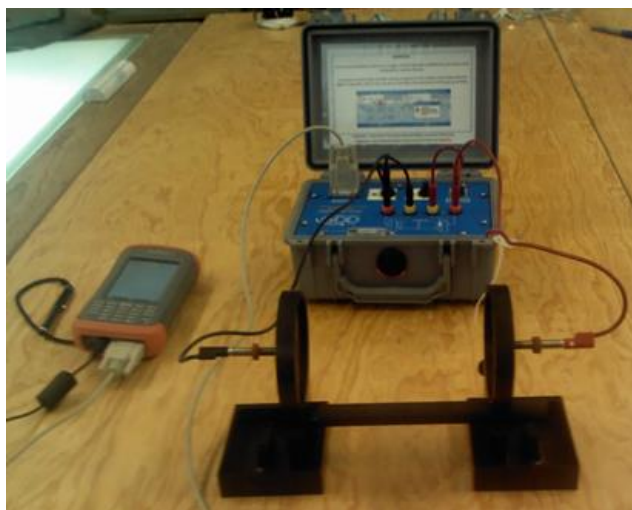


Figura 5.5 Esquipo Medidor SCIP

El equipo mide el voltaje y el desfase del campo eléctrico por efecto de la polarización inducida, creado en la muestra por la inyección o inducción de una corriente eléctrica mediante electrodos de cobre. El equipo tiene la disponibilidad de manipular el voltaje o corriente eléctrica inducida en el momento de la medición.

El voltaje o corriente medido depende de la distribución intrínseca de la resistividad y la polarización inducida del elemento bajo medición, en este caso, fragmentos de núcleo del pozo Yaxcopoil-1. La resistividad y la polarización inducida son inferidas mediante la aplicación del análisis numérico sobre los datos obtenidos.

La polarización inducida se observa cuando un flujo de corriente estacionario que atraviesa dos electrodos se interrumpe y la tensión no retorna instantáneamente a cero, sino que decae lentamente de forma exponencial. Esto significa que una carga ha sido almacenada en la muestra, acumulándose principalmente en elementos minerales de arcilla.

El efecto de polarización inducida puede ser medido en el dominio del tiempo mediante la observación de la tasa de decaimiento de la tensión.

5.2 Experimento 1

En este primer experimento se realizó la medición de la resistividad y cargabilidad, así como de la susceptibilidad magnética (propiedades eléctricas y magnéticas de la roca), además se obtienen cálculos sobre la densidad y una aproximación de la porosidad a cinco muestras del núcleo Yaxcopoil-1.



Para medir la resistividad se utilizó el equipo SCIP. Las muestras necesitan tener dos caras planas paralelas que puedan ser colocadas contra los electrodos de cobre del equipo.

Las muestras fueron seleccionadas de piezas con cortes perpendiculares al eje del núcleo (Figura 5.6), quedando una figura semicilíndrica con caras transversales semicirculares. La forma de la muestra debe ser regular para que el área y volumen puedan ser fácilmente calculables.



Figura 5.6 Ejemplo de muestra con caras transversales paralelas

A continuación, se presentan las profundidades a las que se encuentran las muestras seleccionadas, así como su longitud, el diámetro del semicírculo y algunas observaciones en cuanto a su textura (Tabla 5.1)

Profundidad [m] Longitud [cm] Diámetro [cm]	Imagen	Observaciones
621.7 11.7 6		Roca sólida, dura y compacta de poros muy pequeños color grisáceo con una traza de material oscuro, homogénea, con cambio de facie al fondo
848.3 12.8 6		Conglomerado, roca sólida, material mezclado, formas fluidas, colores café oscuro y claro, verde, amarillo, heterogénea roca perteneciente a la brecha de impacto



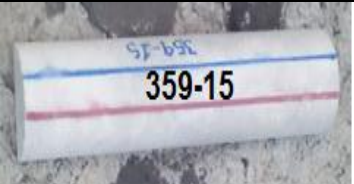
906.38 9.5 6		Roca áspera y deleznable de granos no tan finos, áspera, color gris, homogénea
906.75 19.3 6		Roca sólida, se observan formas onduladas en el material, color gris claro en varias tonalidades y oscuro en la parte inferior
1,237.67 19.7 4.7		Roca sólida y compacta, de granos finos, tiene textura y olor semejante a yeso, se disuelve con el agua, color blanquecino grisáceo, homogénea

Tabla 5.1 Características de las cinco muestras seleccionadas del experimento 1

Densidad y la porosidad

La densidad de cada muestra se obtuvo mediante la medición de su masa en una balanza analítica marca Ohaus (Figura 5.7) y un cálculo de su volumen que se obtuvo al multiplicar el área de un semicírculo de diámetro 6 y 4.7 [cm] y por la longitud de la muestra, haciendo uso de un flexómetro para tomar las medidas.



Figura 5.7 Medición de la masa de la muestra 359-15

En cuanto a la porosidad, se obtuvo una aproximación de ésta al comparar la diferencia de pesos de las muestras estando secas y empapadas en agua, tras permanecer una semana sumergidas, la diferencia de pesos se debe al agua que se acumuló en los poros de la roca, y la porosidad se estimó calculando el volumen de agua en los poros, si suponemos

que la muestra se saturó completamente de agua y cuya densidad es de 1[g/cm³]. El proceso matemático se describe en las siguiente formula.

$$\emptyset = \frac{\text{Volumen de agua [cm}^3\text{]}}{\text{Volumen de la muestra [cm}^3\text{]}} \quad (31)$$

$$\text{Volumen de agua [cm}^3\text{]} = \frac{\text{masa de agua [g]}}{\text{densidad del agua } \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]} \quad (32)$$

$$\text{masa de agua[g]} = \text{masa de la muestra mojada[g]} - \text{masa de la muestra seca[g]} \quad (33)$$

Los valores se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Profundidad [m]	Masa en seco [g]	Masa mojado [g]	Volumen de agua [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Porosidad [%]
098-11	621.7	431.3	436.4	165.40	2.608	3.08
203-3	848.3	408.8	434.9	180.95	2.259	14.42
230-3	906.38	305.7	313.9	134.30	2.276	6.10
230-6	906.75	620.1	646.7	272.85	2.273	9.75
359-15	1,237.67	482.5	476.5	170.89	2.823	-3.51

Tabla 5.2 Profundidad, masa, volumen, densidad y porosidad de las cinco muestras del experimento 1

La muestra 359-15 es la más densa (2.82 g/cm³), presenta una composición homogénea (mudstone) de matriz compacta de cristales finos de yeso de color blanquecino y lisa al tacto. Sin embargo, para ésta muestra, el valor de la porosidad no pudo ser medido, ya al estar compuesta por una matriz de yeso, los cristales en la de superficie de ésta se disolvieron al contacto prolongado con el agua, provocando la perdida de material y una pérdida de su peso, dando como resultado un valor falso de porosidad negativa.

De las muestras restantes, la muestra 098-11 tiene la mayor densidad (2.61 g/cm³) y tiene a su vez la menor porosidad medida (3.1%), es roca muy compacta y muy dura de composición homogénea, de color grisáceo (gris oscuro), lisa al tacto, y con cambio de facie en el fondo.

Las muestras 230-3 y 230-6, con densidades más bajas, (2.28 y 227 g/cm³ respectivamente) y porosidades más altas (6.1% y 9.8%), están a profundidades muy cercanas y son rocas menos duras y más ásperas (tamaño de cristal más grande), de color gris claro, perteneciente ambas a la misma matriz de roca caliza dolomítica, tuvieron densidades muy similares y porosidades relativamente cercanas.

La muestra 203-3 tiene un valor de densidad similar a las anteriores (2.26 g/cm^3) pero ligeramente inferior y una porosidad elevada (14.4%), la más alta de todas, es roca perteneciente a la brecha de impacto, de textura caótica, formas fluidas de material fundido que se solidificó, textura similar a roca ígneas extrusivas, de colores marrón y amarillos.

Susceptibilidad magnética

La medición de la susceptibilidad magnética se realizó haciendo el uso del equipo medidor de susceptibilidad magnética. Las muestras fueron medidas en diferentes posiciones, tanto en la cara paralela al eje del núcleo a diferentes profundidades, como en las caras transversales correspondientes al tope y fondo de la muestra, aprovechando que son superficies planas (Figura 5.8). Las muestras 098-11, 203-3 y 230-3 fueron medidas en dos diferentes profundidades y las muestras 230-6 y 359-15, al tener mayor longitud, fueron medidas en tres profundidades diferentes.



Figura 5.8 Medición de la Susceptibilidad Magnética, Muestra 359-15, Experimento 1

El equipo se configuró en unidades del Sistema Internacional y en el rango de 1.0. La susceptibilidad magnética es una propiedad adimensional que depende de la permeabilidad magnética, la cual está en unidades de $[\text{N/A}^2]$, y puede determinarse en unidades del Sistema Internacional y en el Sistema Cegesimal de Unidades. En el rango 1.0 el dígito menos significativo está multiplicado por 10^{-5} en el SI y por 10^{-6} en el CGS. No fue necesario bajar el rango de susceptibilidad al rango 0.1 para susceptibilidades más finas.

Cada valor de susceptibilidad es un promedio de tres mediciones realizadas en un mismo lugar en la muestra, sin despegar la sonda de ésta, los resultados se presentan contra la profundidad a la que fue medida. La profundidad se obtiene sumando la profundidad del tope más la distancia desde éste hasta la posición donde se midió.

098-11		203-3		230-3		230-6		359-15	
Prof. [m]	X X10 ⁻⁵	Prof. [m]	X X10 ⁻⁵	Prof. [m]	X X10 ⁻⁵	Prof. [m]	X X10 ⁻⁵	Prof. [m]	X X10 ⁻⁵
621.70 T	-1.3	848.30 T	373.4	906.38 T	-0.3	906.75 T	-2.0	1237.67 T	-1.4
621.73	-1.2	848.33	856.8	906.41	0.5	906.78	-1.4	1237.70	-2.8
621.79	-3.1	848.40	242.9	906.45	-1.2	906.85	-1.9	1237.77	-1.8
621.81 F	-1.8	848.43 F	195.6	906.48 F	-0.5	906.92	-1.3	1237.84	-3.1
						906.94 F	-2.0	1237.87 F	-1.7

Tabla 5.3 Susceptibilidad magnética de las cinco muestras del experimento 1
T y P: Tope y Fondo

La mayoría de las muestra presenta susceptibilidades magnéticas negativas, lo que indica la presencia de minerales con características diamagnéticas que componen mayoritariamente la roca, la mayoría entre 0 y -3×10^{-5} SI.

En el evento del impacto del Chicxulub, el incremento de la presión y la temperatura provocado por el impacto, fundieron parte de la roca preexistente (y material propio del meteorito), expulsándola y alterando la organización molecular de los compuestos minerales al existir un cambio de su estado sólido a líquido (roca capaz de fluir), y llevándose a cabo una recristalización (reacomodo de geometrías cristalinas) al momento de enfriarse aceleradamente durante la invasión de aguas marinas, originándose la roca de impacto.

La susceptibilidad magnética de la muestra 203-3 (brecha de impacto) se distingue de las otras al mostrar valores positivos altos de susceptibilidad entre 200 a 850×10^{-5} SI, lo que corresponde con la presencia de minerales ferromagnéticos (con contenido de hierro).

En contraste, las demás rocas que están por encima y por debajo de la brecha presentan en su mayoría valores negativos bajos de susceptibilidad magnética, por la presencia en su mayoría de materiales diamagnéticos típicos de carbonatos.

Además, la susceptibilidad varía mucho en la muestra 203-3 que presenta grandes cambios según la posición y dirección de la sonda en la muestra, reflejando un medio anisotrópico de propiedades magnéticas.

En el caso de la muestra 230-6, aunque la mayoría de sus mediciones tuvieron valores negativos, tuvo uno positivo a la profundidad de 906.41 [m] de 0.5×10^{-5} SI y dos valores negativos cercanos a cero, lo que quiere decir que, esta muestra cuenta con menos presencia representativa de material diamagnético comparado con las otras, exceptuando a la muestra 203-3, y por ende más cercano al límite entre material diamagnético o paramagnético.

Resistividad y cargabilidad

En este primer experimento se midieron la resistividad y cargabilidad de cada una de las muestra bajo tres escenarios distintos:

- Núcleo mojado en agua
- Núcleo seco
- Núcleo mojado en salmuera

Solución saturada de agua y sal (NaCl, ~360 g/L @ 20°C)

A continuación, se muestra un cronograma de las actividades y los tiempos (en días) en que las muestras permanecieron sumergidas en agua (azul), fuera del agua (naranja) y sumergidas en salmuera (verde) para medir la resistividad y cargabilidad bajo los tres escenarios (Figura 5.9).

Tanto para el escenario núcleo mojado en agua como para el de núcleo mojado en salmuera, se realizaron dos pruebas para cada condición, en diferente día, para poder comprobar los resultados y verificar su repetitividad, mientras que en el escenario de núcleo seco sólo se realizó una única prueba.

El día en que se realizó cada prueba se marcó con la letra “P” en el cronograma, y el día en que se repitió la prueba para los escenarios mencionados se usó la letra “R”, para indicar que es la repetición de la prueba.

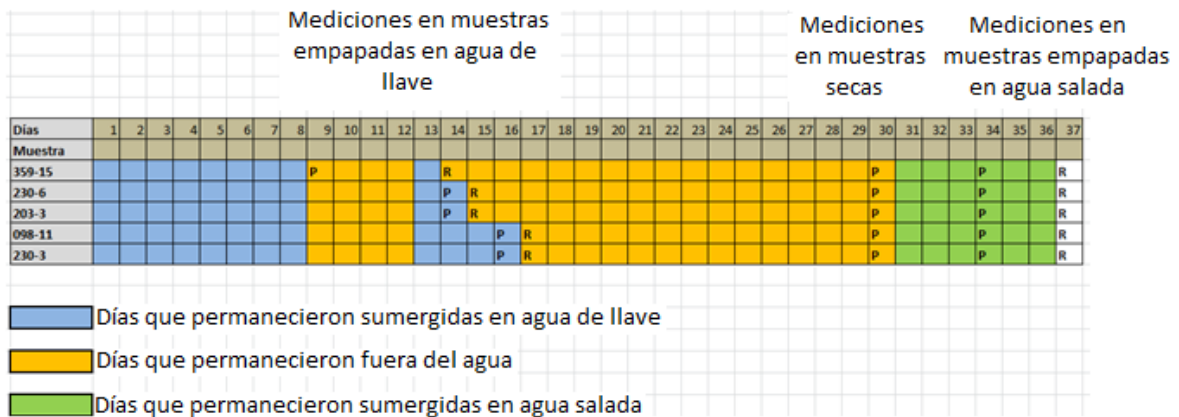


Figura 5.9 Cronograma de actividades para la medición de la resistividad a las cinco muestra del experimento 1

El primer paso fue sumergir las cinco muestras en agua por un periodo de 8 días (en azul), tras lo cual se realizó la primera prueba únicamente a la muestra 359-15. Las demás muestras no fueron probadas ese día.

Todas las muestras fueron sacadas del agua por un periodo de 4 días (en naranja), después del cual se volvieron a sumergir.

La muestra 359-15 permaneció sumergida en el agua por un día más, y después se volvió a probar, posteriormente quedó fuera del agua por un periodo de 17 días.

Las muestras 230-6 y 203-3, después de permanecer sumergidas un día más, se les realizó la primera prueba. Tras el segundo día sumergidas, se les realizó la segunda prueba y posteriormente son sacadas del agua por un periodo de 16 días.

Las muestras 098-11 y 230-3 permanecieron 3 días más sumergidas en el agua y se les realizó la primera prueba. Tras permanecer 4 días sumergidas, se les realizó la segunda prueba, después de lo cual son sacadas del agua por un periodo de 14 días.

Tras permanecer fuera del agua durante un periodo prolongado, las muestras terminaron por secarse y se les hicieron pruebas estando secas. Se realiza una sola prueba en este escenario.

Para el último escenario, las cinco muestras fueron sumergidas en salmuera durante un periodo de tres días y se les realizó la primera prueba, tras seis días sumergidas, se les realizó la segunda prueba.

Las muestras tienen un tratamiento diferente cuando son mojadas en agua. Lo cual se refleja en los valores de resistividad de la muestra 359-15

El procedimiento general seguido para las mediciones son siguiendo las instrucciones del manual de uso (Apéndice 3 Manual de Uso: Equipo Medidor SCIP (Sample Core Induction Polarization)).

Desarrollo de las pruebas

Después de sacar la muestra del agua hay que asegurarse de que las muestras no tengan excesos de agua en su superficie. El equipo debe de estar conectado como lo indica el manual. Se prepara una solución saturada de sulfato de cobre. Es recomendable usar un equipo mínimo de seguridad ya que el sulfato de cobre es tóxico y se puede inhalar y traspasar a través de la piel y ojos (guantes de látex, lentes de seguridad y mascarilla con filtro para la nariz y boca). Una vez empapadas las esponjas en la solución de sulfato de cobre se colocan entre las caras del núcleo y los electrodos.

Se inicia el programa SCIP en el menú del computador y se comienza con la prueba haciendo clic en el botón "STAR" en la pantalla del computador.

El equipo comenzará a medir la resistencia al contacto, la cual será variable con el tiempo hasta que llegue a estabilizarse después de transcurridos unos segundos o minutos. Una vez estabilizada la resistencia al contacto, hacemos clic en el botón "NEXT".

Se llenan los campos referentes al nombre del proyecto, identificación del núcleo, longitud, diámetro o área, base de tiempo, modo (aritmético, semilogarítmico, logarítmico, entre otros). Se selecciona el parámetro de medición con el cual va a operar el equipo, ya sea voltaje en 3, 6, 9 o 12 [V] o corriente en 0.5, 5, 50 o 500 [μ A].

Una vez definidos todos los parámetros damos clic en “OK” en la pantalla del computador, y una vez terminada la iteración, el equipo arrojará la lectura de la resistividad y cargabilidad, así como de los parámetros medidos en tiempo real del voltaje y la corriente y los errores asociados al voltaje pico y la cargabilidad (ejemplo Tabla 5.4).

Rho (Ohm-m)	69,387.69
Vp (mV)	3,005.697
ErrVp	0.0045
I (µA)	0.191
M	3.489
ErrM	0.012

← **Parámetro usado**
3 [V]

Tabla 5.4 Lectura de la Resistividad y Cargabilidad (muestra 359-15)

El programa también arroja los valores del decaimiento de la cargabilidad en función del tiempo, mostrando una curva de exponencial compuesta por 20 valores (ejemplo Figura 5.10).

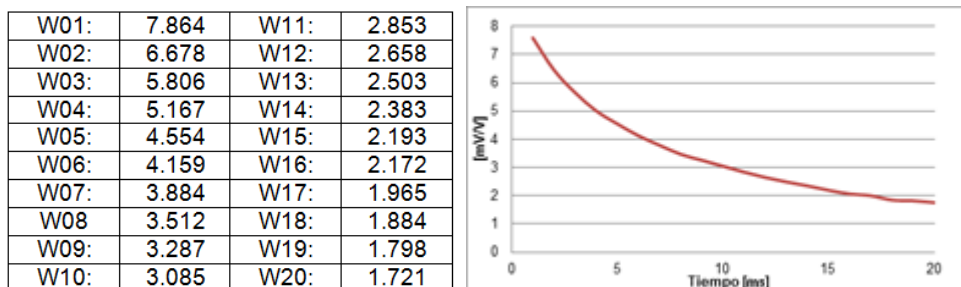


Figura 5.10 Valores y gráfica del Decaimiento de la Cargabilidad (muestra 359-15)

En la siguiente tabla se muestran los valores promedios de la resistividad de cada muestra, bajo las tres condiciones: muestra seca, muestra mojada en agua y muestra mojada en salmuera. Estos promedios se obtuvieron a partir de los valores de resistividad aportados por todos los parámetros de medición: 3, 6, 9 y 12 [V], y 0.5, 5, 50 y 500 [µA], (Apéndice 4: Resistividad y Cargabilidad de las Cinco Muestras, en los Tres Escenarios, Experimento 1).

Resistividad [Ω-m]						
Escenario	Pruebas	Muestras				
		098-11	203-3	230-3	230-6	359-15
Muestra seca	Prueba única	40,664.2	91.4	722,958.9	52,396.6	344,513.9
Muestra mojada en agua	1ra prueba	12,598.3	14.9	340.7	69.7	69,471.4
	2da prueba	10,505.8	14.5	306.5	64.9	125,125.0
Muestra mojada en salmuera	1ra prueba	2,031.9	3.5	9.	3.0	89,067.7
	2da prueba	1,499.9	3.2	8.1	2.8	55,245.7

Tabla 5.5 Valores promedio de Resistividad para las cinco muestras bajo los tres escenarios, Experimento 1

Todas las muestra presentan mayores resistividades estando secas, éstas disminuyen cuando están mojadas en agua y disminuyen más cuando están mojadas salmuera respondiendo a la capacidad conductora de los fluidos que ocupan el espacio poroso y al nivel de saturación de estos dentro de la roca.

Se observa que en las segundas pruebas, (cuando las muestras estuvieron más tiempo sumergidas), la resistividad disminuye, con una excepción para la muestra 359-15 en núcleo mojado en agua, donde tuvo mayor resistividad en la segunda prueba, lo que indica que su índice de saturación era más elevado en la primera (en este escenario se midió en condiciones diferentes al resto) (Tabla 5.5).

Las muestra 359-15 presentó resistividades altas en los tres escenarios., es seguida, aunque con valores significativamente menores, de la muestra 098-11.

Las muestras 230-3 y 230-6 tuvieron resistividades altas en seco, intermedias mojadas en agua, y bajas mojadas en salmuera y muestran un comportamiento parecido entre sí, pero diferente a las demás muestras.

La muestra 203-3 presentó resistividades bajas en los tres escenarios, de valores insignificantes cuando se compara con las muestras 359-15 y 098-11. Esta muestra pertenece a la brecha de impacto y tiene susceptibilidad magnética positiva alta, lo que indica la presencia minerales ferromagnéticos (con contenido de hierro).

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de la resistividad de cada muestra para cada una de las pruebas realizadas. El eje de la resistividad se encuentra en escala logarítmica (base 10) dado el amplio rango de resistividades obtenidas. El primer evento es la medición de la resistividad en seco; los eventos 2 y 3 son con las muestras mojadas en agua, primera y segunda prueba; y los eventos 4 y 5 con las muestras mojadas en salmuera, primera y segunda prueba respectivamente.

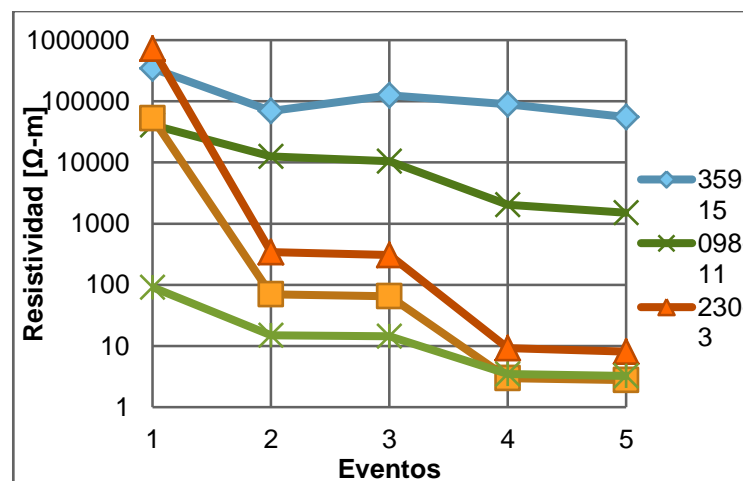


Gráfico 5.1 Resistividad de las cinco muestras en cada una de las mediciones realizadas, Experimento 1

Las muestras 230-3 y 230-6 tienen variaciones muy amplias en su resistividad al pasar de un valor muy elevado cuando las muestras están secas a uno comparativamente bajo cuando éstas están mojadas en agua, de igual forma para cuando están mojadas en salmuera, es decir, presentan las caídas más pronunciadas (Gráfico 5.1).

Esto se puede observar obteniendo un valor relativo al relacionar las resistividades entre los escenarios siguientes:

- Núcleo seco/ Núcleo mojado en agua y
- Núcleo mojado en agua/ Núcleo mojado en salmuera

Núcleo	Núcleo seco/ Núcleo mojado en agua [Ω-m/ Ω-m]	Núcleo mojado en agua/Núcleo mojado en salmuera [Ω-m/ Ω-m]
098-11	3.5	6.5
203-3	6.2	4.4
230-3	2,234.0	37.3
230-6	778.8	23.5
359-15	3.5	1.3

Tabla 5.6 Valores relativos al relacionar la resistividad obtenida entre los escenarios mostrados, Experimento 1

Como se presenta en la tabla, la muestra 230-3 tiene una resistividad en seco miles de veces más grande que mojada en agua, en el caso de la muestra 230-6, este valor es casi ochocientos veces (Tabla 5.6), mientras que las otras muestras no presentan cambios tan pronunciados. Este comportamiento se repite, aunque en menor medida al pasar de una resistividad en núcleo mojado en agua a núcleo mojado salmuera.

Resultados de cargabilidad

En la siguiente tabla se presentan los valores promedio de la cargabilidad, obtenidos del conjunto de parámetros de medición, (Apéndice 4: Resistividad y Cargabilidad de las Cinco Muestras, en los Tres Escenarios, Experimento 1).

Cargabilidad [mV/V]						
Escenario	Pruebas	Muestras				
		098-11	203-3	230-3	230-6	359-15
Muestra seca	Prueba única	6.95	1.75	20.70	0.73	10.98
Muestra mojada en agua	1ra prueba	3.21	24.40	0.86	4.91	3.49
	2da prueba	2.97	11.05	0.74	3.25	5.66
Muestra mojada en salmuera	1ra prueba	0.52	9.38	3.16	6.29	3.56
	2da prueba	0.45	6.93	2.68	5.23	1.96

Tabla 5.7 Valores promedio de Cargabilidad para las cinco muestras bajo los tres escenarios, Experimento 1

En las siguientes gráficas (Gráfico 5.2) se observa el comportamiento individual de la cargabilidad.

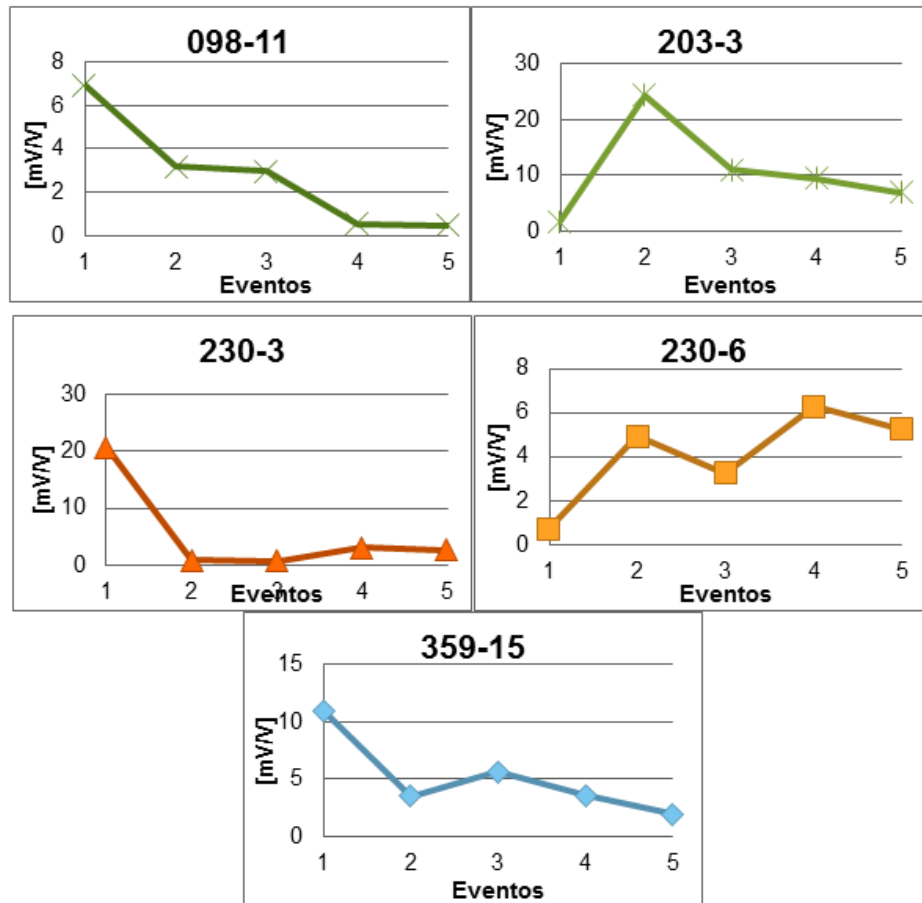


Gráfico 5.2 Comportamientos individuales de la Cargabilidad, Experimento 1

La cargabilidad presenta cambios en su valor bajo las tres condiciones de manera particular para cada muestra. Estos cambios entre escenarios llegan a suceder en direcciones contrarias según las muestras comparadas. La muestra 230-3 tiene un valor alto de resistividad en seco y bajo cuando es mojada en agua, caso contrario la muestra 203-3. Esto se puede atribuir a la composición mineralógica y propiedades físicas de la roca y la interacción que ocurre con los fluidos en el interior de los poros

Se observa en los casos donde se realizaron dos pruebas, que a mayor nivel de saturación (segundas pruebas) la cargabilidad baja levemente.

