

# Contenido

Resumen	xi
Objetivos	xii
Prefacio	xiii
<b>1 Conceptos Fundamentales</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	1
1.2 Propiedades petrofísicas . . . . .	3
1.2.1 Porosidad . . . . .	3
1.2.2 Permeabilidad . . . . .	10
1.2.3 Saturación de fluido . . . . .	12
1.2.4 Tortuosidad . . . . .	14
1.3 Propiedades eléctricas . . . . .	15
1.3.1 Conductividad y resistividad . . . . .	15
1.3.2 Factores que afectan a la resistividad eléctrica de la roca y del agua salada en el yacimiento . . . . .	18
1.3.3 Relación entre las propiedades eléctricas de una roca con otras de sus propiedades físicas . . . . .	19
1.4 Las arcillas en los yacimientos de petróleo . . . . .	23
1.4.1 Lutitas y arcillas . . . . .	23
1.4.2 Características y propiedades fisicoquímicas de las arcillas . . . . .	24
1.4.3 Orígenes de las arcillas y sus modelos de distribución en el yacimiento . . . . .	27
1.4.4 Conductividad en las arcillas . . . . .	30

---

1.5	El agua en los yacimientos de hidrocarburos . . . . .	31
1.5.1	Agua de formación . . . . .	31
1.5.2	Principales componentes del agua de formación . . . . .	32
1.5.3	Salinidad del agua de formación . . . . .	34
1.5.4	El agua en los minerales de arcilla . . . . .	36
<b>2</b>	<b>Importancia de la Capacidad de Intercambio Catiónico en la Ingeniería de Yacimientos</b>	<b>37</b>
2.1	Introducción . . . . .	37
2.2	La estructura de los minerales de arcilla . . . . .	38
2.3	Interacción agua – arcilla . . . . .	41
2.4	Capacidad de intercambio catiónico, <i>CEC</i> . . . . .	42
2.5	Capacidad de intercambio catiónico por unidad de volumen de poros, $Q_v$ . . . . .	44
2.6	Factores relacionados con la <i>CEC</i> . . . . .	46
2.6.1	pH . . . . .	46
2.6.2	Composición del agua de formación . . . . .	47
2.6.3	Tamaño y naturaleza de las partículas . . . . .	47
2.6.4	Tipo de cationes intercambiables . . . . .	48
2.6.5	Área superficial o específica . . . . .	48
2.6.6	Permeabilidad . . . . .	48
2.6.7	Volumen de arcilla . . . . .	50
2.6.8	Porosidad y porosidad efectiva . . . . .	53
2.6.9	Interpretación de registros geofísicos en formaciones arcillosas . . . . .	55
2.6.10	Saturación de agua . . . . .	58
2.7	Modelos para el cálculo de saturación de agua basados en la <i>CEC</i> . . . . .	60
2.7.1	Modelo de Waxman – Smits . . . . .	60
2.7.2	Modelo de Dos Aguas . . . . .	65
<b>3</b>	<b>Fundamentos de la Capacidad de Intercambio Catiónico</b>	<b>70</b>
3.1	Introducción . . . . .	70
3.2	Cationes de intercambio . . . . .	71
3.3	Mecanismos generadores de cargas negativas en las arcillas . . . . .	72