Comportamiento de la cargabilidad en el dominio del tiempo

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de la cargabilidad en el dominio del tiempo de las cinco muestras, bajo los tres escenarios (núcleo seco arriba, núcleo mojado en agua en el centro y núcleo mojado en salmuera abajo), para cada uno de los parámetros

de cálculo usados (3, 6, 9 y 12 [V] lado izquierdo, y 0.5, 5, 50 y 500 [μ A] lado derecho). (Gráficos 5.3 a 5.7)

Independientemente de su magnitud, las curvas de cargabilidad presentan diferentes comportamientos que dependen de la muestra, del escenario y de los parámetros de cálculo utilizados.

La muestra 098-11 presenta curvas estables en los tres escenarios, y para una misma prueba, independientemente del parámetro de cálculo utilizado, las curvas prácticamente se superponen unas sobre otras, sólo la curva generada con el parámetro 0.5 [μ A], en el escenario núcleo mojado en salmuera, se comporta ligeramente inestable.

Por el contrario, la muestra 203-3 presenta curvas desfasadas entre sí, en los tres escenarios, y la curva de 0.5 [μ A] con un comportamiento inestable e incluso con valores negativos en núcleo mojado en salmuera.

La muestra 230-3 presenta curvas estables y superpuestas en núcleo seco y núcleo mojado en agua, a excepción de la curva de 0.5 [μ A] para el segundo escenario, que se presenta inestable. Las curvas se desfasan en núcleo mojado en salmuera y la inestabilidad de la curva de 0.5 [μ A] se acentúa, seguida de la curva de 5 [μ A].

La muestra 230-6, sólo presenta curvas estables y superpuestas en núcleo seco. En núcleo mojado en agua y núcleo mojado en salmuera las curvas están desfasadas (a mayor voltaje menor corriente) y las curvas de corriente mencionadas se presentan erráticas.

En las muestras 203-3, 230-3 y 230-6, se observa que las curvas obtenidas con voltaje se desfasan entre sí, pero son estables, y mientras mayor sea el valor de éste las curvas se desplazan hacia abajo, es decir, a mayor voltaje la cargabilidad es menor. La curva generada con corriente en 0.5 [μ A] se comporta erráticamente, esta inestabilidad se observa en menor medida en la curva de 5 [μ A] y aun ligeramente en la curva de 50 [μ A] (Gráfico 5.8), las curvas se estabilizan a una mayor corriente.

La inestabilidad de las curvas obtenidas con corriente se acentúa al pasar de núcleo seco a núcleo mojado en agua y de núcleo mojado en agua a núcleo mojado en salmuera.

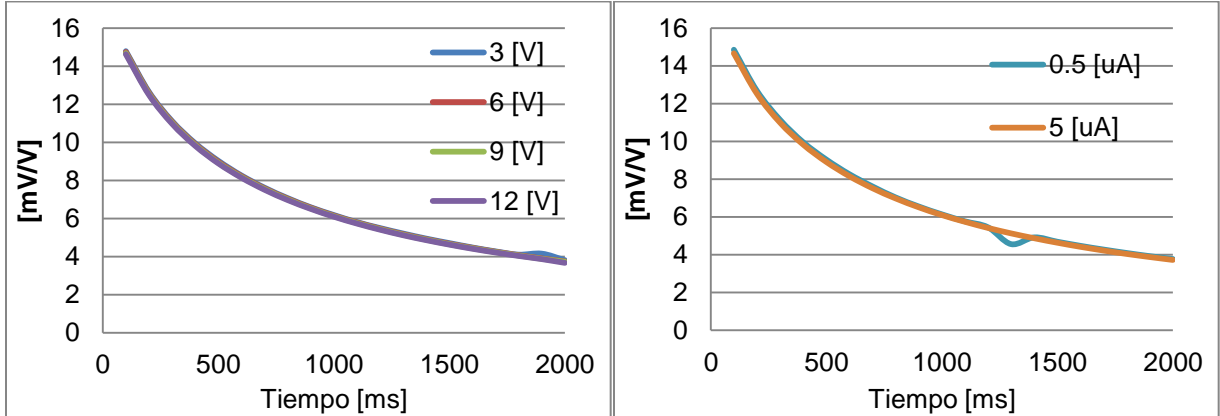
Se observa que las curvas obtenidas con voltaje presentan valores por debajo de las obtenidas con corriente y son más planas.

La muestra 359-15, al igual que la muestra 098-11, tiene curvas estables, y para una misma prueba las curvas están prácticamente superpuestas entre sí. En esta muestra en particular, sólo la curva generada con el parámetro de 3 [V] se presenta ligeramente inestable en los tres escenarios.

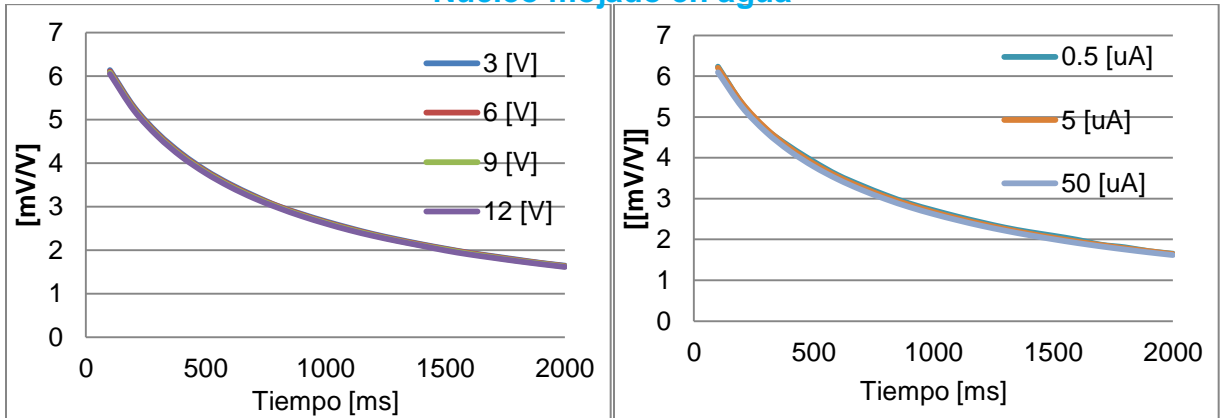
Curvas de decaimiento de la Cargabilidad

Muestra 098-11

Núcleo seco



Núcleo mojado en agua



Núcleo mojado en salmuera

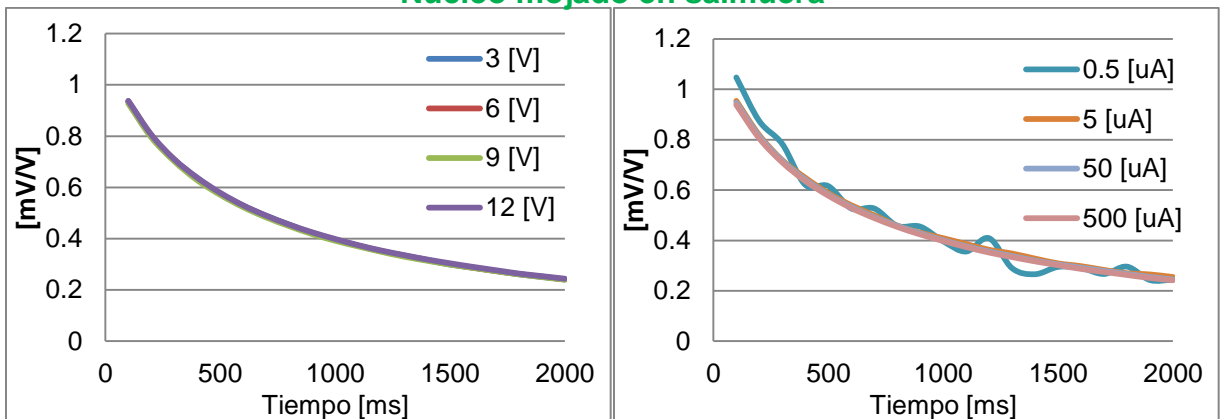
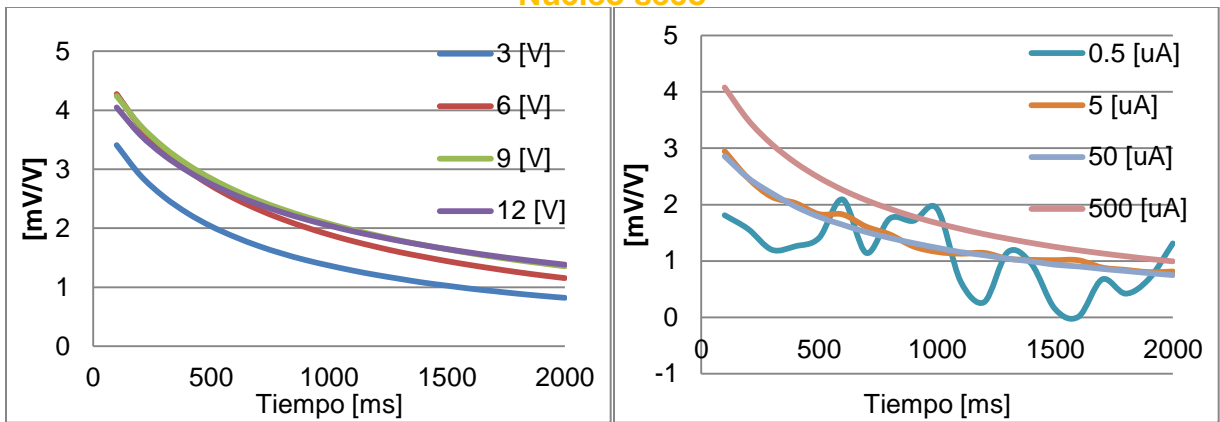


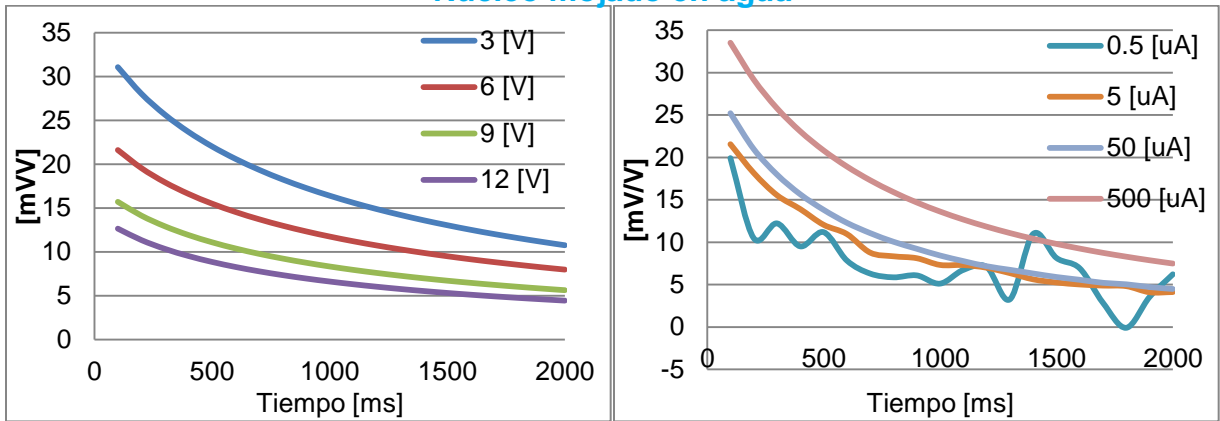
Gráfico 5.3 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 098-11

Muestra 203-3

Núcleo seco



Núcleo mojado en agua



Núcleo mojado en salmuera

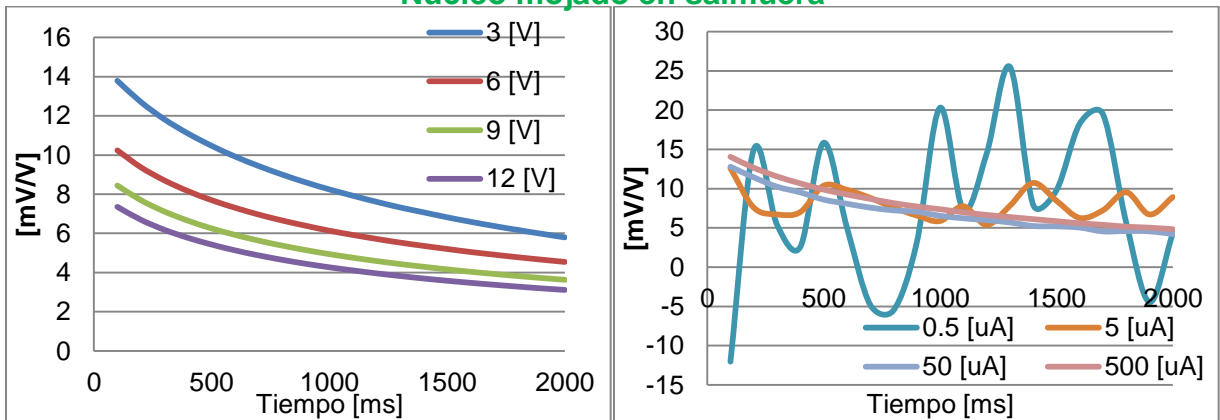
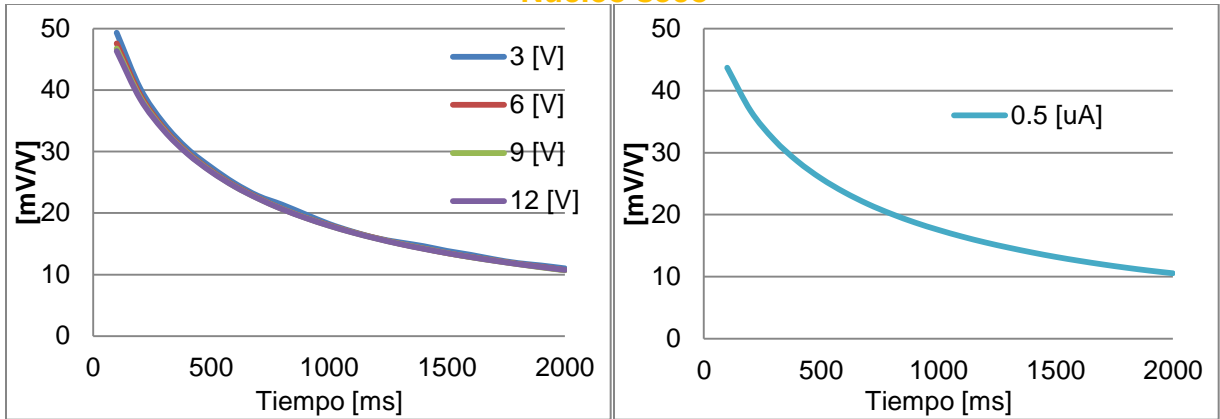


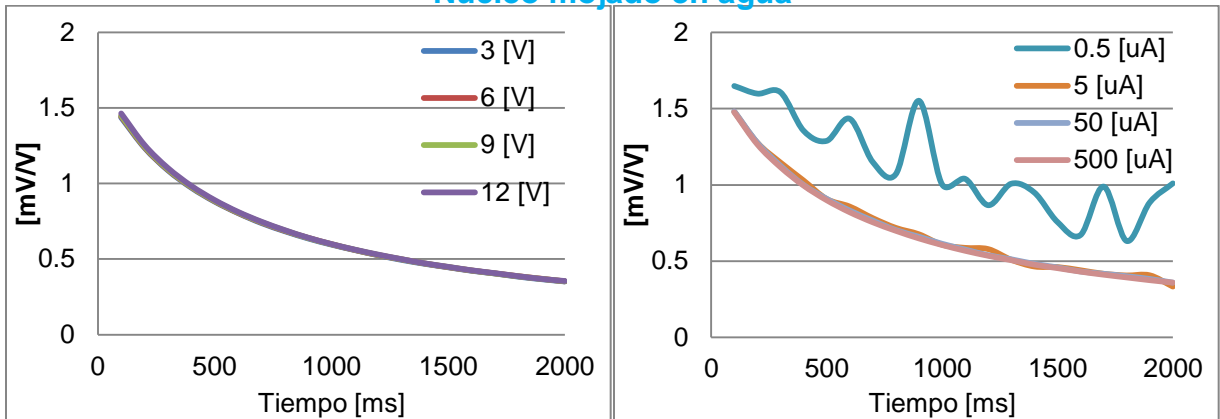
Gráfico 5.4 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 203-3

Muestra 230-3

Núcleo seco



Núcleo mojado en agua



Núcleo mojado en salmuera

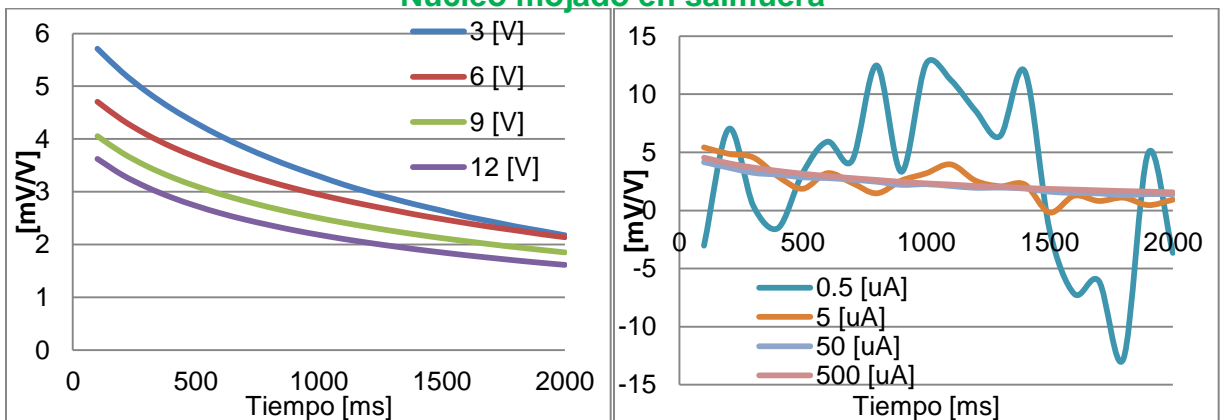
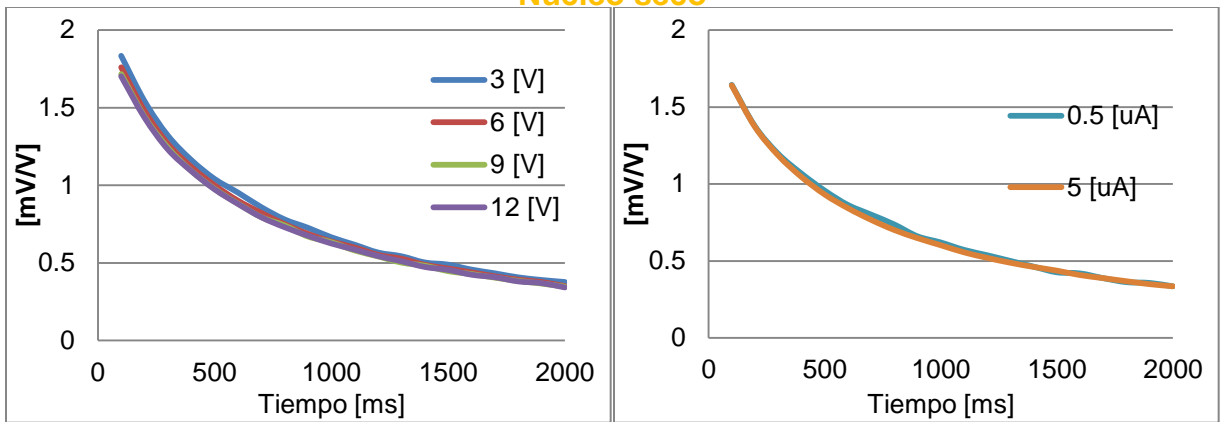


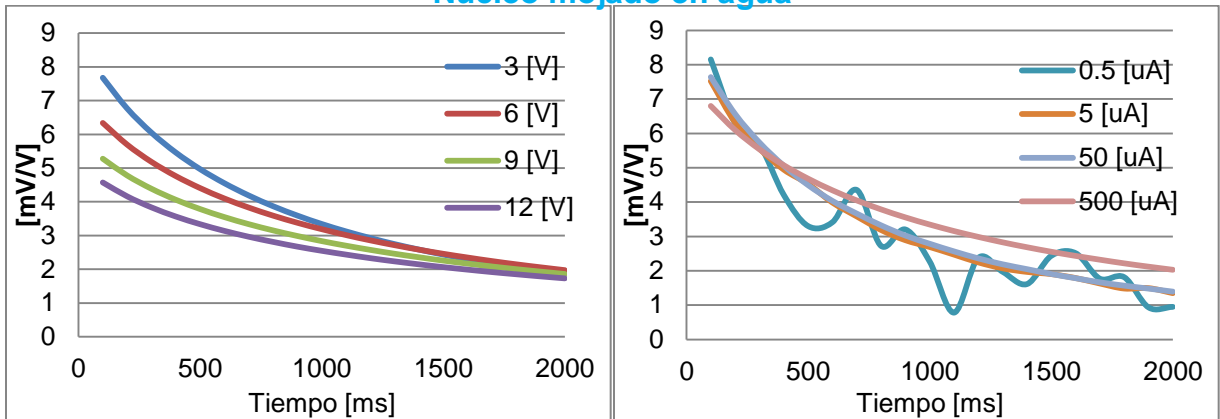
Gráfico 5.5 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 230-3

Muestra 230-6

Núcleo seco



Núcleo mojado en agua



Núcleo mojado en salmuera

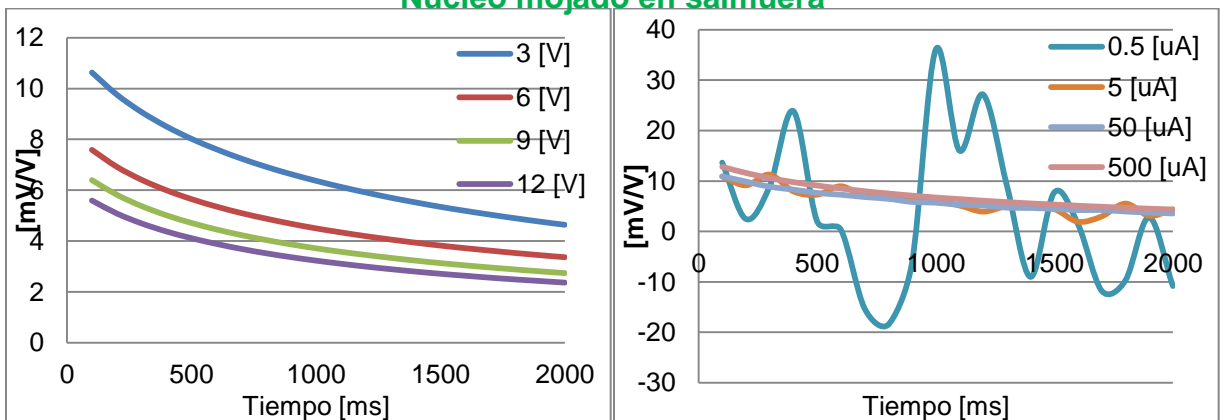
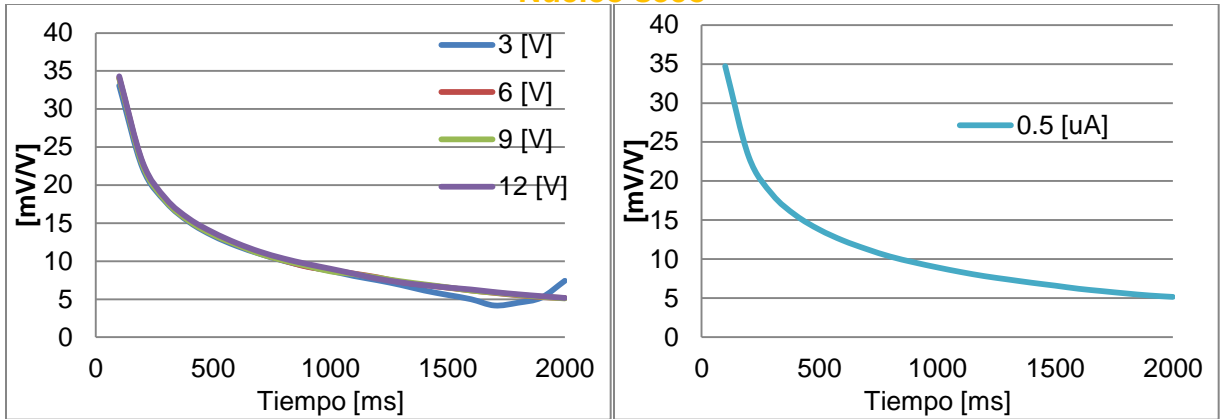


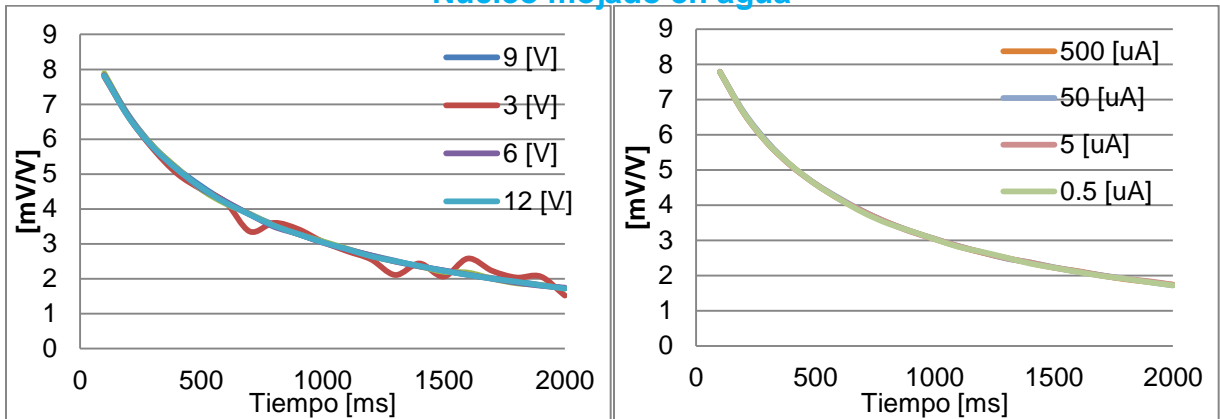
Gráfico 5.6 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 230-6

Muestra 359-15

Núcleo seco



Núcleo mojado en agua



Núcleo mojado en salmuera

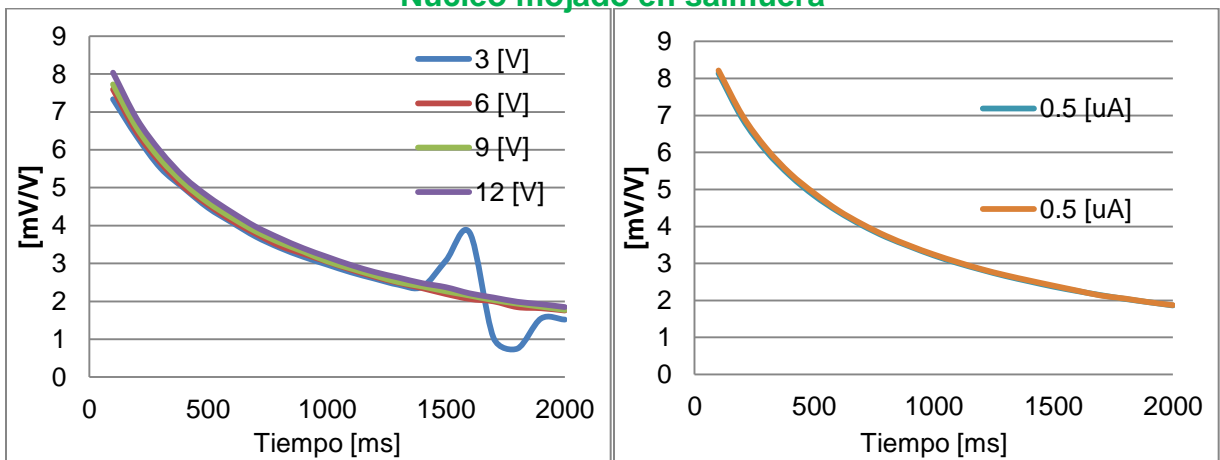


Gráfico 5.7 Decaimiento de la Cargabilidad en muestra seca (arriba), mojada en agua (centro) y mojada en salmuera (abajo), con Voltaje (izquierda) y con Corriente (derecha), Muestra 359-15

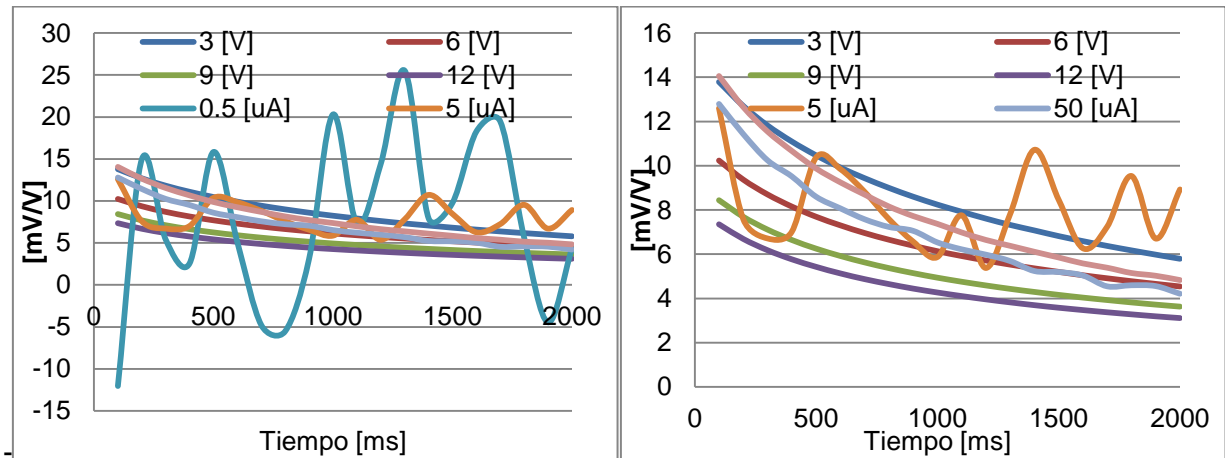


Gráfico 5.8 Curva de decaimiento de la cargabilidad, Núcleo mojado en salmuera, todas las curvas (izquierda), sin curva de 0.5 [uA] (derecha), Muestra 203-3

5.3 Experimento 2

Para este segundo experimento se seleccionaron diez cajas de núcleo del pozo Yaxcopoil-1 en orden consecutivo que guardan el intervalo de núcleo de 900[m] - 921 [m]. De este intervalo se obtuvieron 107 muestras para las cuales se obtuvo la resistividad con el equipo SCIP, para diferentes parámetros de medición (voltaje y corriente), en núcleo seco y tras haber permanecido en salmuera durante un periodo de cuatro días, y se sacó un valor promedio de resistividad para cada caso.

También se usaron los datos de la susceptibilidad magnética, obtenidos con el Magnetic Susceptibility Meter, para el intervalo de núcleo examinado. El total de mediciones realizadas es de 206, a su vez, de esos datos se extrajeron los más próximos a las profundidades medias de las muestras.

En este intervalo los fragmentos de núcleo se encontraban en su mayoría sin cortes paralelos transversales necesarios para poder ser usados en el equipo SCIP, por lo que se procedió a realizarlos mediante la utilización de una sierra especial para cortar núcleos.

Los núcleos se cortaron de un tamaño preferentemente entre los 10 y 12 [cm], sin embargo, con el fin de poder utilizar la mayor cantidad de núcleo disponible, hubo fragmentos que se cortaron de mayor y de menor longitud, además de los que ya presentaban cortes, así la longitud de las diferentes piezas está en un rango de 5- 19 [cm]. De este proceso resultaron 107 muestra útiles.

Después de cortar y obtener las muestras se obtuvo la profundidad de cada una de ellas con respecto a la columna total del núcleo, tanto del tope como del fondo. Para ello sirvió de guía la profundidad del tope del intervalo correspondiente a cada una de las diez cajas seleccionadas, mostrado en la etiqueta pegada a un costado, a este valor se suma la distancia hasta el tope de cada muestra obtenida.

En las siguientes imágenes se muestra el intervalo del núcleo de 900 a 921 [m], alineados de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, cada imagen muestra el contenido de cada caja, así como la profundidad del tope y el fondo (Figura 5.11).

Las piezas seleccionadas se indican con una etiqueta de color rojo mostrando la distribución dentro del intervalo seleccionado, (algunas muestras fueron humedecidas al ser cortadas y por eso se notan con un tono oscuro en las fotos).



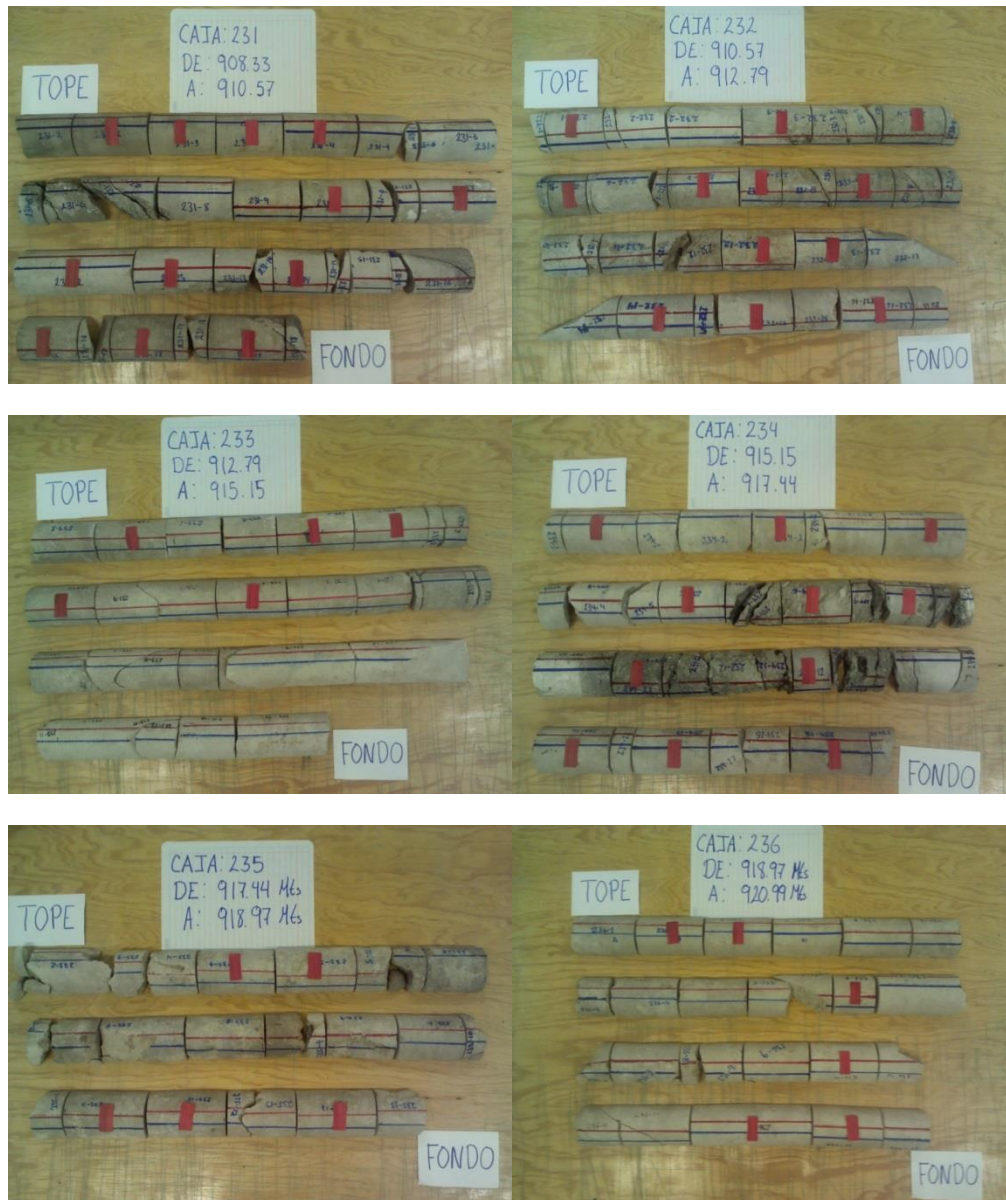


Figura 5.11 Intervalo de núcleo del pozo Yaxcopoil-1 (899.7 a 920.99 m) contenido dentro de las cajas 227 a 236, Experimento 2

No todas las piezas tienen el corte longitudinal (que divide al núcleo en dos) hecho exactamente en el centro (del círculo), de tal forma que las caras transversales de las muestras no son perfectamente semicirculares y no se puede obtener el área más aproximada con simplemente calculando la mitad del área de un círculo, el área transversal es un valor usado en el cálculo de la resistividad y es un dato pedido por el programa del sistema SCIP, en este caso es necesario calcular el área de un segmento circular (Figura 5.12).

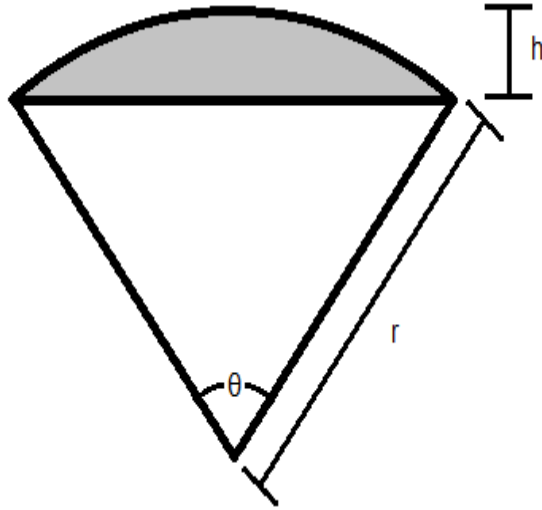


Figura 5.12 Representación esquemática de un segmento circular

En el diagrama anterior se muestran tres variables que son necesarias para calcular el área del segmento, el ángulo θ , el radio r y la altura h del segmento circular.

El área del segmento circular se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A = \frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi * \theta}{180} - \text{sen}\theta \right) \quad (34)$$

θ es un ángulo que se crea cuando el corte se desvía del centro del círculo

h es la altura del segmento circular o cara transversal del núcleo y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h = r \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (35)$$

usando la identidad trigonométrica:

$$\cos \frac{\theta}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}} \quad (36)$$





















sustituyendo y e despejando θ obtenemos:


























$$\theta = \cos^{-1} \left[\left(\frac{-h}{r} + 1 \right)^2 * 2 - 1 \right] \quad (37)$$


























A todas las piezas se les midió la altura “h” de ambas caras transversales, dado que estas no siempre eran iguales, el diámetro de todas las piezas es de 6 [cm] por lo que el radio es de 3 [cm].









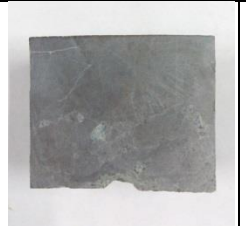







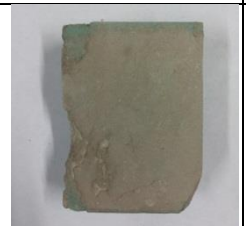



A las piezas que tienen las caras transversales con diferente área, para poder usar el valor requerido para poder calcular la resistividad de las muestras, las áreas se promedian y este valor es usado en el sistema del equipo SCIP.

Las piezas seleccionadas se muestran a continuación (Tabla 5.8), indicando su número de identificación y la profundidad que les corresponde dentro del intervalo. (Las muestras se les humedecieron ligeramente con agua para obtener un mayor contraste, la coloración azul es debido a que la muestra se manchó con el sulfato de cobre)

				
899.760 [m] 227-1	899.851 [m] 227-1 (A)	899.954 [m] 227-2	900.712 [m] 227-5	900.994 [m] 227-7
				
901.149 [m] 227-8	901.248 [m] 227-8 (A)	901.390 [m] 227-9	901.523 [m] 227-10	901.687 [m] 227-11
				
901.790 227-11 (A)	901.950 [m] 228-1	902.124 [m] 228-3	902.249 [m] 228-3 (A)	902.381 [m] 228-4
				
902.610 [m] 228-6	902.796 [m] 228-7	903.070 [m] 228-9	903.160 [m] 228-9 (A)	903.330 [m] 228-10

				
903.700 [m] 228-13	903.885 [m] 228-14	904.004 [m] 229-1	904.349 [m] 229-3	904.504 [m] 229-4
				
904.600 [m] 229-5	904.759 [m] 229-6	904.919 [m] 229-7	905.175 [m] 229-9	905.246 [m] 229-9 (A)
				
905.375 [m] 229-10	905.441 [m] 229-11	905.599 [m] 229-12	905.768 [m] 229-13	906.123 [m] 230-1
				
906.324 [m] 230-2	906.432 [m] 230-3	906.705 [m] 230-5	906.858 [m] 230-6	907.011 [m] 230-7
				
907.272 [m] 230-8	907.464 [m] 230-11	907.789 [m] 230-12	907.975 [m] 230-13	908.076 [m] 230-14

				
908.204 [m] 230-15	908.459 [m] 231-2	908.555 [m] 231-3	908.650 [m] 231-3 (A)	908.746 [m] 231-4
				
909.404 [m] 231-9	909.570 [m] 231-11	909.698 [m] 231-12	909.830 [m] 231-13	909.995 [m] 231-14
				
910.278 [m] 231-16	910.401 [m] 231-17	910.531 [m] 231-18	910.624 [m] 232-1	910.914 [m] 232-3
				
911.124 [m] 232-4	911.229 [m] 232-5	911.419 [m] 232-7	911.499 [m] 232-8	911.650 [m] 232-9
				
912.085 [m] 232-12	912.189 [m] 232-13	912.535 [m] 232-14	912.680 [m] 232-15	912.844 [m] 232-16

				
912.945 [m] 233-1	913.214 [m] 233-2	913.321 [m] 233-2 (A)	913.480 [m] 233-3	914.400 [m] 233-4
				
915.230 [m] 234-1	915.480 [m] 234-2	915.682 [m] 234-3	915.934 [m] 234-5	916.105 [m] 234-6
				
916.230 [m] 234-8	916.451 [m] 234-11	916.684 [m] 234-12	916.950 [m] 234-16	917.079 [m] 234-17
				
917.280 [m] 234-18	917.710 [m] 235-4	917.821 [m] 235-5	917.997 [m] 235-6	918.290 [m] 235-8
				
918.469 [m] 235-9	918.558 [m] 235-10	918.730 [m] 235-11	918.830 [m] 235-12	919.020 [m] 235-13





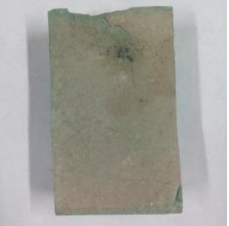

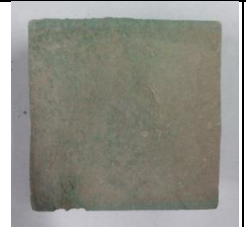

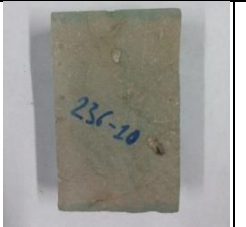


				
919.123 [m] 236-1	919.226 [m] 236-2	919.330 [m] 236-2 (A)	919.425 [m] 236-3	919.669 [m] 236-4
				
919.775 [m] 236-5	919.970 [m] 236-6	920.428 [m] 236-9	920.529 [m] 236-10	920.906 [m] 236-12
				
921.044 [m] 236-13				

Tabla 5.8 Muestras de núcleo del Intervalo medido, Experimento 2

El intervalo examinado se encuentra en la unidad G, descrita más arriba, y se encuentra justo por debajo de la brecha de impacto o unidad H.

Está compuesto en su mayoría por roca caliza dolomítica de composición homogénea (mudstone), que aparece en todo en intervalo y que se ve interrumpida por dos diques de brecha suevita alrededor de los 909 y 916 [m].

La intrusión de estos diques interrumpe la continuidad de los sedimentos y produce la alteración térmica de las calizas dolomíticas adyacentes, a mármol.

El material de las piezas de la brecha de 909 [m] y suprayacentes es de una mayor dureza y solidez y éstas son más lisas.

El dique de brecha suevita a los 916 [m] irrumpe físicamente y provoca una inclinación de los sedimentos de la secuencia estratigráfica que mantiene la continuidad de la sedimentación por encima y por debajo del dique (Figura 5.13).

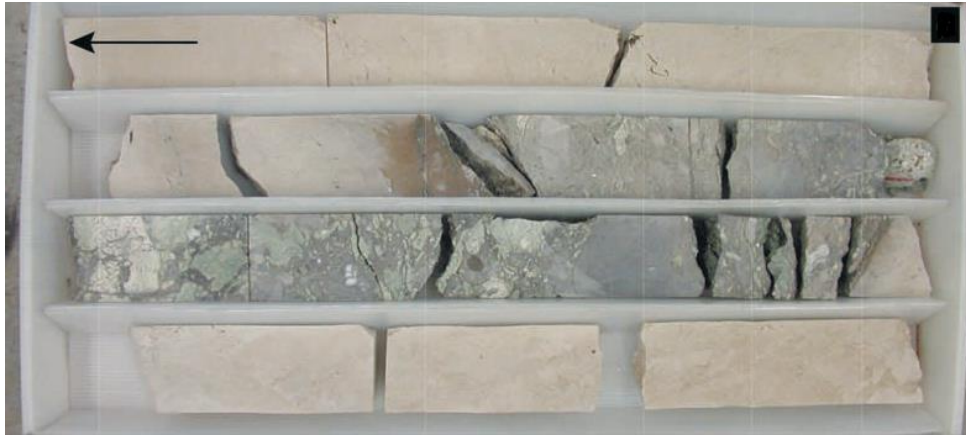


Figura 5.13 Caja 234 de 915.15 a 917.44 [m], con dique de brecha suevita entre calizas dolomíticas.

En esta brecha, el origen de altas temperaturas se indica mediante microesferas vibradas, recristalizadas y alteradas, vitroclastos y fragmentos de roca fundida (Figura 5.14).

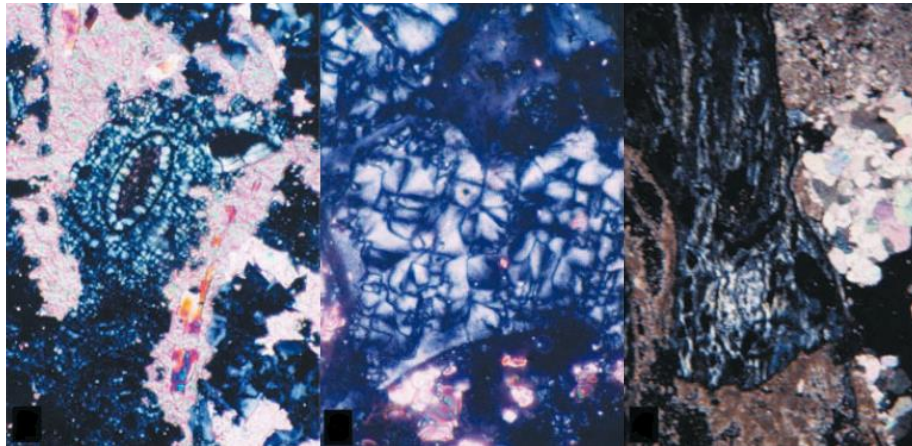


Figura 5.14 Fotomicrografía a los 916 [m] (aproximadamente) Fragmento de silicato fundido completamente desvitrificado con textura microesferulítica (izquierda); Clasto de fusión desvitrificado (centro); Fragmento de fusión con textura fluida, parcialmente desvitrificado y fina caliza dolomítica metamorfoseada térmicamente a mármol cristalino grueso (derecha).

En el tope del intervalo la roca comienza teniendo una textura homogénea, yendo hacia abajo el material exhibe una paulatina alteración térmica y con tendencia a marmolizarse (metamorfismo, aumenta el grado de cristalización), aparentemente debido a la cercanía con zonas de altas temperaturas. Alrededor de los 901, 904-905 y 906 [m] de profundidad, aparecen texturas caóticas de material fundido entremezclado (roca fundida), con cambios en su coloración hacia tonos más oscuros y se puede observar la presencia de cristales a simple vista relleno de porosidad secundaria en caverna y fracturas.

Una alternancia de texturas homogéneas con texturas de material fundido mezclado, de la misma matriz de roca se da hasta el contacto con el dique de brecha a los 907 [m] que es una roca más compacta y dura con superficies más lisas, y que estuvo expuesta a altas temperaturas y presiones. La caliza dolomítica existente sufrió cambios visibles de metamorfismo (con tendencia a la marmolización de la roca), también se observa presencia masiva de cristales grandes rellenando el interior de grandes espacios cavernosos.

Por debajo de este dique la roca caliza dolomítica continua pocos metros con una textura tipo packstone (conglomerado, roca triturada) y posteriormente de textura homogénea hasta encontrarse con el segundo dique de brecha a los 916 [m], la roca inmediatamente por arriba del dique exhibe una paulatina alteración térmica y endurecimiento. La brecha en sí parece tener una constitución mineralógica distinta a la roca caliza, con una mezcla caótica de roca dura de color gris oscuro, con material arcilloso en una variedad de colores verdosos y amarillos (vitroclastos) que vuelven a la roca deleznable, la roca al fondo del dique de brecha, libre de impurezas arcillosas, es una roca muy dura y compacta, por debajo de éste dique nuevamente aparece la misma roca matriz caliza dolomítica con una textura homogénea hasta el fondo del intervalo, sin embargo muchas muestras tienen superficie carcomida o disuelta con presencia de caverna y una constitución deleznable y bofa.

Resultados de la densidad y porosidad de las muestras

La densidad y porosidad se obtuvieron mediante los métodos anteriormente expuestos (Apéndice 5: Longitud, Área, Densidad y Porosidad Vs Profundidad de las Muestras, Experimento 2).

La densidad promedio es de 2.43 [g/cm³] y la porosidad promedio es de 6.85 %, considerando la totalidad de las muestras. A continuación, se muestran las gráficas de densidad y porosidad contra la profundidad

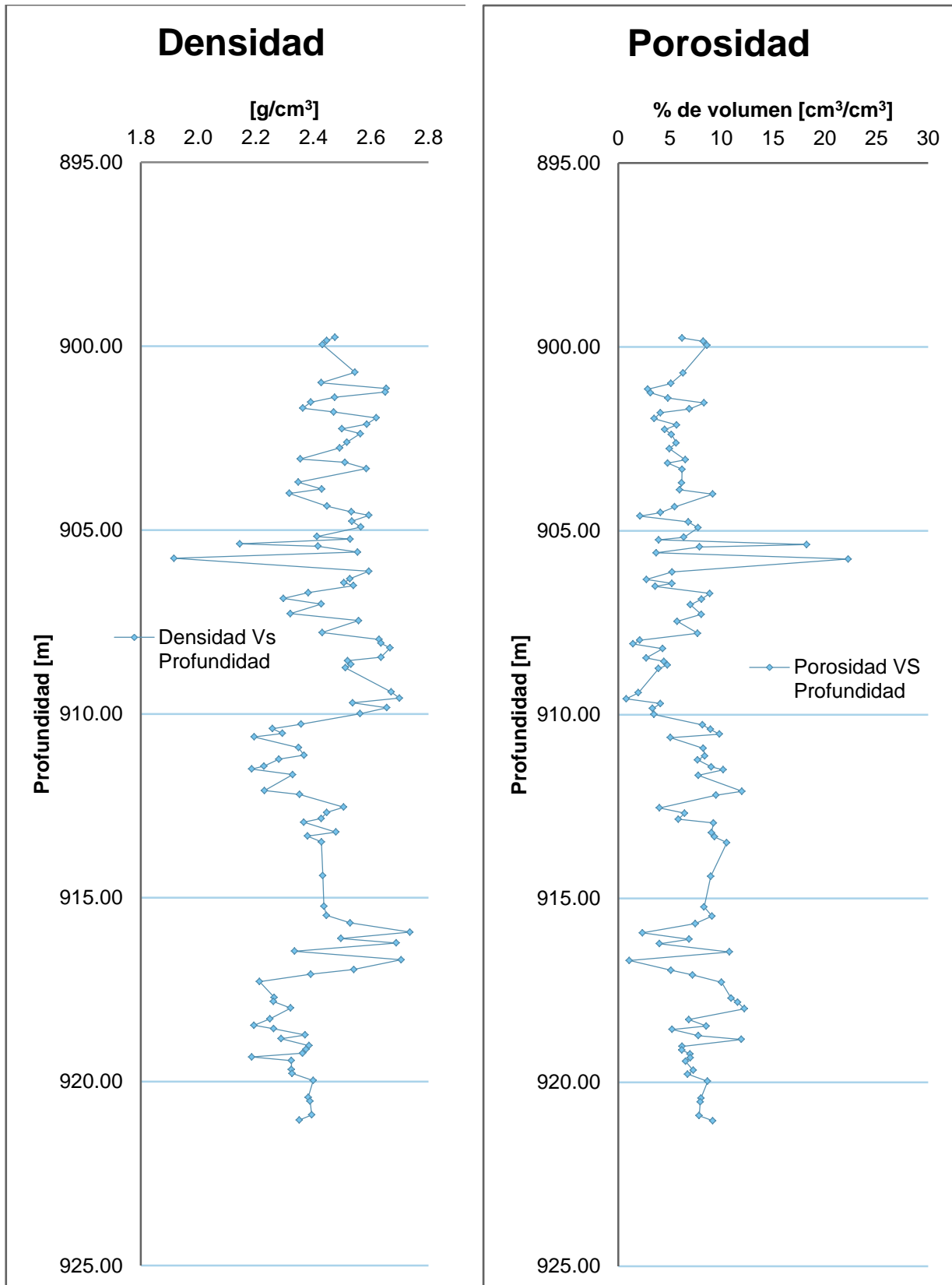


Gráfico 5.9 Registros de Densidad y Porosidad en el Intervalo, Experimento 2

De acuerdo con las gráficas de densidad y porosidad (Gráfico 5.9) se puede observar cómo estas dos propiedades de son recíprocas entre sí. En la mayoría de los casos, las muestras menos densas son las que tienen a su vez mayor porosidad. Esto se puede apreciar más claramente en las muestras 229-10 y 229-13 (Figura 5.15), que son las dos muestras con la menor densidad, con 2.14 y 1.87 [g/cm³] y a su vez cuentan con la mayor porosidad con 18.25 y 29.82 %, respectivamente. Estas muestras tienen una textura al tacto más áspera y son más bofas y en el caso de la muestra 229-13 tiene poca dureza y es deleznable.



Figura 5.15 Muestras de mayor Porosidad y menor Densidad, Muestra 229-10 (izquierda) y Muestra 229-13 (derecha), Experimento 2

Por lo general las rocas de la matriz caliza dolomítica presentan porosidades por arriba del 5% y hasta un máximo de 22.3 % y densidades por debajo de 2.6 [g/cm³] y un mínimo de 1.9 [g/cm³]. Las rocas más densas, por arriba de 2.6 [g/cm³], y a su vez de baja porosidad, son aquellas que presentan cierto grado de alteración térmica, como las pertenecientes a la brecha de los 907 - 909 [m], la roca suprayacente e inferior de la brecha a los 916 [m] y las que presentan texturas de roca fundida y cambios en su color hacia tono más oscuros.

Las muestras con las densidades más bajas, por debajo de 2.3 [g/cm³], por lo regular tienen porosidades superiores. El promedio de porosidad para éstas muestras es de 10.6 %.

Las piezas con densidades entre los 2.3 a 2.4 [g/cm³] tiene una porosidad promedio de 8.1 %, de los 2.4 a 2.5 [g/cm³] tienen una porosidad promedio de 6.6 % y de los 2.5 a 2.6 [g/cm³] una porosidad promedio de 4.9 %

Las piezas con las densidades más altas, por encima de 2.6 [g/cm³], presentan las porosidades más bajas, éstas presentan valor promedio de porosidad de 2.5 %.

Sin embargo, no siempre las muestras se ajustan a estos rangos y promedios. La muestra 232-1 (Figura 5.16) tiene una densidad muy baja con 2.19 [g/cm³], pero con una porosidad también baja de 5.06 %, en esta muestra se puede apreciar un cambio de facie de roca bien consolidada y dura a roca deleznable y con textura áspera.

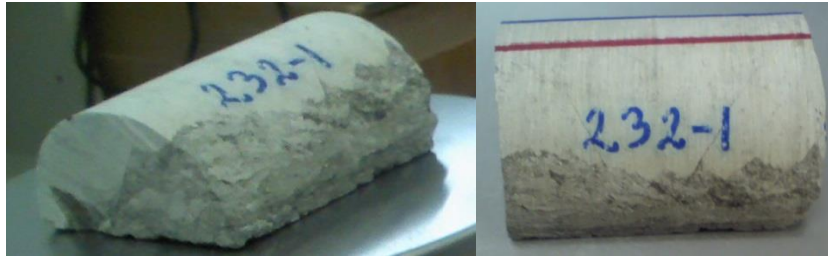


Figura 5.16 Muestra 232-1, con un cambio de facie, Experimento 2

La muestra 231-11(Figura 5.17), es la muestra con la menor porosidad de 0.78 % y una de las densidades más altas con 2.70 [g/cm³], pertenece al dique de brecha suevita a la cota de 909 [m], y es una roca dura y lisa al tacto y se puede apreciar la alteración de la caliza dolomítica a mármol, producto de altas temperaturas.



Figura 5.17 Muestra de menor Porosidad, Muestra 231-11, Experimento 2

La pieza con la mayor densidad de todas es la muestra 234-5 (Figura 5.18) con 2.74 [g/cm³] y una porosidad de 2.34, % y se encuentra justo por encima del dique de brecha suevita a la cota de 916 [m], y es una roca más dura y lisa que las piezas inmediatamente por encima de ésta.



Figura 5.18 Muestra de mayor Densidad, Muestra 234-5, Experimento 2

La muestra 234-12 (Figura 5.19) es la pieza inferior que pertenece a la brecha suevita a la cota de 916 [m], con una porosidad de 1.08 % y densidad de 2.7 [g/cm³], igualmente presenta mayor dureza que la mayoría de las muestras y es lisa al tacto.

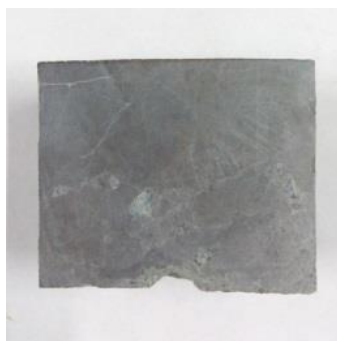


Figura 5.19 Muestra inferior del dique de brecha suevita con alta Densidad y baja Porosidad, Muestra 234-12, Experimento 2

Otras piezas con densidades altas y porosidades bajas son las muestras 227-8 y 227-8 (A) (Figura 5.20), con 2.65 [g/cm³] de densidad para ambas muestras y porosidades de 2.85 y 3.13 % respectivamente y son rocas que muestran una textura producto de la alteración térmica en donde sus minerales aparecen mezclados.