---

3.3.1	Sustituciones atómicas isomórficas dentro de la red del mineral de arcilla	73
3.3.2	Mecanismo de uniones rotas . . . . .	74
3.3.3	Disociación de los grupos hidróxilo de las capas basales . . . . .	74
3.4	Teorías del intercambio iónico . . . . .	75
3.4.1	Teoría de la red cristalina . . . . .	76
3.4.2	Teoría de la membrana semipermeable . . . . .	77
3.4.3	Teoría de la doble capa eléctrica . . . . .	79
3.5	Espesor de la doble capa eléctrica en el medio poroso . . . . .	85
3.6	Agua ligada a la arcilla . . . . .	88
3.7	Conductividad en arenas arcillosas . . . . .	91
<b>4</b>	<b>Medición de la Capacidad de Intercambio Catiónico</b>	<b>95</b>
4.1	Introducción . . . . .	95
4.2	Variables que influyen en la determinación de la <i>CEC</i> . . . . .	97
4.2.1	Influencia del <i>pH</i> . . . . .	97
4.2.2	Temperatura . . . . .	99
4.2.3	Naturaleza y concentración del catión índice . . . . .	99
4.2.4	Iones libres, sales solubles, caliza, yeso . . . . .	100
4.2.5	Tiempos de contacto, agitación y equilibrio . . . . .	101
4.2.6	Relación muestra arcillosa – solución . . . . .	102
4.2.7	Tratamientos previos de la muestra arcillosa . . . . .	103
4.3	Métodos para cuantificar el catión de intercambio . . . . .	104
4.3.1	Métodos volumétricos . . . . .	104
4.3.2	Métodos instrumentales . . . . .	104
4.4	Métodos recomendados para determinar la <i>CEC</i> en formaciones arcillosas . . . . .	108
4.4.1	Tratamiento de las muestras previo a la determinación de la <i>CEC</i> . . . . .	108
4.4.2	Método de cloruro de bario y sulfato de magnesio . . . . .	110
4.4.3	Método de cloruro de hexamincobaltato . . . . .	115
4.4.4	Método de azul de metileno . . . . .	116
4.4.5	Método de acetato de amonio en presencia de un buffer a <i>pH</i> 7.0 . . . . .	123
4.4.6	Método de acetato de sodio en presencia de un buffer a <i>pH</i> 8.2 . . . . .	132

---

4.4.7	Método de cloruro de bario en presencia de un buffer de tri – etanol – amina a $pH$ 8.1 . . . . .	136
4.4.8	Método de salinidad múltiple . . . . .	140
4.4.9	Método de potencial de membrana . . . . .	141
<b>5</b>	<b>Determinación de la CEC con el Método MBT a Muestras de Diferentes Estratos de la Perforación de un Pozo</b>	<b>145</b>
5.1	Introducción . . . . .	145
5.2	Aplicación del método <i>MBT</i> . . . . .	148
5.3	Tratamiento para cada muestra . . . . .	148
5.4	Preparación de la solución de azul de metileno 10 <i>g/L</i> . . . . .	149
5.5	Metodología del American Petroleum Institute ( <i>API</i> ) . . . . .	149
5.6	Resultados . . . . .	150
	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>154</b>
	<b>Nomenclatura</b>	<b>157</b>
	<b>Referencias</b>	<b>164</b>

# Lista de Figuras

1.1	Forma esquemática en la cual el empaquetamiento de los granos afecta a la porosidad. . . . .	7
1.2	Diagrama porosidad – profundidad para arenas cuarzosas. . . . .	8
1.3	Representación esquemática de la permeabilidad de una roca. . . . .	10
1.4	Relación porosidad – permeabilidad en arenas. . . . .	12
1.5	Representación esquemática de las líneas de flujo de una roca. . . . .	14
1.6	Esquema de resistividades en las zonas adyacentes a un pozo en una formación invadida. . . . .	16
1.7	Resistividades del agua y de la roca. Resistividad del agua en los tres casos, $R_w$ . . . . .	20
1.8	Trayectoria de flujo de corriente en los tres casos de resistividad. . . . .	20
1.9	Estructuras fundamentales de las arcillas. . . . .	24
1.10	Construcción de los cuatro principales grupos de arcillas. . . . .	25
1.11	Forma en que las arcillas autógenas se generan en el poro. . . . .	28
1.12	Forma esquemática en la cual se puede distribuir la lutita en los sedimentos. . . . .	29
1.13	Conductividad de la arena arcillosa con $S_w = 100\%$ en función de la conductividad del agua de formación. . . . .	31
1.14	Conductividad del agua de formación en función de su concentración de sales. . . . .	35
2.1	Tetraedro elemental de los silicatos formadores de arcillas. . . . .	38
2.2	(a) Estructura tetraédrica, (b) Hoja tetraédrica; tipo $T$ , formada por un anillo de 6 tetraedros. . . . .	39
2.3	(a) Estructura octaédrica, (b) Hoja octaédrica; tipo $O$ . . . . .	39
2.4	Estructura molecular de la lámina $T - O$ , y representación esquemática de la distribución de cargas en la estructura de las láminas $T - O$ . . . . .	40
2.5	Estructura molecular de la lámina $T - O - T$ , y representación esquemática de la distribución de cargas en la estructura de las láminas $T - O - T$ . . . . .	40