Figura 5.20 Ejemplo de muestras de alta Densidad y baja Porosidad, Muestra 227-8 (izquierda) y Muestra 227-8 (A) (derecha), Experimento 2

Resultados de la resistividad de las muestras

El siguiente gráfico muestra una comparación de las resistividades de las muestras estando secas (amarillo) y mojadas en salmuera (verde), donde se puede observar el desplazamiento hacia menores resistividades cuando los núcleos están mojados (Gráfico 5.10). Nótese que el gráfico sólo muestra valores de resistividad hasta los 800 [Ω -m], dejando por fuera a la muestra 234-12 a los 916.7 [m] con una resistividad en seco de 1,976.7 [Ω -m].

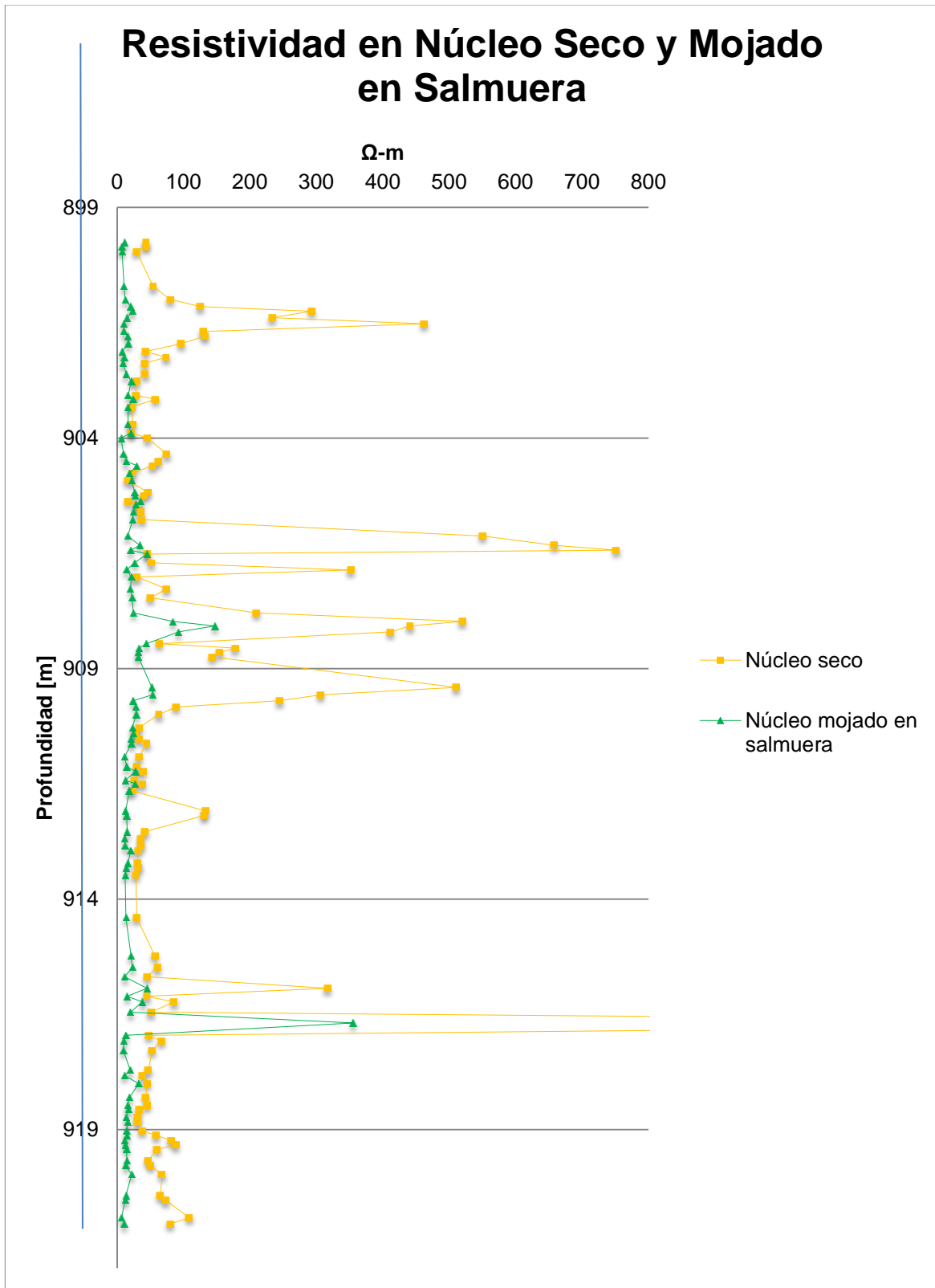


Gráfico 5.10 Registros de Resistividad en muestras secas y mojadas en salmuera del Intervalo, Experimento 2

Resistividad en núcleo seco

Los valores medios de resistividad de las muestras, medidas estando secas y tras permanecer cuatro días sumergidas en salmuera se presentan en el Apéndice 6: Resistividad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2.

Las muestras tienen resistividades que se ajustan a una tendencia que sólo es interrumpida por picos de resistividades altas (Gráfico 5.10, registro en núcleo seco). Sin tomar en cuenta estos picos de valores altos, las resistividades rondan un promedio de 47 [Ω -m].





Las resistividades entran en el siguiente rango (15.9 - 1,976.8 [Ω -m]), que corresponden a las piezas 229-7 y 234-12 respectivamente.

La mayoría de las piezas tiene resistividades menores a 50 [Ω -m] con 53 piezas; con resistividades entre los 50 y 100 [Ω -m] hay 29 piezas; por encima de los 100 [Ω -m] y hasta el valor de mayor resistividad, 25 piezas.

En general, las muestras que tienen resistividades por debajo de los 100 [Ω -m] pertenecen a la roca matriz caliza dolomítica, mientras que se observan picos o incrementos en aquellas muestras pertenecientes o cercanas a las brechas y que presentan alteración térmica, como por ejemplo las muestras a los 901 [m], la brecha de los 907 a 909 [m] y la parte superior e inferior de la brecha de los 916 metros.

Alrededor de los 901 [m] se presentan los primeros picos de resistividad por encima o muy próximas a los 100 [Ω -m], donde la roca se compone material fundido mezclado producto de alteraciones térmicas y mecánicas.

A continuación, se presentan la resistividad de estas piezas junto con su densidad y porosidad y una imagen de cada muestra (Tabla 5.9).

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm^3]	Porosidad [%]
227-8	901.15	125.27	2.65	2.85
227-8 (A)	901.25	292.82	2.65	3.13
227-9	901.39	233.43	2.47	4.81
227-10	901.52	462.34	2.39	8.32
227-11	901.69	129.60	2.36	6.89
227-11 (A)	901.79	132.51	2.47	4.10
228-1	901.95	96.63	2.62	3.48
				
901.149 [m] 227-8	901.248 [m] 227-8 (A)	901.390 [m] 227-9	901.523 [m] 227-10	

		
901.687 [m] 227-11	901.790 227-11 (A)	901.950 [m] 228-1

Tabla 5.9 Muestras que presentan los primeros picos de alta resistividad, Experimento 2

También encontramos resistividades altas a la profundidad de 906 metros en las muestras pertenecientes a la caja 230 (Tabla 5.10).

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm^3]	Porosidad [%]
230-1	906.12	550.54	2.59	5.21
230-2	906.32	658.55	2.53	2.73
230-3	906.43	751.51	2.51	5.21
230-6	906.86	351.64	2.29	8.06





			
906.123 [m] 230-1	906.324 [m] 230-2	906.432 [m] 230-3	906.858 [m] 230-6

Tabla 5.10 Muestras de la caja 230 que también presentaron altas resistividades, Experimento 2

Las muestras del dique de brecha y próximas, alrededor de los 907-909 [m] que son rocas más sólidas y de textura más lisa al tacto, también presentan picos de alta resistividad (Tabla 5.11), con excepción de la muestra 231-2 con una resistividad relativamente baja de 63.87 [Ω -m].

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm^3]	Porosidad [%]
230-12	907.79	209.78	2.43	7.69
230-13	907.98	520.08	2.63	2.09
230-14	908.08	440.90	2.63	1.44
230-15	908.20	411.47	2.67	4.30
231-2	908.46	63.87	2.64	2.71
231-3	908.56	177.81	2.52	4.43
231-3 (A)	908.65	154.52	2.53	4.76
231-4	908.75	143.21	2.51	3.90













231-9	909.40	510.59	2.67	1.95
231-11	909.57	306.20	2.70	0.78
231-12	909.70	244.48	2.54	4.10
231-13	909.83	88.84	2.66	3.33
				
907.789 [m] 230-12	907.975 [m] 230-13	908.076 [m] 230-14	908.204 [m] 230-15	
				
908.459 [m] 231-2	908.555 [m] 231-3	908.650 [m] 231-3 (A)	908.746 [m] 231-4	
				
909.404 [m] 231-9	909.570 [m] 231-11	909.698 [m] 231-12	909.830 [m] 231-13	

Tabla 5.11 Muestras con alta resistividad del dique de brecha entre los 907 y 909 [m], Experimento 2

Las muestras pertenecientes a la parte superior e inferior del dique de brecha de los 916 metros tienen altas resistividades, mientras que el material al interior de la brecha, que se compone de roca consolidada y material verdoso deleznable (vitroclastos), presenta resistividades por debajo de los 100 [Ω -m] (Tabla 5.12). La muestra 234-12 presenta la resistividad más alta de todas las muestras, (las imágenes presentan un tono oscuro ya que su superficie fue ligeramente humedecida con agua, como se hizo con todas, pero estas absorbieron mayor humedad).

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm^3]	Porosidad [%]
234-5	915.93	316.99	2.74	2.34
234-6	916.11	44.91	2.50	6.87
234-8	916.23	85.60	2.69	3.99
234-11	916.45	51.12	2.33	10.76
234-12	916.68	1976.75	2.71	1.08

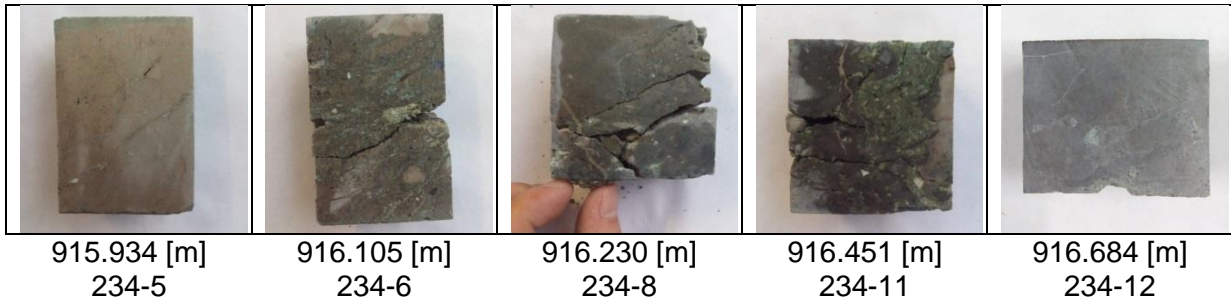


Tabla 5.12 Muestras del dique de brecha suevítica y suprayacente a los 916 [m], Experimento 2

Muestras con altas resistividades (por encima de los 100 [Ω -m] pero que tienen una base de matriz caliza dolomítica son las siguientes (

Tabla 5.13).

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm ³]	Porosidad [%]
232-12	912.085	133.33	2.23	11.98
232-13	912.189	130.92	2.35	9.46
236-12	920.906	108.68	2.39	7.83

912.085 [m] 232-12	912.189 [m] 232-13	920.906 [m] 236-12

Tabla 5.13 Muestras de roca caliza dolomítica no alterada térmicamente o con mínima alteración que presentaron resistividad por encima de los 100 [Ω -m], Experimento 2

Por otra parte, las muestras con las resistividades más bajas son la 229-7 y 229-10 con 15.9 y 16.6 [Ω -m] respectivamente. Algunos ejemplos de muestras con resistividades por debajo de los 100 [Ω -m] y que pertenecen a la roca matriz caliza dolomítica se muestran a continuación.

Se seleccionaron piezas por encima, por debajo y entre brechas, que representan a la roca matriz caliza dolomítica y que tienen una variedad de resistividades, desde las más bajas hasta las cercanas a los 100 [Ω -m] (Tabla 5.14).

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad [Ω -m]	Densidad [g/cm ³]	Porosidad [%]
227-1	899.76	43.72	2.47	6.18
228-13	903.70	23.87	2.35	6.14
229-7	904.92	15.94	2.56	7.72
230-8	907.27	74.53	2.32	8.04
232-4	911.12	29.69	2.37	8.37
234-1	915.23	56.99	2.44	8.31
236-2 (A)	919.33	88.48	2.19	6.99
236-9	920.43	64.90	2.38	8.01









			
899.760 [m] 227-1	903.700 [m] 228-13	904.919 [m] 229-7	907.272 [m] 230-8
			
911.124 [m] 232-4	915.230 [m] 234-1	919.330 [m] 236-2 (A)	920.428 [m] 236-9

Tabla 5.14 Muestras de roca caliza dolomítica sin alteración térmica con resistividades comunes por debajo de los 100 [Ω -m], Experimento 2

Después de ser medidas en seco, las muestras fueron sumergidas en una solución de agua saturada con sal durante un periodo de cuatro días, tras lo cual se midió la resistividad. El tiempo que pasaron sumergidos fue corto y posiblemente no se saturaron al cien por ciento.

Resistividad en núcleo mojado en salmuera

El efecto de haber sumergido las muestras en salmuera durante un tiempo de cuatro días fue la reducción de la resistividad para la mayoría de las muestras, sólo dos tuvieron un aumento mismas que a su vez tuvieron las resistividades más bajas en seco (muestras 229-7 y 229-10). El rango de resistividad se reduce a una menor escala, quedando de 6.10 a 355.30 [Ω -m] correspondientes a las muestras 229-1 y 234-12 (Apéndice 6: Resistividad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2).

Una gran cantidad de muestras presentó resistividades entre los 10 y 20 [Ω -m], con 50 piezas dentro de este rango; de los 20 a 30 [Ω -m] hubo 32 piezas, concentrándose la mayoría de las resistividades entre los 10 a 30 [Ω -m]; por debajo de los 10 [Ω -m] hay sólo 9 piezas; y por encima de los 30 [Ω -m] hay 16 piezas.

Las más grandes caídas en la resistividad lo presentaron las muestras que a su vez tenían mayores niveles de resistividad estando secas (Gráfico 5.10), la caída más grande la experimentó la muestra 234-12 (parte inferior de la brecha de los 916 [m]) pasando de 1,976 a 355 [Ω -m] teniendo una reducción de 1,621 [Ω -m].

Algunos picos de resistividades altas que se presentaban en el registro de resistividad en muestras secas no aparecen en el registro de resistividad de muestras mojadas en solución.

Por ejemplo, las muestras a los 901 metros de profundidad, cuyas resistividades se reducen al rango entre los 20 y 30 [Ω -m] y ya no resaltan como en el registro en núcleo seco (Tabla 5.15).

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω -m]	Resistividad (mojadas) [Ω -m]	Reducción [Ω -m]
227-8	901.15	125.27	20.38	104.89
227-8 (A)	901.25	292.82	23.18	269.64
227-9	901.39	233.43	14.66	218.77
227-10	901.52	462.34	9.82	452.52
227-11	901.69	129.60	10.19	119.41
227-11 (A)	901.79	132.51	15.75	116.75
228-1	901.95	96.63	17.01	79.63

Tabla 5.15 Muestras a los 901 [m], con alteración térmica, con altas reducciones en la resistividad, Experimento 2

Muestras a los 906 metros de profundidad, a pesar de que tienen resistividades muy altas estando secas, mojadas en solución sus resistividades no sobresalen (Tabla 5.16).

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω -m]	Resistividad (mojadas) [Ω -m]	Reducción [Ω -m]
230-1	906.12	550.54	15.83	534.71
230-2	906.32	658.55	34.31	624.24
230-3	906.43	751.51	20.44	731.07
230-6	906.86	351.64	14.30	337.34

Tabla 5.16 Muestra a los 906 [m], con altas reducciones de resistividad, Experimento 2

Y las muestras a los 912 y 921 metros de profundidad, que son parte de la roca matriz caliza dolomítica, su resistividad cae a valores menores a 15 [Ω -m] (Tabla 5.17).

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω-m]	Resistividad (mojadas) [Ω-m]	Reducción [Ω-m]
232-12	912.09	133.33	12.70	120.62
232-13	912.19	130.92	14.40	116.52
236-12	920.91	108.68	6.79	101.89

Tabla 5.17 Muestra a los 912 y 921 [m], roca no alterada térmicamente, con altas reducciones de resistividad, Experimento 2

La mayoría de todas éstas muestras redujeron su resistividad a valores por debajo de los 20 [Ω -m], sólo la muestra 230-2 presenta un valor relativamente alto de 34.3 [Ω -m] (Tabla 5.16), y por debajo de los 10 [Ω -m] sólo tenemos a las piezas 227-10 y 236-12 (Tabla 5.15 y Tabla 5.17).

Las muestras pertenecientes al dique de brecha a los 907 y 909 [m], tienen caídas importantes, pero siguen presentando resistividades comparativamente altas.

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω-m]	Resistividad (mojadas) [Ω-m]	Reducción [Ω-m]
230-12	907.79	209.78	24.63	185.15
230-13	907.98	520.081	83.77	436.31
230-14	908.08	440.90	147.15	293.75
230-15	908.20	411.47	92.34	319.13
231-2	908.46	63.87	44.38	19.49
231-3	908.56	177.81	32.86	144.94
231-3 (A)	908.65	154.52	31.54	122.97
231-4	908.75	143.21	31.80	111.41
231-9	909.40	510.59	52.33	458.25
231-11	909.57	306.20	53.63	252.57
231-12	909.70	244.48	24.06	220.42
231-13	909.83	88.84	28.63	60.21

Tabla 5.18 Muestras del dique de brecha entre los 907 y 909 [m], con altas reducciones de resistividad, Experimento 2

La mayoría de estas muestras supera los 30 [Ω -m] estando mojadas (Tabla 5.18), y en los registros podemos ver un pico de resistividades altas compuesto por las muestras 230-13, 230-14 y 230-15 con 83.8, 147.2 y 92.3 [Ω -m] respectivamente y otro de menor dimensión compuesto por las muestras 231-9 y 231-11 con 52.3 y 53.6 [Ω -m], respectivamente (Gráfico 5.10, registro con núcleo mojado en salmuera).

Las muestras del dique de brecha suevita a los 916 [m] y la roca suprayacente presentan los siguientes cambios en la resistividad (Tabla 5.19).

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω -m]	Resistividad (mojadas) [Ω -m]	Reducción [Ω -m]
234-5	915.93	316.99	44.98	272.02
234-6	916.11	44.91	15.08	29.83
234-8	916.23	85.60	38.12	47.48
234-11	916.45	51.12	20.14	30.98
234-12	916.68	1976.75	355.30	1621.44

Tabla 5.19 Muestras del dique de brecha a los 916 [m] y suprayacente, roca superior e inferior con altas reducciones de resistividad, Experimento 2

La muestra 234-5 que es la roca inmediatamente superior al dique de brecha, tuvo una reducción importante en la resistividad, pero se mantuvo comparativamente elevada con respecto a la mayoría que cayó a resistividades menores a 30 [Ω -m], la muestra 234-8 igualmente se mantuvo relativamente alta, mientras que las otras dos muestra de la brecha las resistividades se mantuvieron en el intervalo 10 - 20 [Ω -m]. La muestra 234-12 que es la parte inferior del dique de brecha, es la roca con más grandes resistividades, tanto estando seca como mojada, en ambos casos se mantiene comparativamente elevada (Tabla 5.19).

Al contrario de las muestras que presentaron caídas grandes de resistividad, hubo algunas que no presentaron un cambio importante, y extrañamente hubo dos que presentaron un aumento. Estas son la muestra 229-7, que pasó de 15.9 a 22.2 [Ω -m] y la muestra 229-10 que pasó de 16.6 a 35.7 [Ω -m] (Figura 5.21) y que fueron a su vez las que presentaron las menores resistividades estando secas.

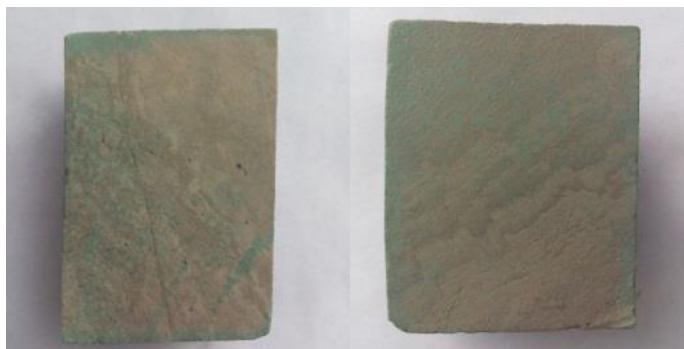


Figura 5.21 Muestras que registraron un aumento en la resistividad, Muestras 229-7 (izquierda) y 229-10 (derecha), Experimento 2

No se puede descartar un error humano en la medición de estas dos muestras o en su caso del equipo utilizado.

Las siguientes muestras casi no muestran cambios de resistividad, de núcleo seco a núcleo mojado en salmuera (Tabla 5.20).

Muestras	Profundidad [m]	Resistividad (secas) [Ω -m]	Resistividad (mojadas) [Ω -m]	Reducción [Ω -m]
228-14	903.89	21.60	21.09	0.50
229-11	905.44	30.04	28.07	1.97
230-4	906.51	45.11	44.92	0.19
231-17	910.40	27.87	24.32	3.55




		
903.885 [m] 228-14	905.441 [m] 229-11	910.401 [m] 231-17

Tabla 5.20 Muestras que presentaron reducciones mínimas de resistividad, Experimento 2

Las reducciones más importantes la presentaron las muestras con mayor resistividad medidas en seco, dejando fuera estas piezas, las caídas de resistividad de las demás muestras se distribuyen de la siguiente forma:

Reducciones en la resistividad [Ω -m]	Número de piezas
< 10	12
10 – 20	20
20 – 30	16
30 – 40	16
40 – 50	7
50 – 60	3
60 – 70	7
70 – 80	2

Tabla 5.21 Distribución de las reducciones en la resistividad de núcleo seco a núcleo mojado en salmuera sin tomar en cuenta las muestras que tuvieron las reducciones más elevadas, Experimento 2

Tomando en cuenta todas las piezas la caída promedio de resistividad es de aproximadamente 100 [Ω -m]). Sin tomar en cuenta las piezas que tuvieron las caídas más grandes ni las reducciones negativas el promedio de caída en la resistividad es de 38 [Ω -m].

Una caída relativa de la resistividad nos muestra el comportamiento que tiene esta propiedad bajo las dos distintas condiciones para cada muestra, si tomamos como valor máximo la resistividad medida en núcleo seco y a partir de ahí determinamos un porcentaje de caída, hacia el valor mínimo, que es la resistividad medida en núcleo mojado como se muestra a continuación.

$$\text{Caída relativa de la resistividad} = \frac{\text{Resistividad en núcleo seco} - \text{Resistividad en núcleo mojado}}{\text{Resistividad en núcleo seco}} \times 100 \quad (38)$$

En el siguiente gráfico se presenta la caída relativa de la resistividad de cada muestra con respecto del valor máximo. Las muestras que mayor cambio tuvieron en el valor de la resistividad están más próximas al 100%, y las muestras que mostraron el menor cambio al 0%, hay dos valores negativos que son el resultado de que extrañamente la resistividad es mayor tras ser medida mojada en salmuera que en seco, estas son las muestras 229-7 y 229-10.

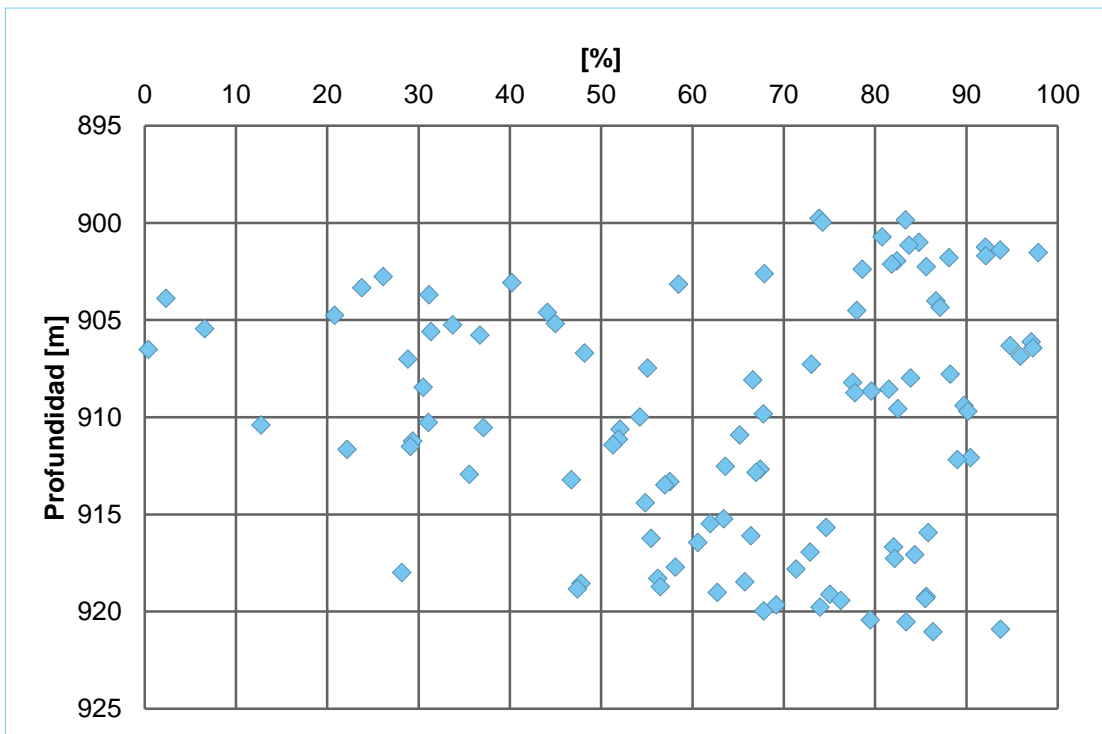


Gráfico 5.11 Caída relativa de la Resistividad, de núcleo seco a núcleo mojado en salmuera, Experimento 2

Por lo general, las muestras que mostraron una mayor caída relativa de resistividad son las que tuvieron valores más altos estando secas, que corresponde con muestras de roca más densas, y también entre las muestras que mostraron un menor cambio una gran parte corresponde con las muestras que tuvieron resistividades inferiores estando secas.

El porcentaje de caída se relaciona con los valores máximo y mínimo de resistividad de cada muestra, por lo que ocurre que dos muestras con valores muy diferentes de resistividad, tienen una caída relativa similar, como sucede con el caso de las muestras 227-1 (A) y 234-12 con valores máximos de 45.5 y 1,976.7 [Ω -m], y valores mínimos de 7.2 y 355.3 [Ω -m] con una caída relativa de la resistividad de 83 y 82% respectivamente. Por lo que este porcentaje debe ser revisado para cada muestra en lo individual, sin embargo, esta gráfica muestra el comportamiento que tuvo la resistividad en cada muestra, bajo las dos condiciones diferentes en que se tomó la medición, y qué tanto influyó para cada una el haber sido sumergida durante cuatro días en la solución salina. La mayoría presenta cambios superiores al 50%, mientras que una gran cantidad tiene cambios inferiores a este valor, con casos extremos de muestras cuyos porcentajes de caída de resistividad son muy altos como la muestra 227-10 con 98% o muy bajos como la muestra 230-4 con 0.4%.

La distribución de la caída relativa de la resistividad es de la siguiente forma:

Caída porcentual de la resistividad	Número de muestras
< 20%	4
20 - 40%	16
40 - 60%	20
60 - 80%	30
80 - 98	35

Tabla 5.22 Distribución de la caída porcentual de la resistividad, de núcleo seco a núcleo mojado, Experimento 2

Resultados de la cargabilidad de las muestras

La resistividad y cargabilidad son medidas en momentos diferentes, la resistividad es medida mientras circula una corriente eléctrica a través de la muestra de roca, durante este tiempo, los iones en la superficie de los minerales y/o fluidos presentes son polarizados por la interacción con el campo eléctrico, en este proceso una cantidad de carga es acumulada en la roca y al ser interrumpida la corriente el voltaje no decae a cero inmediatamente, sino que lo hace lentamente liberando la carga retenida, este decrecimiento en el voltaje es medido durante un breve periodo de tiempo hasta que vuelve a cero, este comportamiento está relacionado con los elementos que componen la roca, los cuales fueron polarizados.

La cargabilidad tuvo valores distintos dependiendo de los parámetros de medición empleados. Si se tomaba con corriente, mostraba valores significativamente más altos que si se tomaba con voltaje, lo cual se acentúa al medir las muestras mojadas en salmuera.

Algunas muestras fueron tomadas con corriente y voltaje, otras sólo con corriente o sólo con voltaje, por lo que sólo es posible la comparación de valores entre núcleo seco y mojado para los casos en donde se midió para ambas condiciones con corriente o ambas con voltaje.

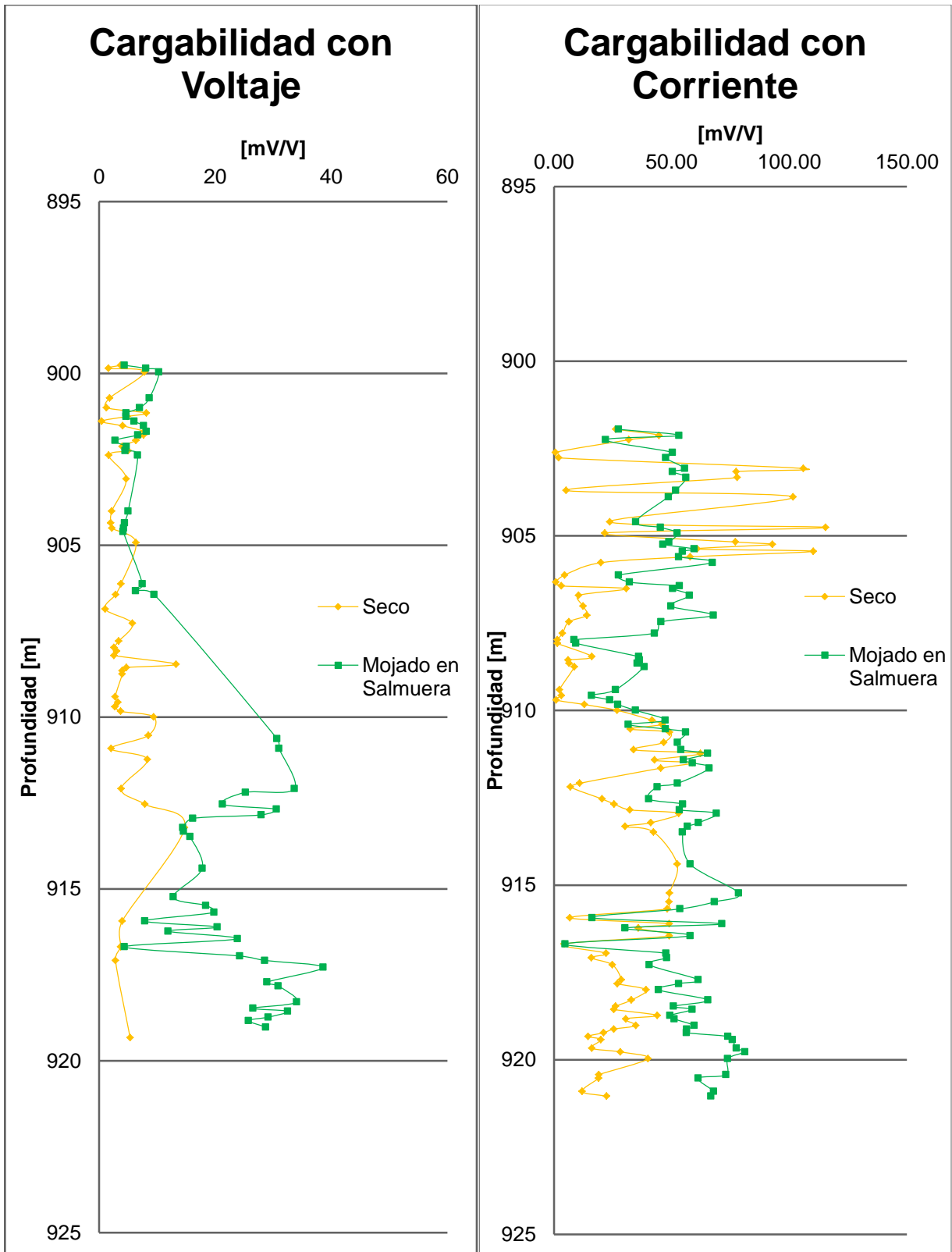


Gráfico 5.12 Registros de Cargabilidad en muestras secas y mojadas en salmuera, medidas con Corriente (izquierda) y con Voltaje (derecha), Experimento 2

Los datos comparables de cargabilidad en muestra seca y cargabilidad en muestra mojada, provienen en su mayoría de los tomados con corriente fija, ya que con el parámetro voltaje se tomaron muy pocas mediciones, estos datos pudieron ser contrastados en un gráfico contra la profundidad, donde observa un aumento de la cargabilidad en la mayoría de las muestras (Apéndice 7: Cargabilidad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2).

En los gráficos se puede observar que la mayoría de las muestras presentan mayor cargabilidad cuando está saturada por salmuera, mientras que algunas presentaron una disminución o un ligero cambio (Gráfico 5.12).

Los valores de cargabilidad para muestras secas se mueven en un rango de 0.56 a 119.3 [mV/V], mientras que para muestras mojadas el rango es de 4.7 a 81.15 [mV/V] para esta última condición en dos muestras se obtuvieron valores negativos de cargabilidad, los cuales no fueron tomados en cuenta al calcular el valor promedio, estas son las muestras 231-3 (A) y la muestra 234-3. Tomando en cuenta todos los valores de cargabilidad tomados con corriente, el promedio de cargabilidad en muestras secas es de 32.2 [mV/V] en muestras mojadas 46.86 [mV/V], al comparar estos dos valores podemos ver que hay un aumento sustancial de la cargabilidad cuando las muestras están mojadas.

El efecto que tiene la salmuera sobre la cargabilidad, es que, ésta tiende a aumentar en la gran mayoría de muestras y por lo general tiende a disminuir en aquellas que mostraron valores altos estando secas.

Un análisis de los datos nos dice que las cargabilidades más bajas pertenecen precisamente a las mismas muestras que tuvieron las resistividades más altas. Para la condición en seco, las muestras que presentaron resistividades altas tienden a tener cargabilidades bajas, se da una relación recíproca entre la cargabilidad y la resistividad para estas muestras. Esta correspondencia sólo es visible cuando se comparan los gráficos con los ejes de resistividad y cargabilidad en escala logarítmica.

Lo mismo no sucede en sentido opuesto, es decir, una cargabilidad alta no necesariamente corresponde a resistividad baja, es común que, en otras muestras, con valores no tan altos de resistividad su relación con la cargabilidad sea más aleatoria y ésta adopta valores medios o altos indistintamente del valor de la resistividad.

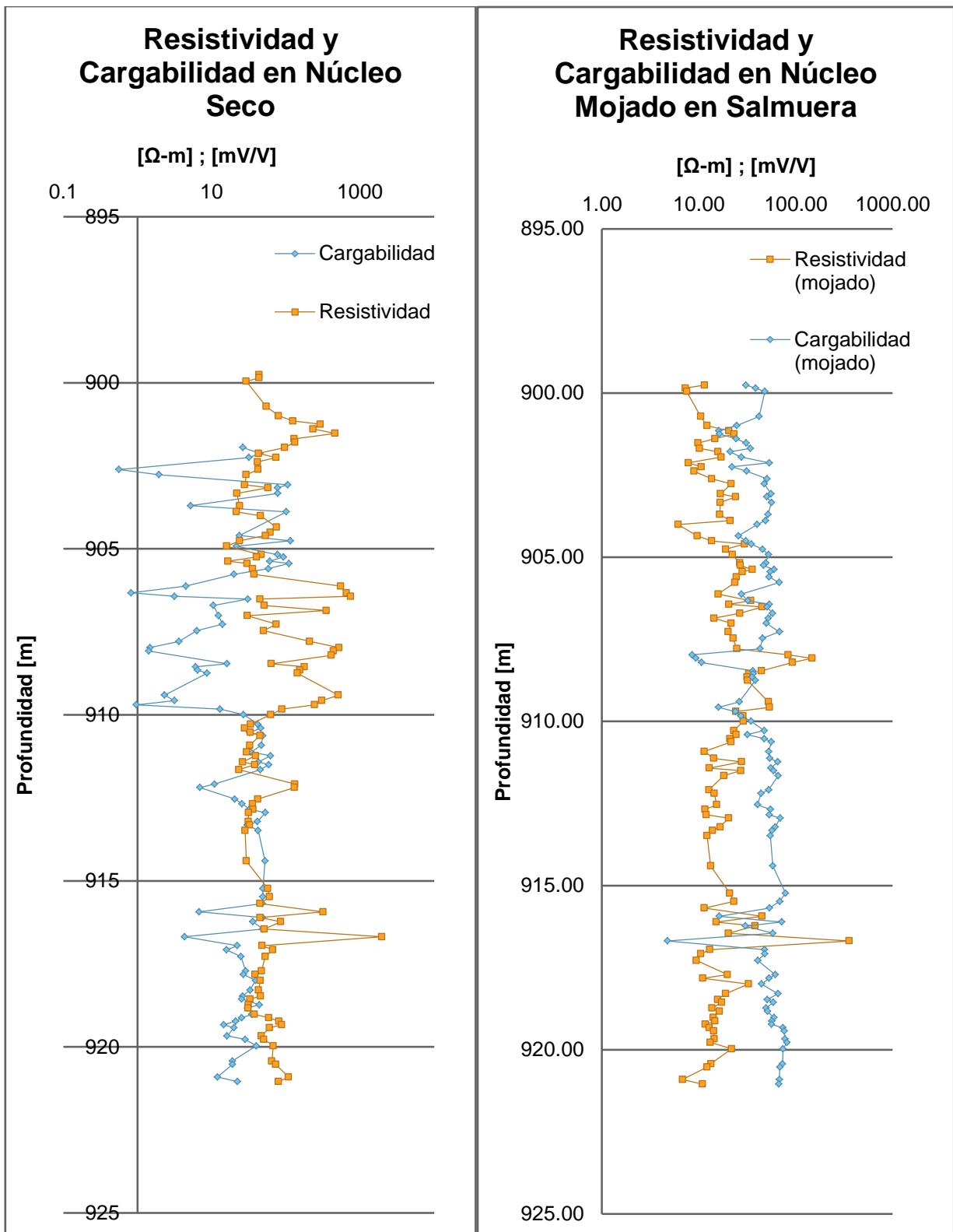


Gráfico 5.13 Registros de Resistividad y Cargabilidad en muestras secas (izquierda) y mojadas en salmuera (derecha), con el eje X en escala logarítmica base 10, Experimento 2

Cuando las muestras son mojadas en salmuera, las gráficas se invierten, conforme la resistividad disminuye, la cargabilidad aumenta debido la solución electrolítica que ocupa el espacio poroso de la muestra (Gráfico 5.13, registro derecho).

Se altera el efecto general de polarización inducida producido por la corriente eléctrica, bajo esta condición en la mayoría de muestras se da un aumento en la cargabilidad, y hay una disminución en aquellas que presentaron cargabilidades altas estando secas, por lo genera tratando de ajustarse un valor que ronda los 50 o 60 [mV/V], a medida que las cargabilidades en muestras secas se aproximen a este rango, tiende a permanecer similar o cuando son mojadas en solución.

También está el caso de la muestra 234-12 (al fondo de la brecha a los 916 [m]) que presentan cargabilidades bajas y muy cercanas en ambas condiciones, siendo ligeramente superior al ser mojada en salmuera. También otras muestras pertenecientes a la brecha de los 907 – 909 [m] y la roca suprayacente de la brecha de los 916 [m] que también tuvieron cargabilidades bajas en seco, tuvieron un incremento moderado de cargabilidad situándose por debajo del promedio de cargabilidad de rocas mojadas en solución.

Las resistividades obtenidas con el parámetro corriente son aproximadamente 10% más grandes que al usar voltaje. Para la cargabilidad, en esta misma comparación los valores obtenidos con corriente resultan muy distantes llegando a ser en algunos casos varias veces por encima de los obtenidos con voltaje, en los pocos casos donde la cargabilidad tomada con corriente es baja este el valor se aproxima al tomado con voltaje.

Resultados de la Susceptibilidad Magnética a profundidades puntuales dentro del intervalo

Los datos de susceptibilidad magnética fueron medidos en muestras a lo largo de todo el núcleo y registrada contra la profundidad. De este registro se extrajeron los correspondientes al intervalo analizado en este trabajo.

La susceptibilidad se midió con la sonda MS2 del equipo (Magnetic Susceptibility Meter) en unidades del Sistema Internacional y en el rango de 1.0, para cada dato obtenido se realizaron tres mediciones en el mismo sitio y el promedio de estas es el valor de susceptibilidad magnética registrada.

Para el intervalo, de los 900 a 921 metros se obtuvieron un total de 187 valores de susceptibilidad a determinada profundidad dentro del intervalo. Los datos fueron obtenidos en promedio cada 11 [cm], sin embargo, hay medidas tan cercanas como cada 1 [cm] o tan alejadas como cada 20 o más [cm], además de una zona dentro del intervalo de más de un metro donde no se midió la susceptibilidad, (entre los 907 y 908 metros).

Las profundidades a que se midió la susceptibilidad no siempre coinciden con las profundidades de las muestras, hay que recordar que las muestras no componen un intervalo continuo y hay zonas donde fue imposible medir la resistividad y por lo tanto tenemos valores de susceptibilidad magnética donde no tenemos valores de resistividad, o,

por la distancia de las mediciones entre sí, mencionada anteriormente, tenemos valores de resistividad pero no de susceptibilidad.

La mayoría de las mediciones presenta susceptibilidad magnética negativa, es decir, gran parte del material del intervalo tiene un comportamiento diamagnético. De las 187 mediciones realizadas 135 tienen valores negativos y 52 tienen valores positivos (Apéndice 8: Susceptibilidad Magnética a Profundidades Puntuales dentro del Intervalo, Experimento 2). Las susceptibilidades medidas caen en el siguiente rango de -2.5×10^{-5} a 11.1×10^{-5} SI, determinado por los valores obtenidos a las profundidades 897.9 y 919.12 [m] respectivamente.

La susceptibilidad magnética se toma en los lugares donde se posicionó la sonda, siendo estos valores puntuales en los 21 metros de longitud del intervalo que nos permite ver la tendencia diamagnética y en menor medida paramagnética del núcleo en dicho intervalo (70-30 %).

La mayoría de la roca presentó un comportamiento diamagnético situada entre los valores -2.0×10^{-5} y -0.1×10^{-5} SI y con un promedio de -1.2×10^{-5} SI. En todo el intervalo se pueden ver valores positivos que se intercalan con los negativos, incluso a una distancia tomada entre sí muy corta (de 1 o 2 [cm])

En los lugares donde se presentó un comportamiento paramagnético la mayoría de la susceptibilidad tiene valores por debajo de 3×10^{-5} SI, y sólo 13 por encima de este valor, con promedio de susceptibilidad de 2.7×10^{-5} SI.

En casi todo el intervalo la susceptibilidad magnética es consistentemente negativa, excepto a la profundidad de los 907.5 a los 909.7 [m], donde parece haber un predominio de susceptibilidades positivas y que corresponde con material del dique de brecha suevita de los 907 metros, aunque aquí es donde se dejó de medir la susceptibilidad en más de un metro del intervalo. A continuación, se presenta un gráfico de los valores de susceptibilidad medida contra la profundidad del intervalo (Gráfico 5.14).

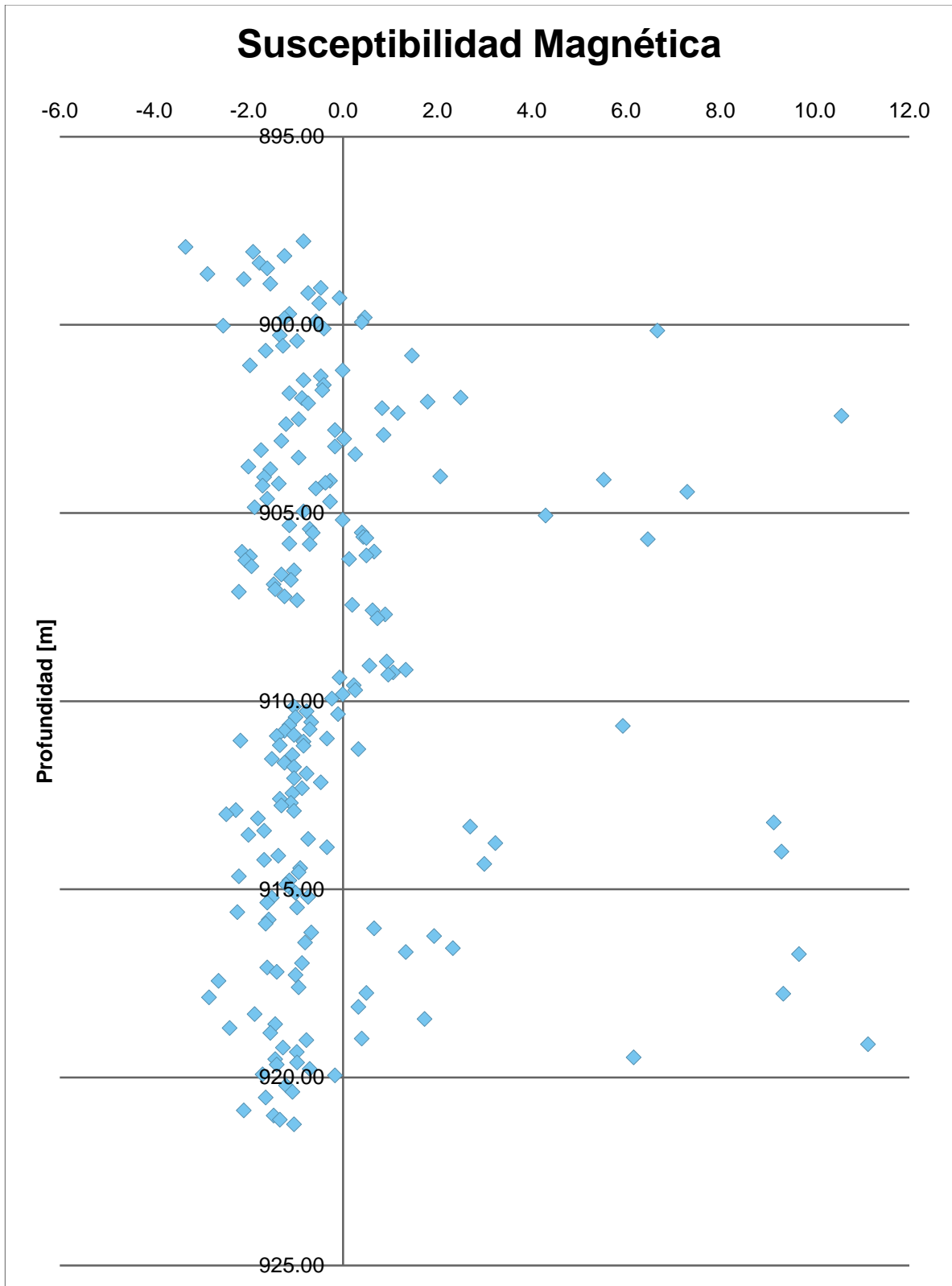


Gráfico 5.14 Registro de Susceptibilidad Magnética dentro del Intervalo, Experimento 2

Ante la exposición de un campo magnético externo, el cual es proporcionado por la sonda magnética MS2 del Magnetic Susceptibility Meter, los electrones de los átomos, que componen a los minerales de roca, presentan un momento magnético cuando el eje del spin se alinea paralelo a dicho campo.

Los compuestos o sustancias diamagnéticos componentes de roca como sílice (Cuarzo SiO), carbonato de calcio (calcita CaCO), carbonato de calcio y magnesio (dolomita CaMgCO) Silico-Aluminatos (feldespato) y metales como el cobre (Cu), Zinc (Zn) etc. son magnetizados paralelamente, pero en sentido opuesto al campo, rechazándolo y presentan una susceptibilidad negativa y baja.

Los compuestos paramagnéticos se magnetizan en sentido directo al campo, reforzándolo y presentan susceptibilidades positivas y bajas, como los silicatos de hierro (biotita anfíboles piroxenos, etc.) carbonatos de hierro y manganeso y arcillas, estos se pueden presentar en menor proporción dentro de la roca, pero tiene mayor influencia en el valor estadístico de la susceptibilidad que los compuestos diamagnéticos.

Los componentes ferromagnéticos se presentan en proporciones muy bajas, en estos la magnetización es paralela y en sentido directo al campo y permanece aún en ausencia de éste, con valores positivos y altos de susceptibilidad, (Fe, Ni, Co) poca cantidad de estos elementos pueden ejercer una alta influencia en el valor total de la susceptibilidad.

La presencia relativa de estos minerales dentro de un volumen determinado de roca va a dar como resultado una respuesta positiva o negativa por parte del instrumento

De las mediciones realizadas sobre los volúmenes de roca medidos por el instrumento, los componentes, en su mayoría carbonatos de calcio y magnesio, se encuentran presentes en proporciones tales que, la respuesta medida por el equipo es en la mayoría de casos un valor negativo, aproximadamente 70%, en el otro 30%, la cantidad de elementos paramagnéticos ejercen mayor influencia y el valor de susceptibilidad es positivo, llegándose a reportar valores altos, por ejemplo a los 919.12 [m] de profundidad donde se mide un valor de 11.1×10^{-5} SI, (paramagnetismo comparativamente elevado).

6 Conclusiones

En los últimos años se han tenido avances importantes en adquisición y análisis de registros geofísicos y propiedades petrofísicas en los programas de exploración y explotación. Se han desarrollado nuevas herramientas y capacidad de medición de propiedades petrofísicas adicionales, lo que permite un uso intensivo en la caracterización de formaciones y diseño e implementación de proyectos. Dentro de estos avances, se han desarrollado herramientas y técnicas para análisis de propiedades físicas en laboratorio en núcleos y recortes.

En este trabajo nos enfocamos a estudios de laboratorio de propiedades magnéticas y eléctricas en núcleos de perforación. Con los métodos y equipo usados en laboratorio ha sido posible la obtención de registros de resistividad y cargabilidad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad y porosidad.

Los experimentos se realizaron en núcleos de perforación de la secuencia carbonatada Cretácica y brechas de impacto del pozo Yaxcopoil-1. El pozo exploratorio Yaxcopoil-1 se perforó en la Península de Yucatán en la zona de terrazas del cráter Chicxulub.

La densidad y porosidad se relacionan por lo general de forma inversamente proporcional, lo cual es visible al comparar ambos registros en el experimento 2 y de los resultados de los experimentos 1.

El rango de densidad es $(1.92 - 2.74)$ $[\text{g}/\text{cm}^3]$ y el de porosidad $(0.78 - 22.27)$ [%]. La densidad promedio es 2.43 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ y la porosidad promedio es 6.85 [%] (experimento 2).

Conforme la roca es más densa tiende a ser menos porosa, la relación de proporcionalidad es propia del tipo de roca.

La mayoría de roca del intervalo del experimento 2 constituido mayoritariamente por caliza dolomítica homogénea presenta resistividades entre los 30 y 100 $[\Omega\text{-m}]$.

Las muestras pertenecientes o cercanas a brechas y/o que muestran cierto grado de alteración térmica reportan resistividades muy elevadas. A su vez, estas rocas son comparativamente más densas.

Claros ejemplos son las muestras 234-5 y 234-12, con una resistividad de 317 y 1,976.8 $[\Omega\text{-m}]$ respectivamente y que son las rocas superior e inferior del dique de brecha de los 916 [m]. El promedio de resistividad de las rocas del dique de brecha a los 907 [m] es de 272.6 $[\Omega\text{-m}]$. La roca del interior del dique de brecha de los 916 [m] tienen densidades, porosidades y resistividades similares al grueso de la roca caliza dolomítica.

La resistividad promedio del total de muestras es de 124 $[\Omega\text{-m}]$, descartando las muestras con resistividades muy elevadas el promedio se ubica en 47 $[\Omega\text{-m}]$.

EL 70% de la roca medida del intervalo presenta susceptibilidad magnética negativa (comportamiento diamagnético) y un 30% susceptibilidad positiva (comportamiento paramagnético).

El rango de susceptibilidad magnética es $(-2.8 \times 10^{-5}$ a 11.1×10^{-5} SI). De los valores negativos la mayoría se sitúa entre -2.0 y -0.1×10^{-5} SI con un promedio de -1.2×10^{-5} SI y de los positivos entre 0.1 y 3.0×10^{-5} SI con un promedio de 2.7×10^{-5} SI.

Se puede afirmar que la densidad, porosidad y resistividad eléctrica de las rocas de los diques brecha y cercanas, del intervalo, fueron alteradas tras el impacto efectos de las altas temperaturas y presiones.

La roca de la brecha de impacto del experimento 1 presenta valores altos y positivos de susceptibilidad magnética con 373.4 , 856.8 , 242.9 y 195.2×10^{-5} SI, lo que indica la presencia de minerales ferromagnéticos. También presenta valores bajos de resistividad eléctrica comparada con las demás muestras mismo experimento 1.

La resistividad y cargabilidad responden a la capacidad conductora de los fluidos usados para mojar las muestras y al nivel de saturación de estos dentro de los poros de la roca.

En el experimento 2, de un promedio de resistividad de las rocas del intervalo en muestras secas de 124 [Ω -m] pasó a un promedio de 25.13 [Ω -m] mojadas en salmuera, descartando las resistividades más elevada el promedio en seco es de 47 [Ω -m] y mojado en salmuera de 19.52 [Ω -m]

Por lo general, la cargabilidad tiende a aumentar cuando las muestras son mojadas. De un promedio en seco de 32.2 [mV/V] pasa a 46.9 [mV/] en muestras mojadas en salmuera. En algunas muestras la cargabilidad disminuye.

Al comparar los registros de resistividad y cargabilidad en escala logarítmica se observa una relación inversa entre estas dos propiedades, al menos en los extremos más resistivos y de menor cargabilidad, nuevamente correspondiente a las rocas de los diques de brecha y cercanas.

En el experimento 2, al medir la resistividad y la cargabilidad utilizando corriente se obtienen mediciones más confiables que al medir con voltaje, ya que para este último, el valor seleccionado se aleja del valor real medido, lo que resta confiabilidad a los resultados, esto se acentúa cuando las muestras son mojadas en salmuera

En estos casos, en su mayoría la resistividad medida con corriente fija es 10% mayor a la medida con voltaje. En esta misma comparación para la cargabilidad, los valores obtenidos con corriente resultan muy distantes llegando a ser en algunos casos varias veces por encima que los obtenidos con voltaje.

Todas las mediciones de las propiedades de las muestras presentadas realizadas en laboratorio en este trabajo nos permiten caracterizar y distinguir tipos de rocas.

En algunas de ellas se observan efectos en propiedades como la densidad y resistividad provocadas por las altas temperaturas y presiones,

También la forma en que algunas propiedades se relacionan entre sí, como es el caso de la porosidad y la densidad y/o la resistividad y la cargabilidad. Así como los efectos de saturar las rocas

Con base en las propiedades medida es posible diferenciar a la roca caliza dolomítica homogénea que no presenta alteración térmica de la roca que sí presenta, así como a las rocas de brecha a los 907-909 [m] y la de los 916 [m], también la roca de yeso cercana a las profundidades del pozo con una densidad y resistividad elevada, y la roca de la brecha de impacto cuyo principal diferenciador es su alta susceptibilidad magnética.

Bibliografía

- Abdallah, W., Buckley, J. S., Carnegie, A., Edwards, J., Herold, B., Fordham, E., y otros. (2007). Los fundamentos de la mojabilidad. *Oilfield Review*, 48-51.
- Ainchil, J. E., Perdomo, S., & Valeff, E. D. (s.f.). Polarización Inducida. En *Métodos eléctricos de prospección* (págs. 135-137). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de la Plata: Departamento de Geofísica Aplicada.
- Akbar, M., Vissapragada, B., Alghamdi, A., Allen, D., Herron, M., Andrew, C., y otros. (2001). Evaluación de yacimientos carbonatados. *Oilfield Review*, 20-23.
- Alford, J., Blyth, M., Tollefsen, E., Crowe, J., Loreto, J., Mohameed, S., y otros. (2012). Perfilaje sísmico durante la perforación: Respuestas de corte. *Oilfield Review*, 5-6.
- Alvarado, R. J., Damgaard, A., Hasen, P., Raven, M., Heidler, R., Hoshun, R., y otros. (2003). Registros de resonancia magnética adquiridos durante la perforación. *Oilfield Review*, 44.
- Archie, G. (1952). Clasification of Carbonate Reservoir Rocks and Petrophysical Considerations. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 36: 278-298.
- Arroyo C, F. A., & Roig, F. J. (s.f.). *Introducción a los Registros Geofísicos de Pozo*. División de Ingeniería en Ciencia de la Tierra, Departamento de Geofísica, UNAM: Unidad de Difusión de la Facultad de Ingeniería.
- Arz, J. A., & Arenillas, I. (2008). Los foraminíferos planctónicos del pozo Yaxcopoil-1 (cráter de Chicxulub): ¿Evidencia de un impacto meteorítico pre- K/T? *Geo-Temas*, 1475-1477.
- Bartington Instruments. (s.f.). *Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System*. Witney, Oxford: Bartington Instruments Limited.
- Bratton, T., Viet Canh, D., Van Que, N., Duc, N. V., Gillespie, P., Hunt, D., y otros. (2006). La naturaleza de los yacimientos naturalmente fracturados. *Oilfield Review*, 4-10.
- Caballero, C. I., & Miranda. (2011). *La fábrica magnética a partir de la anisotropía de la susceptibilidad magnética: Sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones fuentes y dinámicas de flujo*. Ciudad Universitaria, México: Instituto de Geofísica de la UNAM.
- Capítulo Petrofísica V: Registros Geofísicos V.I.* (s.f.). Recuperado el 09 de Mayo de 2018, de www.ptolomeo.unam.mx:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/128/A7.pdf?sequence=7>

- Cervantes Rico, J. L., & Eduardo, V. H. (Abril de 2013). *Estudio de polarización Inducida y Resistividad en el Proyecto La Buena, Malla La Julia, Distrito Minero Melchor Ocampo, Zacatecas*. Ciudad Universitaria, México, D.F.: Facultad de Ingeniería.
- Choquette, W. P., & Pray, L. C. (1970). Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 54: 211.
- Corrales Zarauza, I., Rosell Sanuy, J., Sánchez de la Torre, L., Vera Torres, J. A., & Vilas Minondo, L. (1977). *Estratigrafía*. Rueda.
- Delgadillo Peralta, M., Urrutia Fucugauchi, J., Pérez Cruz, L., & Velasco Villareal, M. (2015). *Caracterización de propiedades magnéticas y anisotropía de susceptibilidad magnética de las brechas suevíticas del cráter Cretácico-Paleogeno Chicxulub*. Recuperado el 09 de Mayo de 2018, de www.scielo.org.mx: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742015000100011
- Dunham, R. J. (1962). Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. *American Association of Petroleum Geologist*, 108-121.
- El Cráter de Chicxulub y el pozo exploratorio Yaxcopoil-1*. (s.f.). Recuperado el 16 de Mayo de 2018, de <http://www.ptolomeo.unam.mx>: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/107/A7%20Cap%C3%ADtulo%20V.pdf?sequence=7>
- Elf-Aquitaine. (1977). *Essai de caractérisation sédimentologique: des dépôts carbonatés. 2. Eléments d'interprétation*. Boussens: Elf-Alquitaine.
- Folk, R. L. (1959). Practical Petrographic Classification of Limestone. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 43: 1-38.
- Grabau, A. W. (1904). On the Classification of Sedimentary Rocks. *American Geologist*, 33: 238-247.
- Herrera, Y., & Cooper, N. (2010). *Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.
- Inaba, M., McCormick, D., Mikalsen, T., Nishi, M., Rasmus, J., Rohler, H., y otros. (2003). El auge de las imágenes de la pared del pozo. *Oilfield Review*, 22-23.
- Instrumentation GDD Inc. (1012). *Sample Core I.P. Tester TDLV Manual del usuario*. Québec: GDD Inc.
- International Continental Scientific Drilling Program*. (2017). Recuperado el 09 de Mayo de 2018, de www.icdp-online.org: <https://www.icdp-online.org/projects/world/north-and-central-america/chicxulub-mexico/>

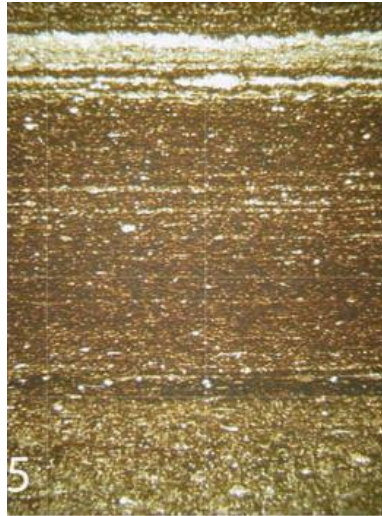
- Leeder, M. R. (1982). *Sedimentology: Processes and Products*. George Allen & Unwin.
- Lesmes, D., & Slater, L. D. (2008). *The Induced Polarization Method*.
- López Ramos, E. (1973). Estudio Geológico de la Península de Yucatán. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín*, v32. p. 25-72.
- Martell Andrade, B. (2010). *Petrofísica y Registros de Pozo*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nelson, R. A. (2001). *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs* (Segunda ed.). Houston, Tx: Butterworth-Heinemann.
- Patiño Ruiz, J., Bernal Vargas, L., Valdés, L. C., Gómez Rodríguez, R. D., & Navarro Baca, F. (2013). *Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán*. Pemex Exploración y Producción.
- Pemex. (2010). *Libro de reservas de hidrocarburos*. Pemex Exploración y Producción.
- Rasso, C. (s.f.). *Un siglo de perforación: Registros Geofísicos*.
- Rodríguez, F. J. (2006). *La porosidad de las rocas carbonatadas*. (Departament of Geology, University of Oviedo) Recuperado el 25 de Mayo de 2018, de www.researchgate.net:
https://www.researchgate.net/publication/237080875_LA_POROSIDAD_DE_LAS_ROCAS_CARBOATADAS
- Rojas, C. A., & Juárez. (2011). *Características petrofísicas y saturación de agua inicial en los tipos de roca de la Zona-C en el área Cira-Este*. Recuperado el 10 de Mayo de 2018, de www.bdigital.unal.edu.co:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/4349/7/cesaraugustorojassuarez.2011.parte6.pdf>
- Sanders, H. (1967). Classification of Carbonate Rocks of Marine Origin. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 51: 325-336.
- Schlumberger. (s.f.). *Interpretación de Perfiles: Volumen I - Fundamentos*. New York: Schlumberger Limited.
- Schlumberger. (s.f.). *Oilfield Glossary*. Recuperado el 10 de Mayo de 2018, de www.glossary.oilfield.slb.com:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/n/neutron_porosity.aspx
- Schlumberger. (s.f.). *Oilfield Glossary*. Recuperado el 10 de Mayo de 2018, de www.glossary.oilfield.slb.com:
<http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/seal.aspx>
- Scoffin, T. P. (1987). *An Introduction to Carbonate Sediments and Rocks*. Glasgow: Champan & Hall.

Stinesbeck, W., Keller, G., Adatte, T., Harting, M., Stuben, D., Istrate, G., y otros. (2004). Yaxcopoil-1 an the Chicxulub impact. *International Journal Earth Science*, 1042-1055.

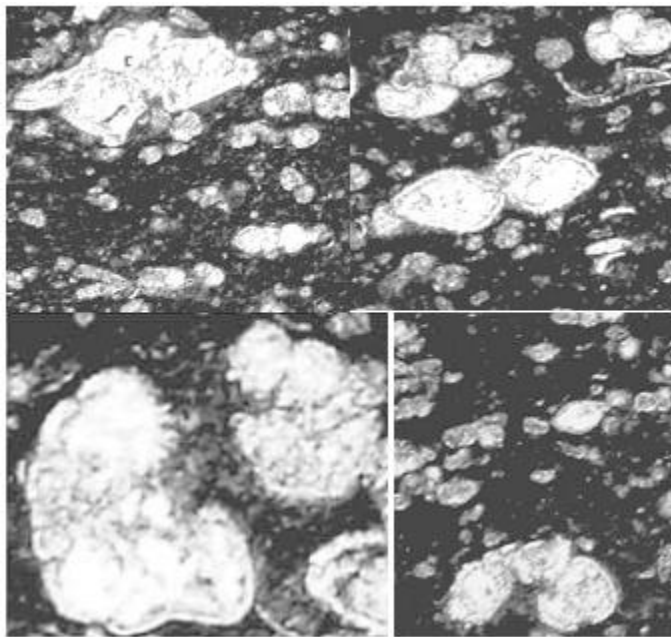
Wentworth, C. K. (1922). A Scale Of Grades and Class Terms for Clastic Sediments. *J. Geol*, 30, 377-392.

Zhdanov, M. S. (2009). Geophysical Electromagnetic Theory and Method. Methods in Geochemistry and Geophysics. *Elsevier*, Vol. 43.

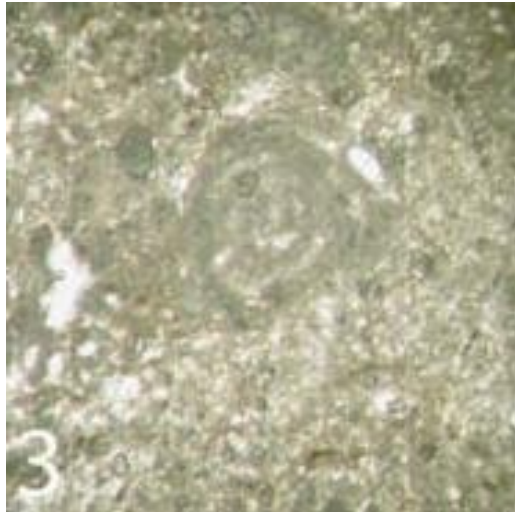
Apéndice 1: Imágenes de Especies Foraminíferos en Rocas



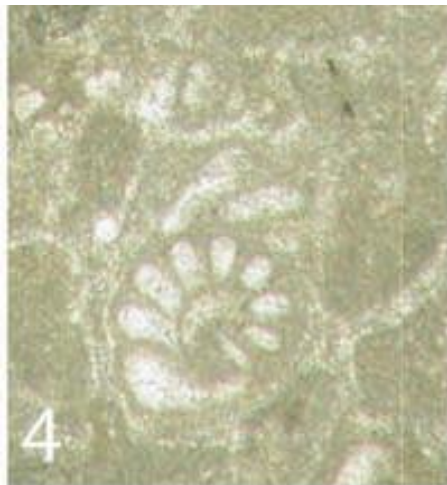
Apéndice 1, Figura 1 Wackestone de foraminíferos planctónicos laminados, Cenomiano tardío zona *R. cushmani* (unidad B)



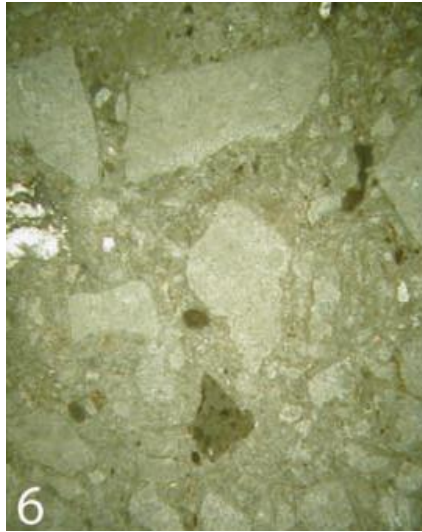
Apéndice 1, Figura 2 Micrografías de sección delgada de Cretácico tardío y temprano: *Rotalipora greenhornensis* y especies pequeñas, *W. archeoretacea*, *Hedbergella simplex*, *Whiteinella paradubia*, *R. cushmani* y pequeños heterohelicidos y guembelitrids (Unidad B)



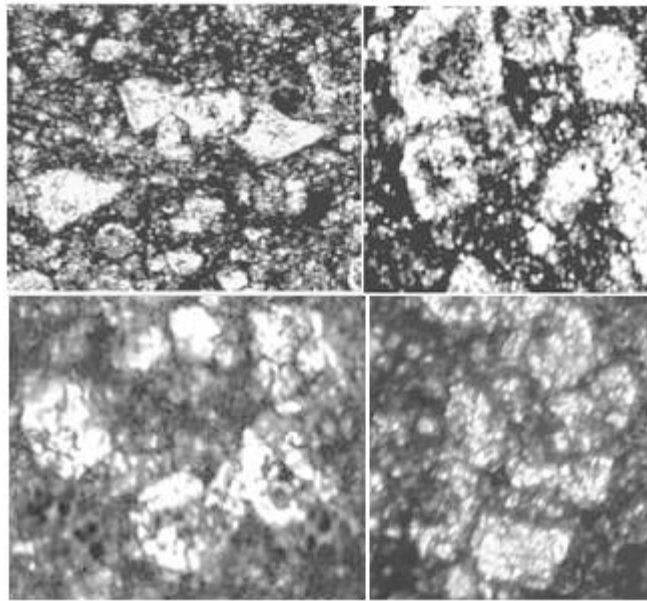
Apéndice 1, Figura 3 Foraminífero miliolid (Unidad C)



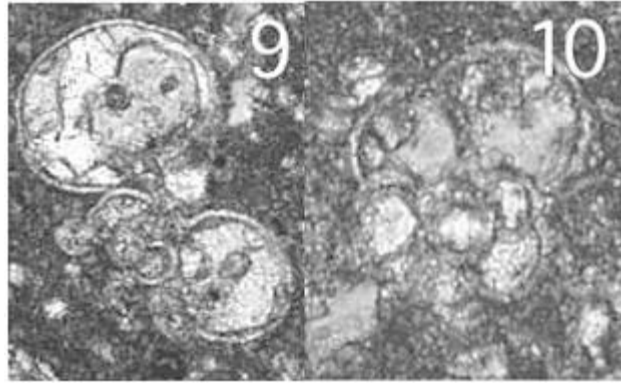
Apéndice 1, Figura 4 Grainstone bioclástica con foraminífero bentónico (Unidad G)



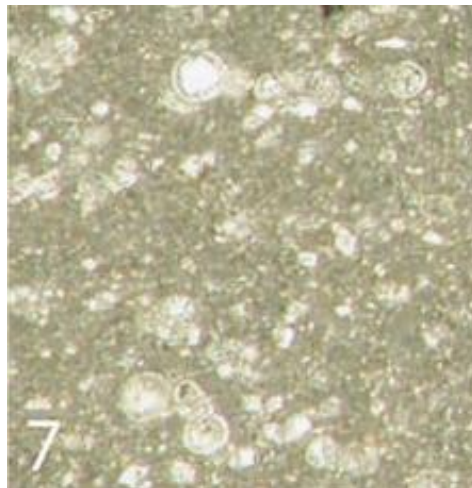
Apéndice 1, Figura 5 Brecha Polimíctica (base de la brecha de Suevítica de la unidad H)



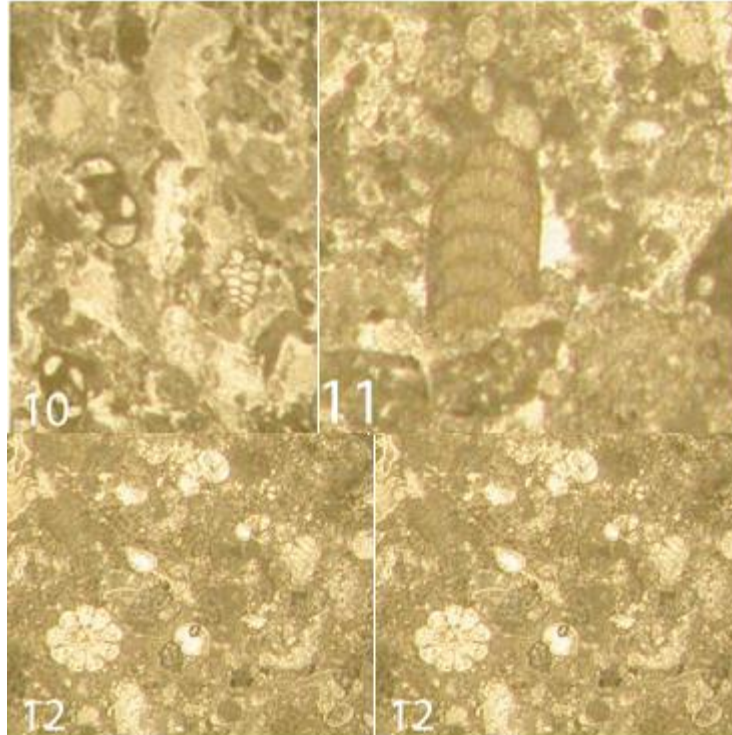
Apéndice 1, Figura 6 Foraminíferos planctónicos: *Globotruncana insignis*, *Rugoglobigerina rugosa*, *Rosita contusa*, *R. rugosa* (Unidad Ia)



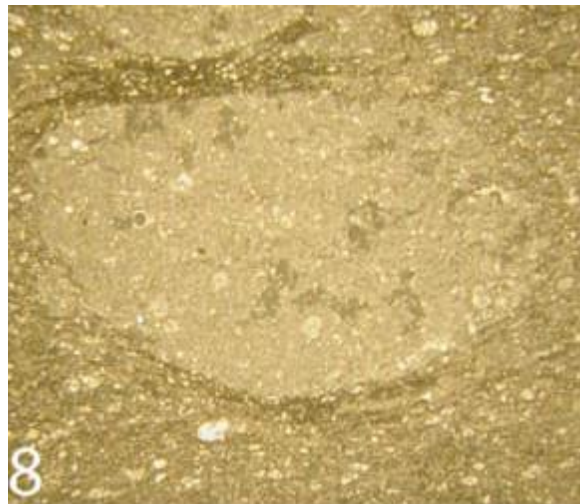
Apéndice 1, Figura 7 Foraminíferos planctónicos: *Parasubbotina pseudobulloides* (Unidad Ib)



Apéndice 1, Figura 8 Biomicritas bioturbadas wackestone de foraminíferos planctónicos (Unidad I)



Apéndice 1, Figura 9 Grainstone bioclástico con fragmento de algas rojas (10, 11) y foraminíferos bentónicos de origen de plataforma de carbonato de aguas poco profundas (11), Grainstone con bioclastos de foraminíferos planctónicos de mar abierto y origen de la plataforma d



Apéndice 1, Figura 10 Clastos de wackestone de foraminíferos planctónicos de la zona P1c flotando en wackestone de foraminíferos planctónicos de la zona media del Paleoceno de edad P3a (Unidad K)

Apéndice 2 Manual de Uso: Magnetic Susceptibility Meter MS2

El Sistema MS2 comprende un conjunto de sensores usados con el Magnetic Susceptibility Meter MS2 para medir la susceptibilidad magnética mediante la aplicación de un campo magnético creado por una bobina al elemento bajo medición.

La gama de equipos que integran el MS2 Magnetic Susceptibility System es la siguiente:

- Sensor de doble frecuencia MS2B
- Sensor de escaneado del núcleo MS2C
- **Sensor de escaneado en superficie de alta resolución MS2E**
- Asa MS2 para uso con sondas tipo MS2D y MS2F
- Sonda MS2D
- Sonda MS2F
- Sensor de frecuencia simple MS2G
- MS2H sonda de agujero abajo
- Sensor de exploración de superficies de alta estabilidad MS2K
- Sensor con revestimiento de agua MS2W
- Sensor de horno MS2WF
- Controlador de alimentación / temperatura MS2WFP

Cada sensor MS2 está diseñado para una aplicación y un tipo de muestra específica, y está conectado al medidor MS2 a través de un cable coaxial simple TNC-TNC. El equipo muestra el valor de susceptibilidad magnética de los materiales cuando entran en el rango de influencia del sensor.

Los sensores MS2 operan bajo el principio de comparación entre la permeabilidad magnética del aire y la permeabilidad relativa obtenida con la contribución de la permeabilidad magnética de la muestra. Para ello, se requieren sensores para medir la permeabilidad magnética a una alta resolución, ya que cualquier cambio de temperatura puede conducir a una ligera distorsión de la forma de la bobina, provocando un cambio aparente en la permeabilidad y, por tanto, en la susceptibilidad. Cada sensor emplea su propia técnica para compensar la temperatura para minimizar cualquier desviación inducida por la temperatura.

Panel frontal



Apéndice 2, Figura 1 Panel frontal del MS2

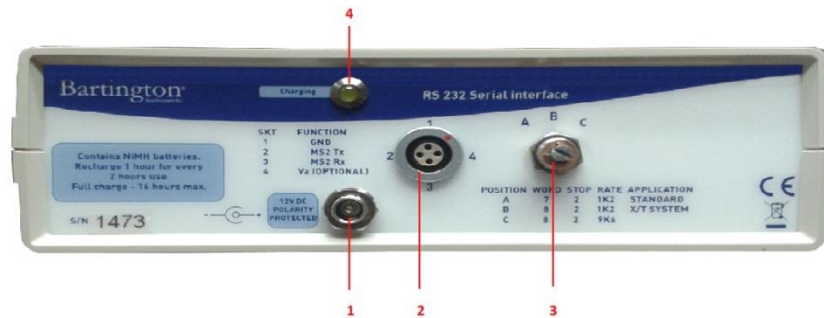
Clave de la Figura

1. Botón pulsador "Medir" ("M")
2. Interruptor de palanca
3. Botón "Zero" ("Z")
4. Interruptor de encendido / apagado
5. Interruptor multiplicador de rango
6. Enchufe para la conexión del cable coaxial al sensor

Hay cinco controles en el panel frontal.

1. Botón 'Medir', etiquetado 'M': permite tomar lecturas de la muestra.
2. Interruptor de palanca: realiza la misma función que el pulsador, pero permite mediciones continuas.
3. Botón 'Zero', con la etiqueta 'Z': permite tomar lecturas 'aire'. Mediante la realización de una medición a "aire", este control vuelve a ajustar el instrumento y lleva las mediciones posteriores dentro del rango de la pantalla.
4. Interruptor On / Off: controla la alimentación interna de la batería y también permite la selección de unidades SI o CGS.
5. Interruptor multiplicador de rango: permite seleccionar el rango de sensibilidad x1 o x0.1. En el segundo caso, el resultado se muestra en el primer lugar del decimal y un aumento de 10 veces en el tiempo de medición proporciona un filtrado de ruido adicional. El interruptor también activa el indicador de batería.

Panel posterior



Apéndice 2, Figura 2 Panel posterior del MS2

Clave de la Figura

1. Conector de la fuente de alimentación
2. Interfaz serie RS-232
3. Interruptor giratorio de tres vías
4. Luz de carga

El panel posterior contiene las siguientes características

1. Conector de la fuente de alimentación: el enchufe del adaptador de corriente debe ser insertado aquí.
2. Interfaz serie RS-232: se puede insertar un cable MS2 RS-232 y conectarlo a un ordenador para permitir el control y la comunicación mediante el software Bartsoft o Multisus.
3. Interruptor rotativo de tres vías: permite al usuario seleccionar una de las tres opciones de configuración de comunicación RS-232.
4. Luz de carga: este LED se encenderá cuando se conecte la alimentación y se cargue la batería del MS2.

MS2E High Resolution Surface Scanning Sensor



Apéndice 2, Figura 3 Sonda magnética MS2E

Clave de la Figura

1. Recinto cerámico con área de detección
2. Conector TNC para la conexión al medidor MS2

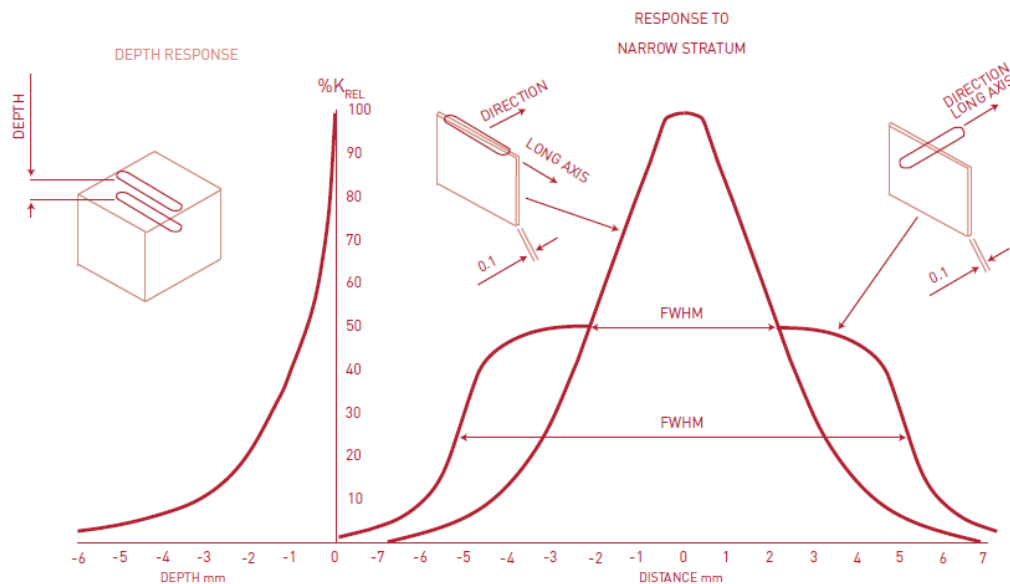
El sensor MS2E es un sensor de superficie que puede mantenerse a mano o fijarse en un sistema de medición de núcleo. La superficie de detección está en el extremo de un tubo cerámico, que está montado en un recinto metálico que aloja el circuito electrónico. La superficie del sensor debe mantenerse en contacto con la muestra durante el uso. La bobina es de forma elíptica, por lo tanto, se debe tener en cuenta la orientación del sensor, indicada por dos marcas negras a cada lado del tubo.

El sensor MS2E está diseñado para realizar mediciones en alta resolución de susceptibilidad magnética a lo largo de superficies planas que tienen una rugosidad inferior a 1 [mm]. Cada sensor se calibra individualmente para medir el verdadero χ_{vol} , cuando se mide contra una superficie plana superior a 10 [mm] de profundidad, y también se calibra individualmente para compensar la deriva inducida por la temperatura. El sensor se conecta directamente al medidor MS2 a través de un cable coaxial TNC-TNC.

La respuesta al material magnético en la proximidad del área de detección, medida en el plano del sensor, muestra un perfil rectangular con un eje largo y un eje corto. La dirección del eje largo está marcada en la circunferencia del recinto cerámico y la dirección también se muestra simbólicamente en la etiqueta del sensor.

La respuesta rectangular permite dos modos de funcionamiento.

- Con el eje largo paralelo a estratos estrechos, se obtiene la máxima sensibilidad espacial para mediciones detalladas.
- Con el eje largo perpendicular a los estratos, la medición se integra en un intervalo más largo y se obtiene un valor medio.



Apéndice 2, Figura 4 Respuestas características de la sonda MS2

Se dan dos características de respuesta:

1. Respuesta a estrato estrecho (en el plano del sensor). Esto muestra que la anchura total a la mitad de la respuesta máxima (FWHM) es de alrededor de 11,5 [mm] con el eje de detección largo perpendicular a la estratigrafía, y alrededor de 3,8 [mm] con el eje de detección largo paralelo a la estratigrafía.

2. Respuesta de profundidad (normal al plano del sensor). Esto muestra la velocidad a la que la respuesta relativa disminuye con la profundidad por debajo de la superficie del sensor. La respuesta se reduce aproximadamente un 50% a una profundidad de 1 [mm].

Esto muestra la velocidad a la que la respuesta relativa disminuye con la profundidad por debajo de la superficie del sensor. La respuesta se reduce aproximadamente un 50% a una profundidad de 1 [mm]

Para la calibración del MS2E se utiliza una muestra de calibración que debe utilizar periódicamente para comprobar que el sensor está funcionando correctamente.

- Nunca se debe exponer la muestra de calibración a campos de alta magnetización ya que pueden alterar el valor de calibración.
- La cara correcta de la muestra de calibración debe estar alineada con la cara del sensor MS2E. Ésta es su cara negra, que es el material real de la muestra.
- Las líneas negras de cada lado de la etiqueta de muestra de calibración deben orientarse con las marcas en el cabezal del sensor MS2E que indican su eje largo.

El sensor se calibra para leer la verdadera susceptibilidad volumétrica, donde la muestra es efectivamente infinitamente grande. El valor χ_{vol} mostrado en el MS2 en el rango x1 y CGS es por lo tanto equivalente al que se obtendría para 1cc, y es igual a $\chi_{vol} \times 10^{-6}$ CGS.

El instrumento puede estar preconfigurado para mostrar el valor de susceptibilidad en el rango 1.0 o 0.1. La siguiente tabla muestra el valor del exponente del dígito menos significativo (es decir, el último dígito en la pantalla LCD) para cada rango. Las unidades para la susceptibilidad volumétrica se presentan a continuación.

Valor del exponente para el dígito menos significativo en rangos de 1.0 y 0.1		
	SI	CGS
1.0	10^{-5}	10^{-6}
0.1	10^{-6}	10^{-7}

Apéndice 2, Tabla 1 Exponente del dígito menos significativo del valor arrojado en la pantalla del MS2 según el rango seleccionado

La posición correcta de la muestra de calibración es alineada con la cara del sensor MS2E. La etiqueta de calibración está en la parte superior para que la cara negra de la muestra esté alineada con la cara del sensor.



Apéndice 2, Figura 5 Calibración de la sonda MS2E

Toma de mediciones:

1. Para comenzar con las mediciones primero hay que conectar el sensor MS2E al medidor MS2 a través del cable coaxial TNC-TNC.
2. Antes de usarlo, se debe realizar una medición de la muestra de calibración para asegurarse de que el sensor está funcionando correctamente.
3. Se seleccione el rango de funcionamiento deseado en el medidor MS2 (x1 ó x0.1) siempre comenzando con x1 para establecer un resultado aproximado y de ser necesario se cambia a x0.1 para mediciones más sensibles y también se selecciona el sistema de unidades (SI o CGS) a usar. Después de un tiempo de calentamiento de 10 minutos, el sensor estará listo para tomar mediciones.
4. El sensor se pone a cero al medir el aire presionando el botón 'Z'. Durante el período de puesta a cero, el sensor debe estar al menos 2 cm por encima de la superficie de medición. La pantalla aparecerá en blanco y aparecerán dos puntos para mostrar que el instrumento está 'ocupado'. La finalización de un ciclo Z se anunciará con un pitido y la pantalla mostrará todos los ceros.
5. Cuando termine el período de medición a cero se coloca el sensor contra la superficie a medir y presione el botón 'M'.
6. Para la colocación del sensor se elige un lugar adecuado para las mediciones. Las mediciones de los núcleos sólo deben realizarse en una superficie no conductora, como un banco de madera. Aunque el sensor toma medidas sólo en la proximidad de la superficie de la sonda, su sensibilidad alta hace que sea susceptible a la influencia de grandes conductores eléctricos o materiales magnéticos a varios centímetros de la sonda.

7. Es convenientemente cubrir el núcleo con una fina película de PVC. La película evitará la contaminación de la superficie de medición del sensor y por lo tanto evitará errores de esta fuente. La película de cocina tiene un espesor de aproximadamente 0,02 mm y la reducción del factor de escala debido a esta distancia puede ser ignorada.
8. Una regla no magnética se puede fijar o soportar a lo largo del núcleo para medir el intervalo de medición, que puede ser típicamente de 5 cm.
9. Se debe dejar que el núcleo y el sensor alcancen la misma temperatura antes de realizar mediciones. Después de poner a cero a 'aire', se obtiene la primera medición y a continuación se pasa al siguiente punto para tomar una segunda medición, se recomiendan hacer cinco mediciones antes de la necesidad de volver a cero. La elección de la orientación del sensor con respecto al núcleo dependerá de si se va a intentar o no un examen detallado de la laminación del núcleo.



Apéndice 2, Figura 6 Medición de la susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética corresponde a la capacidad de un material para ser magnetizado en un campo externo. La susceptibilidad de volumen χ_{vol} puede estar directamente relacionada con la permeabilidad relativa (μ_r) de un material:

$$\chi_{vol} = \mu_r - 1 \quad (1)$$

Donde:

μ_r es la relación de permeabilidad del material / permeabilidad del vacío.

El medidor MS2 se basa en el cambio de inductancia en un inductor cuando se cambia la permeabilidad de su núcleo. El estado de referencia se mide cuando el sensor contiene

sólo aire (la permeabilidad del aire se aproxima como la permeabilidad de un vacío). Tomar una lectura con una muestra dará entonces la permeabilidad del material.

Cualquier desviación del sensor inducida térmicamente necesita ser eliminada, obteniendo ocasionalmente un nuevo valor 'aire', para restablecer la referencia cero. Esto se hace, como ya se mencionó, presionando el botón 'Z' en el medidor MS2. El valor de susceptibilidad magnética se visualiza digitalmente y se emite a través de una interfaz serie.

El estado magnético de una muestra se describe generalmente mediante la siguiente ecuación:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

Donde:

B es la densidad de flujo de la muestra en T (Tesla). ($B = \mu H$)

μ_0 es la permeabilidad del espacio libre en [NA^{-2}]. Esta es una constante ($4\pi \times 10^{-7}$)

H es la intensidad de campo aplicada en Am^{-1} .

M es la magnetización de la muestra en Am^{-1} . ($M = \chi_{\text{vol}} H$)

Dividiendo todo por H obtenemos:

$$\mu = \mu_0 + \mu_0 \chi_{\text{vol}} \quad (3)$$

Donde:

μ es la permeabilidad de la muestra (en NA^{-2})

χ es susceptibilidad magnética de volumen de la muestra (sin dimensiones)

Reescribiendo obtenemos:

$$\mu_0 \chi_{\text{vol}} = \mu - \mu_0 \quad (4)$$

El sistema de susceptibilidad magnética MS2 se basa en el principio de que cualquier cambio en la permeabilidad de un núcleo provocará un cambio en la inductancia de un inductor.

Los sensores funcionan según el principio de la inducción de corriente alterna. Se suministra potencia al circuito oscilador dentro del sensor, generando un campo magnético alterno de baja intensidad.

La frecuencia de oscilación está determinada por la inductancia del sistema. Cuando el inductor contiene sólo aire, la permeabilidad μ_0 determina la inductancia. Cuando se introduce una muestra dentro del inductor, el cambio en la permeabilidad también conduce a un cambio en la inductancia.

El medidor lee los valores de frecuencia para μ_0 y μ , y los utiliza para calcular el cambio en la inductancia, y, por lo tanto, la permeabilidad magnética. La susceptibilidad magnética se calcula entonces mediante la ecuación (3).

El valor de μ_0 es constante, pero la variable de interés es relativamente pequeña. Por lo tanto, cualquier deriva del sensor inducida térmicamente necesita ser eliminada obteniendo de vez en cuando un nuevo valor 'aire', para restablecer la referencia μ_0 .

Apéndice 3 Manual de Uso: Equipo Medidor SCIP (Sample Core Induction Polarization)

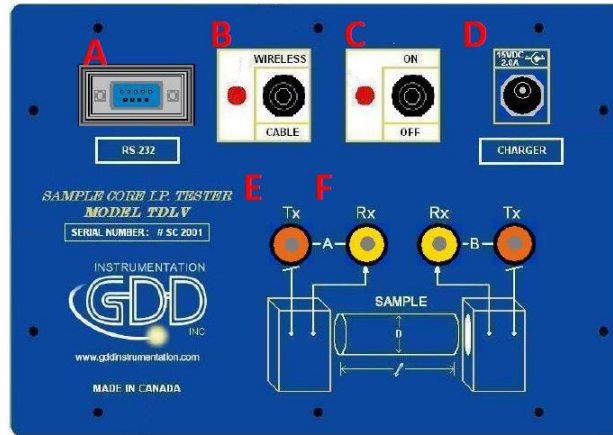
Mide la resistividad aparente y la cargabilidad según el método eléctrico de polarización inducida en el dominio de tiempo.

Consta de los siguientes componentes y accesorios :

- A. 1x Medidor SCIP
- B. 1x Conjunto de soporte para muestras
- C. 1x Computador de bolsillo Archer Field PC con batería recargable Li-Ion
- D. 2x Cables rojos banano/banano o banano/aligátor
- E. 2x Cables negros banano/banano o banano/aligátor
- F. 1x Bloque de alimentación mural para el medidor SCIP (voltaje universal)
- G. 1x Cargador AC para el computador de bolsillo Archer
- H. 1x Cable de comunicación serie 9 pos. D-SUB hembra- 9 pos. D-SUB hembra
- I. 1x Cable USB para el computador de bolsillo Archer
- J. 1x CD de documentación para el computador de bolsillo Archer
- K. 1x Manual de uso y CD de utilización del medidor SCIP



Apéndice 3, Figura 1 Componentes y accesorios del equipo medidor SCIP

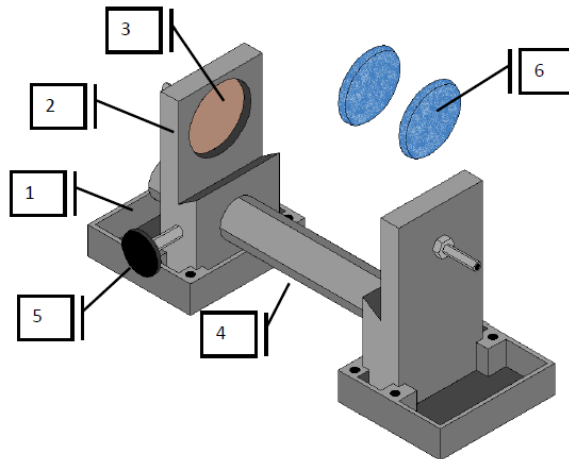


Apéndice 3, Figura 2 Componentes del Medidor SCIP

- A. Conector RS-232 puerto de comunicación serie de 9 posiciones
 - Este conector está utilizado para unir el cable RS-232 entre el Archer y el medidor SCIP
- B. Conmutador cable/Wireless
 - Este conmutador se utiliza para seleccionar el modo de comunicación con cable (RS-232) o inalámbrico (Bluetooth) entre el Archer y el equipo medidor SCIP. La luz roja muestra el modo de comunicación inalámbrico
- C. Conmutador ON/OFF
 - Este conmutador se utiliza para encender el medidor SCIP. La luz roja indica que el aparato está encendido
- D. Conector CHARGER
 - Este conector se utiliza para cargar la batería del medidor SCIP con la ayuda del bloque de alimentación mural
- E. Bornes del TX
 - Electrodo de transmisión
- F. Bornes del RX
 - Electrodo de recepción

Los elementos que componen los soportes se muestran a continuación:

Componentes del soporte

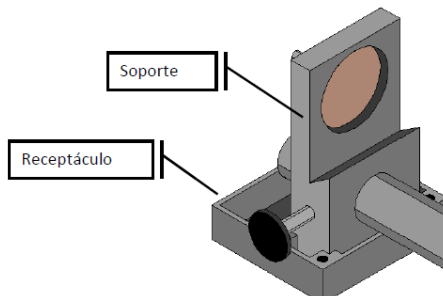


Apéndice 3, Figura 3 Elementos del conjunto del soporte de muestras del SCIP

1. 2x Receptáculo
 - Se utilizan a fin de recoger el exceso de líquidos para mantener la superficie entre los dos electrodos completamente seca.
2. 2x Soporte
 - Los dos soportes mantienen el núcleo de muestra en su lugar. Los soportes están fijados dentro de los receptáculos con la ayuda de dos pernos
3. 2x Electrodo
 - Los electrodos se constituyen de un disco de cobre soldado a un perno de acero inoxidable. Un conector banano puede ser directamente enchufado al perno
4. Varilla graduada
 - La varilla une los dos soportes, uno de ellos es móvil y se desplaza a través de la varilla, permitiendo ajustar la distancia entre los dos soportes en función del largo del núcleo. Se pueden fijar dos o tres varillas para aumentar la distancia
5. Tornillo de fijación
 - Permite fijar el soporte sobre la varilla una vez que la distancia deseada es alcanzada
6. Esponjas de celulosa mojadas en solución de sulfato de cobre
 - La utilización de esponjas mojadas en solución de sulfato de cobre aumenta el contacto entre el núcleo y los electrodos

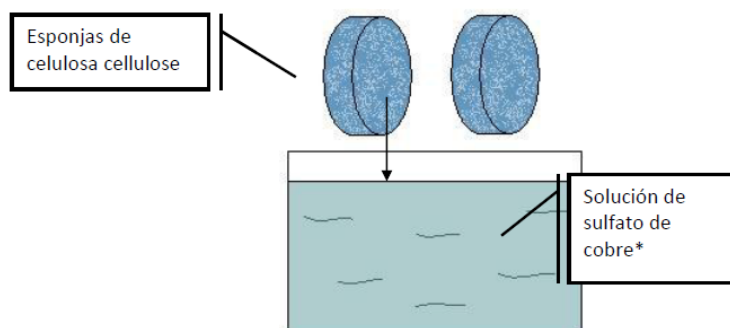
Modo de uso del equipo SCIP

1. Colocar la muestra entre los soportes
 - a. Fijar los soportes dentro de los receptáculos mediante los pernos dispuestos a fin de mantener la superficie entre los soportes completamente seca



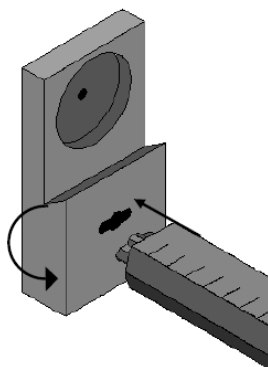
Apéndice 3, Figura 4 Fijación del soporte y receptáculo del equipo SCIP

- b. Remojar las esponjas de celulosa en solución de sulfato de cobre



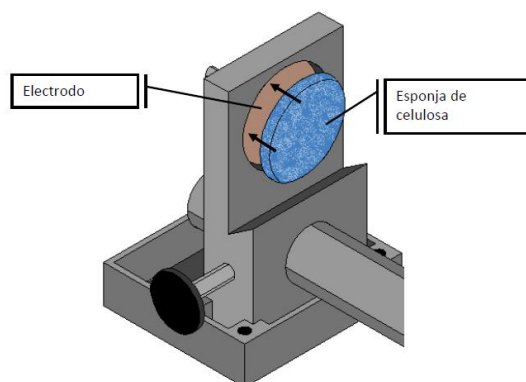
Apéndice 3, Figura 5 Ilustración del remojo de las esponjas en la solución de sulfato de cobre

- c. Insertar una o dos varillas dependiendo del largo de la muestra a medir



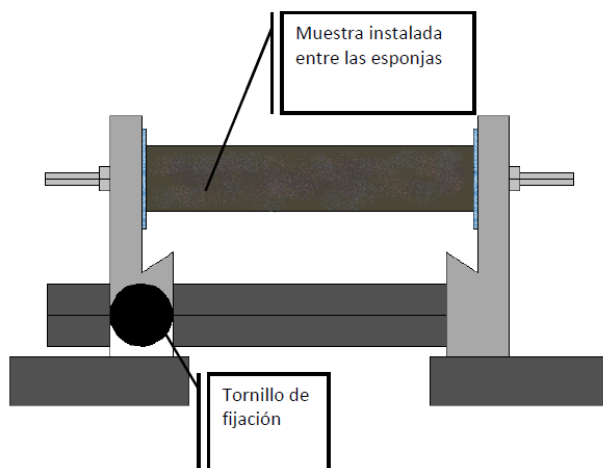
Apéndice 3, Figura 6 Ajuste de la varilla graduada con el soporte del SCIP

- d. Asegurarse de que las esponjas estén perfectamente apoyadas sobre los electrodos



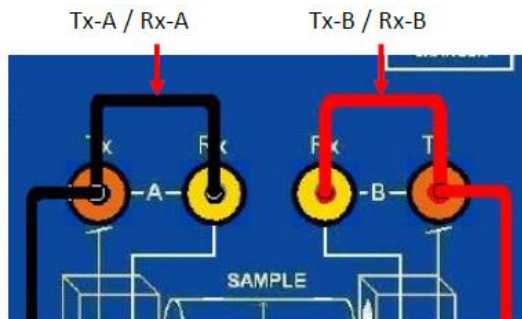
Apéndice 3, Figura 7 Contacto de las esponjas mojadas en solución de sulfato de cobre con los electrodos de cobre del soporte del SCIP

- e. Instalar la muestra entre las esponjas, y atornillar el tornillo de fijación una vez que los soportes estén colocados a la distancia deseada



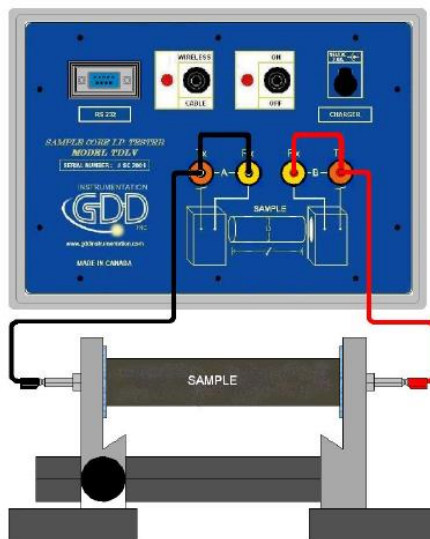
Apéndice 3, Figura 8 Colocación y fijación de la muestra en el soporte del SCIP

- f. Sobre el medidor SCIP unir el electrodo Tx-A al electrodo Rx-A y el electrodo Tx-B al electrodo Rx-B



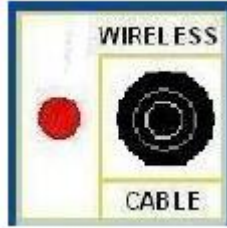
Apéndice 3, Figura 9 Conexión de los electrodos de transmisión y recepción a través de los bornes A y B mediante los cables banana-banana del medidor SCIP

- g. Enchufar los electrodos A y B en los pernos de los electrodos



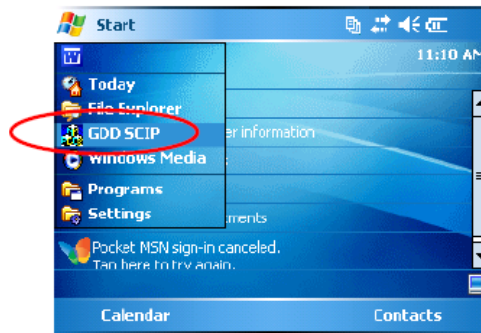
Apéndice 3, Figura 10 Conexión final de la muestra con los electrodos del equipo medidor SCIP

- h. Durante la toma de mediciones asegurarse de que la superficie entre los soportes esté completamente seca
2. Encender el SCIP con la ayuda del conmutador ON/OFF sobre la interfaz del SCIP
 3. Seleccionar el modo de comunicación utilizando el conmutador CABLE/WIRELESS sobre la interfaz de medidor SCIP. Si el cable es seleccionado, enchufar el cable de comunicación serie entre el SCIP (conector RS-232) y el Archer PC



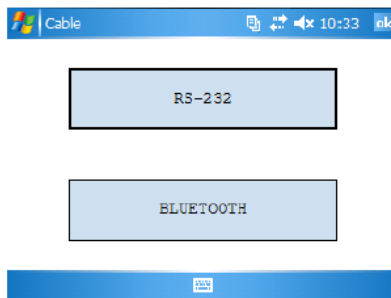
Apéndice 3, Figura 11 Conmutador Cable/Wireless del medidor SCIP

4. Encender el Archer PC con el botón ON/OFF
5. Hacer clic sobre el menú STAR y seleccionar el programa GDD SCIP



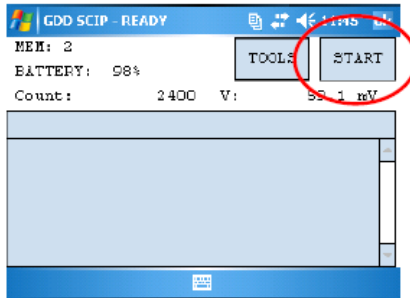
Apéndice 3, Figura 12 Selección del programa GDD SCIP en el computador de bolsillo Archer Field PC

6. Seleccionar el modo de comunicación: RS-232 (cable) o Bluetooth (inalámbrico)



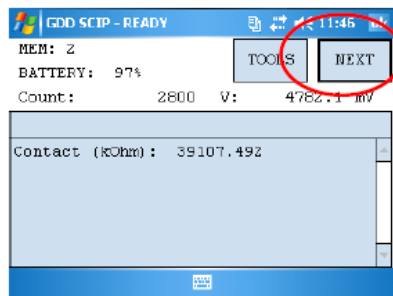
Apéndice 3, Figura 13 Selección del modo de comunicación entre el computador Archer y el medidor SCIP

7. Aparecerá la ventana siguiente, hacer clic sobre START para empezar el proceso de adquisición



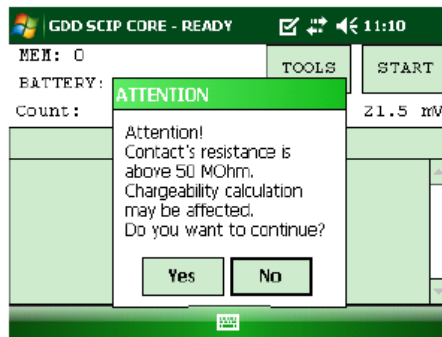
Apéndice 3, Figura 14 Ventana de inicio del programa GDD SCIP

8. Aparecerá la siguiente ventana. El CONTACT es el valor de resistencia del núcleo, hacer clic en NEXT para continuar



Apéndice 3, Figura 15 Ventana con el valor de la resistencia al contacto de la muestra medida

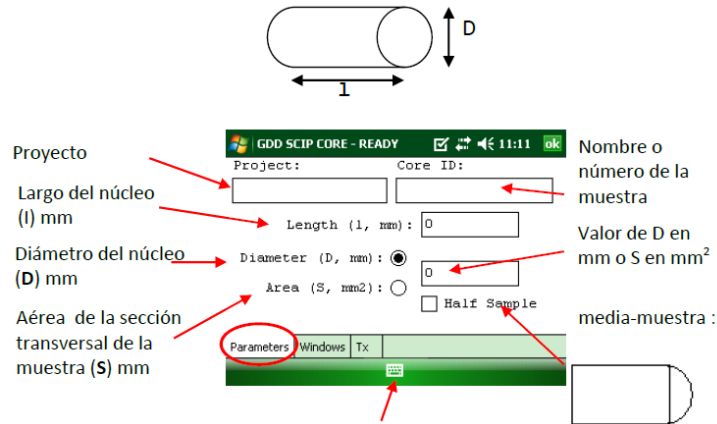
- a) Si el valor de la resistencia al contacto de la muestra es superior a 50,000 KOhm, la medida de la cargabilidad. En este caso presionando sobre NEXT, un mensaje de advertencia debería aparecer



Apéndice 3, Figura 16 Ventana con mensaje de atención que aparece cuando la resistencia al contacto sobrepasa los 50 MOhm

Hacer clic en YES para continuar o clic en No para detener la operación

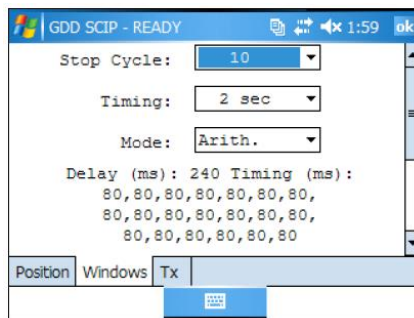
9. Inscribir los parámetros del núcleo en la ventana PARAMETERS, utilizando el teclado que aparece al hacer clic en el botón inferior de la pantalla.



Apéndice 3, Figura 17 Ventana de parámetros de la muestra del programa GDD SCIP

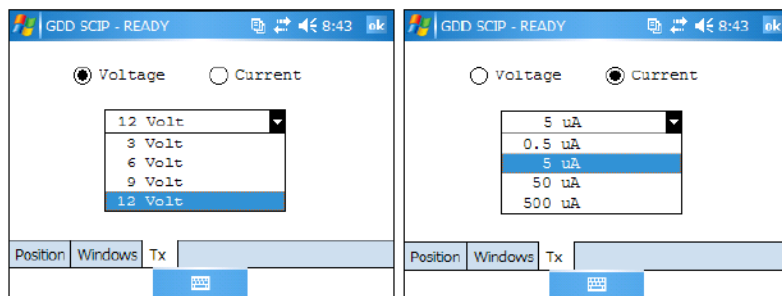
Para un núcleo de perforación cilíndrico seleccionar DIAMETER e introducir el valor del diámetro en [mm]. Si el núcleo es cortado en dos partes selecciona HALF SAMPLE. Para cualquier otro tipo de muestra introducir el área de la sección transversal en mm^2

10. En la ventana Windows, seleccionar el número máximo de ciclos, la base de tiempo y el modo



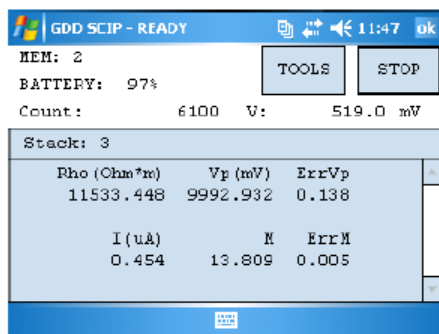
Apéndice 3, Figura 18 Ventana Windows del programa GDD SCIP

11. En la ventana Tx , seleccionar una tensión constante de 3, 6, 9 o 12 volt o una corriente constante de 0.5, 5, 50 o 500 microamperio



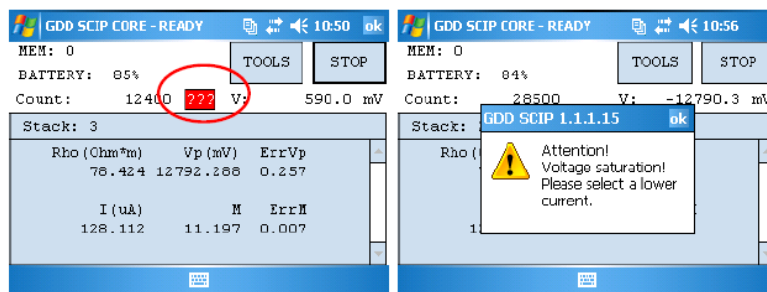
Apéndice 3, Figura 19 Ventana Tx con las opciones Voltaje y Corriente del programa GDD SCIP

12. Hacer clic sobre OK para cerrar la ventana de los parámetros
13. Las siguientes lecturas aparecen



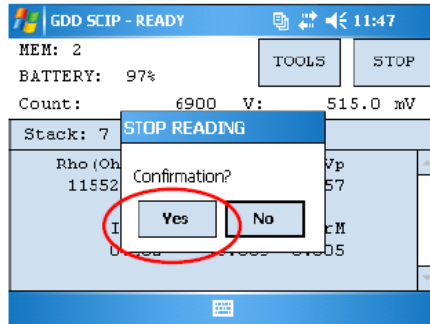
Apéndice 3, Figura 20 Ventana con las lecturas obtenidas por el programa GDD SCIP

En modo corriente constante, si un cuadro rojo parpadea en la pantalla, significa que la señal está saturada. En este caso, hacer clic sobre STOP para detener la operación y empezar nuevamente utilizando una corriente más baja. Las instrucciones están indicadas en la ventana que aparece al hacer clic sobre el cuadro rojo



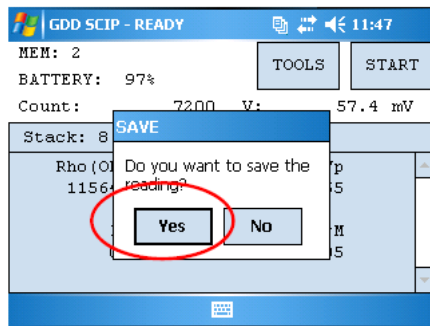
Apéndice 3, Figura 21 Mensaje que indica que la señal está saturada del programa GDD SCIP

14. Hacer clic sobre STOP o esperar el número de ciclos configurado para parar las lecturas y grabar los datos
15. En caso de hacer clic en STOP y después hacer clic en YES para confirmar la interrupción de la operación



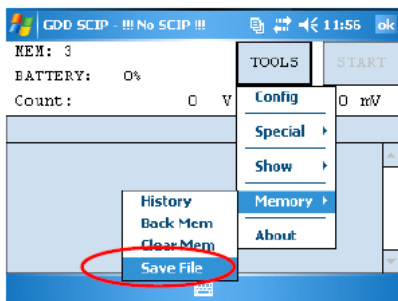
Apéndice 3, Figura 22 Recuadro de confirmación para detener la lectura del programa GDD SCIP

16. Hacer clic sobre Yes para grabar la lecturas en la memoria



Apéndice 3, Figura 23 Recuadro para confirmar el guardado de la lectura del programa GDD SCIP

17. Hacer clic sobre TOOLS y seleccionar MEMORY para crear un archivo con los datos guardados. Seleccionar SAVE FILE



Apéndice 3, Figura 24 Ruta indicada para la creación de un archivo con los datos guardados del programa GDD SCIP

18. Entrar el nombre del archivo y el lugar donde el archivo será grabado en la memoria del Archer PC



Apéndice 3, Figura 25 Ventana para el nombre del archivo y el lugar donde será guardado en la memoria del Archer PC

19. Hacer clic sobre SAVE para grabar el archivo

El archivo creado cuenta con una extensión .txt y puede ser importado desde un desde un programa de cálculo como Excel.

Apéndice 4: Resistividad y Cargabilidad de las Cinco Muestras, en los Tres Escenarios, Experimento 1

Las tablas siguientes muestran tres secciones: *variables de interés* (resistividad y cargabilidad), *parámetro seleccionado* y *parámetro medido* (voltaje o corriente) y en su caso está dividida en los valores obtenidos en la *primera* y *segunda prueba*.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos en núcleo seco, en segundo lugar los resultados obtenidos en núcleo mojado en agua y en tercer lugar los obtenidos en núcleo mojado en salmuera.

El equipo SCIP cuenta con la posibilidad de manipular los parámetros voltaje o corriente para la medición de la resistividad de las muestras, cualquiera de estos parámetros puede ser seleccionado y su valor fijado para la medición, para el voltaje en 3, 6 9 o 12 [V] y para la corriente en 0.5, 5, 50 o 500 [μ A]. Sin embargo, a su vez, el valor de este parámetro es medido en tiempo real por el equipo, el cual debe aproximarse lo más posible al valor del parámetro seleccionado. Entre mayor sea la proximidad de estos valores la prueba contará con mayor grado de confiabilidad.

En el caso de seleccionar como parámetro de cálculo al voltaje, se debe observar siempre que el valor medido no sea menor a la mitad del valor seleccionado que es un límite a partir del cual la prueba pierde precisión.

Núcleo seco

Muestra 098-11					
Prueba única					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω -m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μ A]	Voltaje [mV]	Corriente [μ A]
40,079.90	7.01	3		2998.48	0.90
40,348.47	6.97	6		5998.518	1.79
40,619.38	6.94	9		8978.958	2.67
40,791.81	6.90	12		11976.71	3.55
40,942.27	6.95		0.5	1688.42	0.49
41,203.26	6.91		5	10450.32	3.07

Saturación de corriente a 3.07 [mV/V]

Muestra 203-3					
Prueba única					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
90.13	1.56	3		2678.62	328.23
90.40	2.11	6		5359.28	654.78
90.70	2.27	9		8025.01	977.23
91.00	2.22	12		10707.31	1299.47
92.22	1.11		0.5	4.12	0.49
92.29	1.42		5	41.61	4.98
92.36	1.39		50	417.67	49.94
92.43	1.90		500	4191.17	500.79

Muestra 230-3					
Prueba única					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
755324.88	21.30	3		3007.03	0.06
731042.16	20.84	6		6014.97	0.12
722258.50	20.72	9		9004.18	0.19
713152.16	20.67	12		12010.29	0.25
693017.12	20.00		0.5	10695.05	0.23

Saturación de corriente a 0.23 [mV/V]

Muestra 230-6					
Prueba única					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
55516.43	0.78	3		3003.59	0.40
53580.97	0.75	6		6008.00	0.82
52442.05	0.73	9		8993.12	1.26
52076.0	0.73	12		11995.66	1.69
50908.58	0.71		0.5	3479.23	0.50
49855.49	0.70		5	11355.14	1.67

Saturación de corriente a 1.67 [mV/V]

Muestra 359-15					
Prueba única					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
336155.01	10.65	3		3007.34	0.04
342693.27	11.00	6		6015.63	0.08
346286.37	10.98	9		9005.21	0.12
349013.13	11.13	12		12011.67	0.15
348421.93	11.18		0.5	11184.65	0.14

Saturación de corriente a 0.14 [mV/V]

Núcleo mojado en agua

Muestra 098-11					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
11921.48	3.22	3		3004.41	3.05
12222.16	3.21	6		6010.16	5.94
12514.63	3.19	9		8919.52	8.61
12622.89	3.17	12		11897.91	11.39
12880.77	3.29		0.5	529.86	0.49
12966.99	3.24		5	5360.86	4.99
13059.25	3.19		50	11675.26	10.80
Segunda prueba					
10012.58	2.99	3		3003.89	3.63
10211.74	2.9	6		6008.98	7.11
10369.73	2.95	9		8995.41	10.48
10535.48	2.93	12		11998.93	13.76
10661.89	3.03		0.5	444.69	0.50
10820.64	3.00		5	4513.36	5.04
10928.50	2.95		50	11746.88	12.99

Saturación de corriente a 10.8 y 12.99 [mV/V] para la primera y segunda prueba

Muestra 203-3					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
14.26	12.30	6		3384.41	2621.94
14.08	8.52	12		6719.65	5270.64
15.43	34.39		0.5	0.69	0.496
15.46	31.65		5	6.97	4.98
15.43	31.93		50	69.75	49.938
14.97	27.63		500	678.77	500.73
Segunda prueba					
14.54	17.60	3		1708.94	1296.24
14.26	12.56	6		3384.87	2621.53
14.12	8.96	9		5044.68	3946.53
14.03	7.14	12		6708.91	5282.40
14.62	7.52		0.5	0.66	0.49
14.80	8.97		5	6.67	4.98
14.86	10.19		50	67.21	49.94
14.81	15.52		500	671.52	500.73

El voltaje medido es apenas por encima de la mitad del voltaje seleccionado

Muestra 230-3					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
339.37	0.82	3		2881.08	126.33
338.70	0.83	6		5762.27	253.18
339.36	0.86	9		8626.11	378.27
340.47	0.90	12		11507.07	502.96
344.00	1.05		0.5	11.47	0.49
345.22	0.82		5	115.48	4.98
347.21	0.84		50	1165.53	49.95
346.05	0.89		500	9473.94	407.42
Segunda prueba					
301.39	0.68	3		2865.95	141.51
302.41	0.68	6		5733.04	282.12
303.71	0.68	9		8583.93	420.60

305.02	0.68	12		11451.31	558.68
308.62	1.13		0.5	10.26	0.49
309.49	0.70		5	103.60	4.98
310.44	0.70		50	1042.10	49.96
310.99	0.69		500	9088.71	434.91

Saturación de corriente a 407.42 y 434.91 [mV/V]

Muestra 230-6					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
73.07	5.12	3		2732.93	273.98
71.12	4.16	6		5452.64	561.59
70.46	3.52	9		8155.09	847.83
70.01	3.08	12		10870.23	1137.40
69.35	4.46		0.5	4741.27	0.49
68.23	6.30		5	465.22	4.98
67.93	6.30		50	46.15	49.94
67.19	6.36		500	4.57	500.78
Segunda prueba					
64.63	3.73	3		2700.67	306.10
64.51	3.44	6		5400.79	613.23
64.46	3.03	9		8084.22	918.65
64.49	2.71	12		10783.26	1224.77
65.05	3.04		0.5	4.41	0.49
65.43	3.18		5	44.48	4.98
65.44	3.27		50	446.21	49.95
65.13	3.63		500	4452.47	500.79

Muestra 359-15					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
69613.35	3.51	3		3005.68	0.19
69749.14	3.50	6		6012.57	0.38
70012.92	3.52	9		9000.72	0.57
69579.83	3.50	12		12004.40	0.76

69274.42	3.49		0.5	7731.99	0.49
69071.62	3.49		5	11615.71	0.74
69403.51	3.50		50	11883.02	0.75
69149.98	3.49		500	12742.51	0.81
Segunda prueba					
124107.58	5.67	3		3006.72	0.11
125346.73	5.65	6		6014.39	0.21
125920.72	5.69	9		9002.69	0.32

Saturación de corriente a 0.74, 0.75 y 0.81 [mV/V] primera prueba

Núcleo mojado en salmuera

Muestra 098-11					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
1960.86	0.525	3		2988.99	18.42
1986.47	0.527	6		5979.63	36.37
2004.36	0.526	9		8951.83	53.97
2022.91	0.526	12		11940.45	71.32
2047.50	0.518		0.5	84.46	0.49
2082.37	0.547		5	860.28	4.99
2083.70	0.540		50	8247.75	47.83
2066.90	0.528		500	12378.51	72.37
Segunda prueba					
1498.08	0.446	3		2983.29	24.06
1491.13	0.447	6		5967.68	48.36
1501.19	0.443	9		8934.42	71.913
1486.31	0.449	12		11915.64	96.87
1510.51	0.463		0.5	62.14	0.49
1509.90	0.459		5	623.58	4.99
1504.69	0.452		50	6228.6	50.017
1497.50	0.448		500	12265.44	98.97

Saturación de corriente a 47.83, 72.37 primera prueba y 98.97 segunda prueba

Muestra 203-3					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω·m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
3.37	12.95	3		700.76	2299.63
3.25	9.89	6		1364.04	4636.60
3.20	6.46	9		2016.51	6965.56
3.16	4.74	12		2664.73	9312.57
3.65	8.59		0.5	0.16	0.49
3.71	10.45		5	1.67	4.98
3.73	9.96		50	16.85	49.94
3.71	12.01		500	168.11	500.73
Segunda prueba					
3.26	8.64	3		683.50	2316.97
3.21	6.46	6		1351.50	4649.35
3.18	5.23	9		2006.88	6976.28
3.16	4.52	12		2662.28	9316.26
3.27	7.66		0.5	0.15	0.49
3.28	8.09		5	1.48	4.98
3.30	7.02		50	14.94	49.94
3.31	7.90		500	149.99	500.73

El voltaje medido es menor a un cuarto del voltaje seleccionado

Muestra 230-3					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [ohm·m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
9.15	5.00	3		1143.04	1858.45
9.05	3.50	6		2270.76	3732.67
9.01	2.61	9		3389.65	5596.44
9.01	2.07	12		4519.53	7464.86
9.25	-1.74		0.5	0.31	0.49
9.40	4.47		5	3.15	4.98
9.53	4.56		50	31.99	49.94
9.56	4.88		500	321.78	500.72
Segunda prueba					
8.07	3.46	3		1055.52	1946.07

8.06	3.07	6		2109.81	3893.73
8.06	2.62	9		3156.70	5829.56
8.06	2.30	12		4210.60	7773.59
8.16	2.83		0.5	0.27	0.49
8.18	2.39		5	2.74	4.98
8.20	2.30		50	27.51	49.94
8.23	2.53		500	276.81	500.74

Voltaje medido por debajo de la mitad del voltaje seleccionado

Muestra 230-6					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω·m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
2.87	8.38	3		844.52	2156.29
2.80	7.63	6		1658.21	4343.44
2.76	5.86	9		2458.701	6524.76
2.74	4.22	12		3262.63	8717.30
3.09	8.33		0.5	0.21	0.49
3.16	3.95		5	2.15	4.98
3.21	4.42		50	21.87	49.94
3.20	7.57		500	218.47	500.72
Segunda prueba					
2.79	6.70	3		827.37	2173.54
2.74	4.76	6		1631.77	4370.23
2.71	3.94	9		2427.05	6557.53
2.70	3.43	12		3224.44	8756.56
2.75	3.52		0.5	0.19	0.49
2.80	6.19		5	1.90	4.978
2.82	6.09		50	19.25	49.94
2.83	7.23		500	193.33	500.74

Voltaje medido por debajo de la mitad del voltaje seleccionado

Muestra 359-15					
Primera prueba					
Variables de interés		Parámetro seleccionado		Parámetro medido	
Rho [Ω-m]	M [mV/V]	Voltaje [V]	Corriente [μA]	Voltaje [mV]	Corriente [μA]
84678.51	3.40	3		3006.00	0.16
86213.80	3.45	6		6013.22	0.31
87845.51	3.51	9		9001.45	0.45
90581.65	3.64	12		12006.75	0.58
92412.29	3.69		0.5	9120.28	0.44
92674.70	3.72		5	11617.11	0.55
Segunda prueba					
54384.17	1.94	3		3003.62	0.40
54795.51	1.95	6		6008.31	0.79
55225.20	1.96	9		8994.52	1.17
54913.81	1.96	12		11997.40	1.57
55661.76	1.99		0.5	3887.09	0.50
56494.01	2.01		5	11549.84	1.47

Saturación de corriente a 0.55 y 1.47 [mV/V] primera y segunda prueba

Como se mencionó anteriormente, para cada prueba, tanto la resistividad como la cargabilidad se midieron utilizando diferentes parámetros de medición (voltaje o corriente). De acuerdo al manual, la confiabilidad de las pruebas se basa en la proximidad del valor previamente seleccionado, de cualquiera de estos parámetros, con el valor real medido por el equipo. En el caso del voltaje, se debe observar que el valor medido no caiga por debajo de la mitad del valor seleccionado, y en el caso de la corriente, que no se presente saturación de corriente y el valor medido se aleje del seleccionado, de suceder, la medición puede perder precisión.

En las tablas anteriores se llegan a presentar los dos casos mencionados (marcados con números amarillos). Sin embargo, cuando se presenta este hecho para los parámetros de voltaje, los valores de resistividad no varían significativamente de los aportados por los parámetros de corriente, donde los valores, seleccionados y medidos, son muy cercanos, lo que aporta confiabilidad a los resultados, lo mismo sucede cuando se presenta una saturación de corriente, los valores de resistividad no varían significativamente de los aportados por los parámetros de voltaje.

En general, en cada prueba, la resistividad no varía de forma significativa independientemente del parámetro de medición utilizado. Por su parte la cargabilidad sí varía de forma significativa según el parámetro utilizado, en determinados casos, principalmente en la muestra 203-3, en núcleo mojado en agua y núcleo mojado en salmuera y en menor medida en las muestras 230-3 y 230-6 en núcleo mojado en salmuera.

Apéndice 5: Longitud, Área, Densidad y Porosidad Vs Profundidad de las Muestras, Experimento 2

Muestra	Profundidad media [m]	Longitud (mm)	Área transversal (mm ²)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
227-1	899.76	76	1384	2.47	6.18
227-1 (A)	899.85	100	1444	2.45	8.24
227-2	899.95	99	1294	2.43	8.59
227-5	900.71	80	1354	2.54	6.28
22medidor 7-7	900.99	102	1384	2.43	5.10
227-8	901.15	99	1027	2.65	2.85
227-8 (A)	901.25	97	1086	2.65	3.13
227-9	901.39	100	1414	2.47	4.81
227-10	901.52	97	1264	2.39	8.32
227-11	901.69	100	1234	2.36	6.89
227-11 (A)	901.79	100	1294	2.47	4.10
228-1	901.95	100	1294	2.62	3.48
228-3	902.12	99	1145	2.59	5.65
228-3 (A)	902.25	102	1264	2.50	4.50
228-4	902.38	98	1384	2.56	5.16
228-6	902.61	100	1444	2.52	5.61
228-7	902.77	98	1444	2.49	4.95
228-9	903.07	100	1324	2.35	6.50
228-9 (A)	903.16	77	1354	2.51	4.80
228-10	903.33	100	1294	2.58	6.18
228-13	903.70	100	1384	2.35	6.14
228-14	903.89	70	1324	2.43	5.93
229-1	904.00	98	1294	2.32	9.15
229-3	904.35	99	1384	2.45	5.47
229-4	904.50	88	1444	2.53	4.09
229-5	904.60	100	1712	2.59	2.10
229-6	904.76	89	1324	2.53	6.79
229-7	904.92	88	1324	2.56	7.72
229-9	905.18	70	1504	2.41	6.36
229-9 (A)	905.25	68	1534	2.53	3.93
229-10	905.38	50	1414	2.14	18.25
229-11	905.44	78	1593	2.42	7.87
229-12	905.60	77	1324	2.55	3.68

229-13	905.77	77	1414	1.92	22.27
230-1	906.12	86	1294	2.59	5.21
230-2	906.32	119	1384	2.53	2.73
230-3	906.43	95	1294	2.51	5.21
230-4	906.51	65	1593	2.54	3.57
230-5	906.71	110	1414	2.38	8.87
230-6	906.86	193	1414	2.30	8.06
230-7	907.01	108	1444	2.43	6.99
230-8	907.27	105	1564	2.32	8.04
230-11	907.46	109	1414	2.56	5.71
230-12	907.79	98	1354	2.43	7.69
230-13	907.98	100	1294	2.63	2.09
230-14	908.08	99	1474	2.64	1.44
230-15	908.20	79	1354	2.67	4.30
231-2	908.46	98	1354	2.63	2.71
231-3	908.56	90	1204	2.52	4.43
231-3 (A)	908.65	90	1354	2.53	4.76
231-4	908.75	98	1414	2.51	3.90
231-9	909.40	89	1329	2.67	1.95
231-11	909.57	100	1534	2.70	0.78
231-12	909.70	153	1564	2.54	4.10
231-13	909.83	100	1593	2.66	3.33
231-14	910.00	70	1444	2.56	3.46
231-16	910.28	77	1414	2.36	8.17
231-17	910.40	79	1474	2.26	8.93
231-18	910.53	98	1354	2.29	9.80
232-1	910.62	89	1444	2.19	5.06
232-3	910.91	99	1324	2.35	8.24
232-4	911.12	88	1384	2.37	8.37
232-5	911.23	49	1354	2.28	7.69
232-7	911.42	99	1324	2.23	9.00
232-8	911.50	59	1534	2.19	10.17
232-9	911.65	81	1354	2.33	7.75
232-12	912.09	100	1444	2.23	11.98
232-13	912.19	98	1294	2.35	9.46
232-14	912.54	100	1324	2.51	4.00
232-15	912.68	101	1354	2.45	6.43
232-16	912.84	98	1264	2.43	5.81
233-1	912.95	100	1324	2.37	9.21
233-2	913.21	108	1354	2.48	9.03

233-2 (A)	913.32	103	1324	2.38	9.31
233-3	913.48	100	1294	2.43	10.51
233-4	914.40	100	1384	2.43	8.96
234-1	915.23	100	1384	2.44	8.31
234-2	915.48	70	1354	2.45	9.07
234-3	915.68	104	1534	2.53	7.46
234-5	915.93	87	1324	2.74	2.34
234-6	916.11	91	1504	2.50	6.87
234-8	916.23	60	1294	2.69	3.99
234-11	916.45	63	1534	2.33	10.76
234-12	916.68	49	1324	2.71	1.08
234-16	916.95	100	1414	2.54	5.09
234-17	917.08	98	1175	2.39	7.21
234-18	917.28	101	1474	2.21	10.01
235-4	917.71	100	1354	2.26	10.93
235-5	917.82	102	1534	2.26	11.57
235-6	918.00	75	1474	2.32	12.21
235-8	918.29	101	1204	2.25	6.83
235-9	918.47	89	1264	2.19	8.53
235-10	918.56	87	1384	2.26	5.23
235-11	918.73	100	1444	2.37	7.76
235-12	918.83	99	1354	2.29	11.94
235-13	919.02	100	1534	2.38	6.19
236-1	919.12	100	1444	2.37	6.16
236-2	919.23	102	1324	2.36	6.96
236-2 (A)	919.33	101	1175	2.19	6.99
236-3	919.43	101	1534	2.32	6.52
236-4	919.67	99	1474	2.32	7.26
236-5	919.78	101	1474	2.33	6.72
236-6	919.97	60	1444	2.40	8.66
236-9	920.43	96	1444	2.38	8.01
236-10	920.53	98	1414	2.39	7.94
236-12	920.91	177	1414	2.39	7.83
236-13	921.04	100	1444	2.35	9.14

Apéndice 6: Resistividad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2

Muestra	Profundidad [m]	Resistividad en núcleo seco [Ω -m]	Resistividad en núcleo mojado en salmuera [Ω -m]
227-1	899.76	43.72	11.42
227-1 (A)	899.85	43.50	7.24
227-2	899.95	29.20	7.52
227-5	900.71	54.53	10.47
227-7	900.99	79.94	12.14
227-8	901.15	125.27	20.38
227-8 (A)	901.25	292.82	23.18
227-9	901.39	233.43	14.66
227-10	901.52	462.34	9.82
227-11	901.69	129.60	10.19
227-11 (A)	901.79	132.51	15.75
228-1	901.95	96.63	17.01
228-3	902.12	42.93	7.80
228-3 (A)	902.25	73.67	10.61
228-4	902.38	41.68	8.92
228-6	902.61	42.22	13.56
228-7	902.77	29.20	21.56
228-9	903.07	27.96	16.71
228-9 (A)	903.16	57.78	23.99
228-10	903.33	21.86	16.66
228-13	903.70	23.87	16.43
228-14	903.89	21.59	21.09
229-1	904.00	45.76	6.10
229-3	904.35	74.75	9.62
229-4	904.50	61.74	13.57
229-5	904.60	53.16	29.70
229-6	904.76	23.85	18.89
229-7	904.92	15.94	22.18
229-9	905.18	46.64	26.46
229-9 (A)	905.25	40.44	26.79
229-10	905.38	16.59	35.69
229-11	905.44	30.04	28.07
229-12	905.60	35.61	24.45
229-13	905.77	37.29	23.60
230-1	906.12	550.54	15.83
230-2	906.32	658.55	34.31
230-3	906.43	751.51	20.44
230-4	906.51	45.11	44.91
230-5	906.71	51.18	26.52
230-6	906.86	351.64	14.30
230-7	907.01	30.26	21.53

230-8	907.27	74.53	20.10
230-11	907.46	50.33	22.60
230-12	907.79	209.78	24.63
230-13	907.98	520.08	83.77
230-14	908.08	440.90	147.15
230-15	908.20	411.47	92.34
231-2	908.46	63.87	44.38
231-3	908.56	177.81	32.86
231-3 (A)	908.65	154.52	31.54
231-4	908.75	143.21	31.80
231-9	909.40	510.59	52.33
231-11	909.57	306.20	53.63
231-12	909.70	244.48	24.06
231-13	909.83	88.84	28.63
231-14	910.00	62.83	28.75
231-16	910.28	33.46	23.05
231-17	910.40	27.87	24.32
231-18	910.53	33.29	20.94
232-1	910.62	44.92	21.53
232-3	910.91	32.72	11.39
232-4	911.12	29.69	14.28
232-5	911.23	39.13	27.63
232-7	911.42	26.29	12.80
232-8	911.50	38.38	27.20
232-9	911.65	23.29	18.13
232-12	912.09	133.33	12.70
232-13	912.19	130.92	14.40
232-14	912.54	42.11	15.33
232-15	912.68	35.63	11.60
232-16	912.84	36.17	11.95
233-1	912.95	31.46	20.27
233-2	913.21	31.19	16.61
233-2 (A)	913.32	32.54	13.82
233-3	913.48	28.26	12.16
233-4	914.40	29.38	13.27
234-1	915.23	56.99	20.85
234-2	915.48	60.50	23.01
234-3	915.68	45.04	11.41
234-5	915.93	316.99	44.98
234-6	916.11	44.91	15.08
234-8	916.23	85.60	38.12
234-11	916.45	51.12	20.14
234-12	916.68	1976.75	355.30
234-16	916.95	47.95	12.99
234-17	917.08	66.89	10.46
234-18	917.28	52.85	9.44
235-4	917.71	47.12	19.73
235-5	917.82	38.43	11.01

235-6	918.00	45.30	32.54
235-8	918.29	43.12	18.88
235-9	918.47	45.68	15.66
235-10	918.56	32.94	17.19
235-11	918.73	31.34	13.64
235-12	918.83	30.96	16.28
235-13	919.02	37.68	14.04
236-1	919.12	58.88	14.69
236-2	919.23	80.94	11.65
236-2 (A)	919.33	88.48	12.80
236-3	919.43	60.19	14.28
236-4	919.67	46.79	14.42
236-5	919.78	50.53	13.14
236-6	919.97	67.60	21.77
236-9	920.43	64.90	13.32
236-10	920.53	73.07	12.13
236-12	920.91	108.68	6.79
236-13	921.04	79.91	10.89

Apéndice 7: Cargabilidad en Núcleo Seco y Mojado en Salmuera, Experimento 2

Muestra	Profundidad [m]	Cargabilidad en seco [mV/V]		Cargabilidad mojado [mV/V]	
		I=cte	V=Cte	I=cte	V=Cte
227-1	899.76		3.72	30.60	4.33
227-1 (A)	899.85		1.59	38.51	8.06
227-2	899.96		7.81	47.91	10.30
227-5	900.71		1.81	41.87	8.66
227-7	900.99		1.25	24.52	6.98
227-8	901.15		8.14	16.08	4.66
227-8 (A)	901.25		4.86	16.37	4.65
227-9	901.39		0.42	24.29	6.04
227-10	901.52		4.06	30.75	7.67
227-11	901.69		7.78	33.94	8.14
227-11 (A)	901.79		7.67	21.04	6.68
228-1	901.95	26.34	6.33	27.43	2.74
228-3	902.12	44.67	3.95	53.16	4.71
228-3 (A)	902.25	31.84	4.98	21.97	4.48
228-4	902.38		1.66	31.12	6.63
228-6	902.61	0.56		50.44	
228-7	902.50	1.94		47.47	
228-9	903.07	105.98	4.67	55.62	
228-9 (A)	903.16	77.45		50.34	
228-10	903.33	77.92		56.08	
228-13	903.70	5.19		51.78	
228-14	903.89	101.60		48.64	
229-1	904.00		2.17	39.97	4.99
229-3	904.35		1.97	25.63	4.37
229-4	904.50		2.20	30.51	4.23
229-5	904.60	23.76		34.77	4.12
229-6	904.76	115.47		45.30	
229-7	904.92	21.59	6.35	52.42	
229-9	905.18	77.09		48.95	
229-9 (A)	905.25	92.79		46.40	
229-10	905.38	60.91		59.58	
229-11	905.44	110.21		54.65	
229-12	905.60	57.88		53.05	
229-13	905.77	19.94		67.36	
230-1	906.12	4.49	3.77	27.47	7.44
230-2	906.32	0.82		32.12	6.29
230-3	906.43	3.15	2.84	53.40	9.48
230-4	906.51	30.73		50.51	
230-5	906.71	10.53		57.57	
230-6	906.86		1.03	52.17	
230-7	907.01	12.41		49.73	

230-8	907.27	13.97	5.72	67.78	
230-11	907.46	6.30		45.45	
230-12	907.79	3.62	3.38	42.71	
230-13	907.98	1.47	2.53	8.53	
230-14	908.08	1.42	3.01	9.29	
230-15	908.20		2.56	10.65	
231-2	908.46	16.14	13.26	36.04	
231-3	908.56	6.06	4.68	36.38	
231-3 (A)	908.65	6.47	3.97	35.42	
231-4	908.75	8.66	3.98	38.36	
231-9	909.40	2.32	2.77	26.17	
231-11	909.57	3.15	3.23	15.98	
231-12	909.70	0.97	2.71	23.80	
231-13	909.83	12.98	3.70	27.11	
231-14	910.00	26.83	9.40	34.69	
231-16	910.28	41.69		47.33	
231-17	910.40	45.92		31.65	
231-18	910.53	32.45	8.47	47.46	
232-1	910.62	49.15		56.02	30.63
232-3	910.91	46.67	2.06	52.53	30.99
232-4	911.12	33.87		53.96	
232-5	911.23	62.27	8.30	65.33	
232-7	911.42	42.70		55.11	
232-8	911.50	58.83		58.89	
232-9	911.65	45.38		66.00	
232-12	912.09	10.93	3.80	52.54	33.63
232-13	912.19	6.94		43.87	25.20
232-14	912.54	20.48	7.90	40.31	21.25
232-15	912.68	25.60		54.79	30.55
232-16	912.84	32.28		53.39	27.92
233-1	912.95	53.06		69.09	16.15
233-2	913.21	41.18	14.73	61.46	14.40
233-2 (A)	913.32	30.25		56.71	14.52
233-3	913.48	42.34		54.61	15.65
233-4	914.40	52.36		57.90	17.75
234-1	915.23	49.11		78.45	12.79
234-2	915.48	48.85		68.23	18.39
234-3	915.68	48.20		53.52	19.78
234-5	915.93	6.77	3.98	16.26	7.88
234-6	916.11	49.00		71.4	20.36
234-8	916.23	35.84		30.18	11.86
234-11	916.45	49.01		57.94	23.82
234-12	916.68	4.31	3.72	4.74	4.34
234-16	916.95	22.18		47.67	24.20
234-17	917.08	15.85	2.82	47.94	28.54
234-18	917.28	24.82		40.48	38.61
235-4	917.71	28.67		61.35	28.92
235-5	917.82	26.90		53.08	30.86

235-6	918.00	39.15		44.42	
235-8	918.29	32.91		65.48	34.04
235-9	918.47	26.19		50.86	26.49
235-10	918.56	25.44		58.72	32.49
235-11	918.73	43.87		49.30	29.12
235-12	918.83	30.49		51.10	25.73
235-13	919.02	34.81		59.62	28.72
236-1	919.12	25.43		56.46	
236-2	919.23	21.10		56.33	
236-2 (A)	919.33	14.53	5.34	73.93	
236-3	919.43	19.96		75.82	
236-4	919.67	16.10		77.53	
236-5	919.78	28.22		81.15	
236-6	919.97	39.95		73.89	
236-9	920.43	19.07		73.10	
236-10	920.53	19.02		68.59	
236-12	920.91	11.99		67.92	
236-13	921.04	22.35		66.72	

Apéndice 8: Susceptibilidad Magnética a Profundidades Puntuales dentro del Intervalo, Experimento 2

Profundidad [m]	Susceptibilidad Magnética	Distancia entre cada medición [cm]
899.71	-1.1	-
899.81	0.5	10
899.83	-1.2	2
899.91	-0.6	8
899.93	0.4	2
900.03	-2.5	10
900.10	-0.4	7
900.16	6.7	6
900.28	-1.3	12
900.43	-1.0	15
900.56	-1.3	13
900.69	-1.6	13
900.82	1.5	13
901.08	-2.0	26
901.37	-0.5	29
901.47	-0.8	10
901.60	-0.4	13
901.74	-0.4	14
901.82	-1.1	8
901.94	2.5	12
901.95	-0.9	1
902.05	1.8	10
902.09	-0.7	4
902.22	0.8	13
902.35	1.2	13
902.42	10.6	7
902.51	-0.9	9
902.64	-1.2	13
902.80	-0.2	16
902.93	0.9	13
903.09	-1.3	16
903.24	-0.2	15
903.33	-1.7	9
903.44	0.3	11
903.53	-0.9	9
903.77	-2.0	24
903.84	-1.5	7
904.03	2.1	19
904.05	-1.7	2
904.12	5.5	7
904.15	-0.3	3

904.20	-0.4	5
904.22	-1.4	2
904.28	-1.7	6
904.35	-0.6	7
904.44	7.3	9
904.63	-1.6	19
904.70	-0.3	7
904.85	-1.9	15
904.96	-0.8	11
905.07	4.3	11
905.33	-1.1	26
905.43	-0.7	10
905.52	0.4	9
905.53	-0.6	1
905.64	0.4	11
905.67	0.5	3
905.70	6.5	3
905.82	-1.1	12
905.83	-0.7	1
906.03	0.7	20
906.04	-2.1	1
906.13	0.5	9
906.15	-2.0	2
906.23	0.1	8
906.26	-2.1	3
906.42	-1.9	16
906.53	-1.0	11
906.64	-1.3	11
906.78	-1.1	14
906.90	-1.5	12
907.03	-1.4	13
907.10	-2.2	7
907.22	-1.2	12
907.32	-1.0	10
907.45	0.2	13
907.59	0.6	14
907.70	0.9	11
907.80	0.7	10
908.95	0.9	115
909.06	0.6	11
909.17	1.3	11
909.24	1.1	7
909.30	1.0	6
909.38	-0.1	8
909.58	0.2	20
909.71	0.3	13
909.94	-0.2	12
910.15	-1.0	21

910.27	-0.8	12
910.35	-0.1	8
910.43	-1.0	8
910.56	-0.7	13
910.64	-1.1	8
910.66	5.9	2
910.75	-0.7	9
910.79	-1.2	4
910.90	-1.0	11
910.93	-1.4	3
911.00	-0.3	7
911.05	-2.2	5
911.08	-0.8	3
911.18	-1.3	10
911.19	-0.8	1
911.28	0.3	9
911.44	-1.1	16
911.54	-1.5	10
911.64	-1.2	10
911.75	-1.0	11
911.93	-0.8	18
912.05	-1.0	12
912.16	-0.5	11
912.32	-0.9	16
912.45	-1.1	13
912.60	-1.3	15
912.71	-1.1	11
912.78	-1.3	7
912.90	-2.3	12
912.92	-1.0	2
913.01	-2.5	9
913.12	-1.8	11
913.23	9.1	11
913.34	2.7	11
913.45	-1.7	11
913.56	-2.0	11
913.67	-0.7	11
913.78	3.2	11
913.89	-0.3	11
914.00	9.3	11
914.11	-1.4	11
914.22	-1.7	11
914.33	3.0	11
914.44	-0.9	11
914.55	-0.9	11
914.66	-2.2	11
914.77	-1.1	11
914.88	-1.2	11

914.99	-1.1	11
915.10	-1.0	11
915.21	-0.7	11
915.23	-1.5	2
915.36	-1.6	13
915.49	-1.0	13
915.61	-2.2	12
915.81	-1.6	20
915.92	-1.6	11
916.04	0.7	12
916.15	-0.7	11
916.25	1.9	10
916.42	-0.8	17
916.57	2.3	15
916.67	1.3	10
916.73	9.7	6
916.97	-0.9	24
917.08	-1.6	11
917.20	-1.4	12
917.28	-1.0	8
917.44	-2.6	16
917.61	-0.9	17
917.76	0.5	15
917.78	9.3	2
917.88	-2.8	10
918.13	0.3	25
918.32	-1.9	19
918.45	1.7	13
918.59	-1.4	14
918.69	-2.4	10
918.82	-1.5	13
918.97	0.4	15
919.01	-0.8	4
919.12	11.1	11
919.21	-1.3	9
919.33	-1.0	12
919.47	6.2	14
919.52	-1.4	5
919.61	-1.0	9
919.66	-1.4	5
919.78	-0.7	12
919.92	-1.7	14
919.95	-0.2	3
920.22	-1.2	27
920.39	-1.1	17
920.54	-1.6	15
920.88	-2.1	34
921.02	-1.5	14

921.13	-1.3	11
921.25	-1.0	12