2.6	Relación de la <i>CEC</i> con el <i>pH</i> de la solución. . . . .	47
2.7	Relación de la <i>CEC</i> con el área superficial de las arcillas. . . . .	49
2.8	Relación de la <i>CEC</i> con la caída de la permeabilidad, para salmueras de distintas composiciones. . . . .	50
2.9	Relación de la <i>CEC</i> con la permeabilidad final en pruebas de desplazamiento. . . . .	50
2.10	Relación de la $Q_v$ ( <i>CEC</i> ) con el volumen de lutita. . . . .	51
2.11	a) Correlaciones empíricas que relacionan el $V_{sh}$ con el $I_{sh}$ . b) Gráfica cruzada de los registros densidad – neutrón. . . . .	52
2.12	Relación de la porosidad con la <i>CEC</i> . . . . .	54
2.13	Gráficas de $E_c$ vs. Concentración de <i>NaCl</i> , para $Q_{vsh} = 1 \text{ meq/cm}^3$ (izq.), y para $Q_{vsh} = 10 \text{ meq/cm}^3$ (der.). . . . .	57
2.14	Conductividad del núcleo con $S_w = 100\%$ en función de la conductividad de la solución en equilibrio. . . . .	62
2.15	Conductancia equivalente de los contraiones, $B$ , vs. resistividad de la salmuera en equilibrio a varias temperaturas. . . . .	63
2.16	Modelo de Dos Aguas de una formación arcillosa saturada al 100% con agua. . . . .	67
2.17	Esquema de la división de una arena arcillosa saturada con agua e hidrocarburos en el modelo de Dos Aguas. . . . .	69
3.1	Mecanismo de sustituciones atómicas. . . . .	73
3.2	Mecanismo de uniones rotas: a) Antes de la fractura del mineral arcilloso; b) Después de la fractura del mineral. . . . .	74
3.3	Mecanismo de disociación de los grupos $OH^-$ . . . . .	75
3.4	Teoría de la red cristalina. . . . .	76
3.5	Teoría de la membrana semipermeable. . . . .	77
3.6	Relación del potencial de membrana vs <i>CEC</i> . . . . .	78
3.7	Esquema de la doble capa de acuerdo con el cambio en la densidad de carga (izquierda) y con la distribución de cationes y aniones (derecha). . . . .	81
3.8	Representación esquemática de la doble capa en un sistema arcilla – agua salada. . . . .	81
3.9	Potenciales debidos a la doble capa eléctrica. . . . .	82
3.10	Modelos esquemáticos que representan la teoría de la doble capa eléctrica según: a) Helmholtz, b) Gouy y c) Stern. . . . .	82

3.11	Variación de potencial en diferentes modelos de doble capa eléctrica. . . . .	83
3.12	Representación de la doble capa en un medio poroso. . . . .	86
3.13	Variación de la concentración iónica para tres poros de distintos tamaños, con espesor de la doble capa constante. . . . .	86
3.14	Esquema de concentraciones iónicas de la capa difusa según Gouy. . . . .	87
3.15	Esquema del <i>OHP</i> en el cual se representa la forma en que el agua impregna a la superficie de la arcilla. . . . .	87
3.16	Esquema de la doble capa debida a la disociación del agua y la consecuente formación del agua ligada a la arcilla. . . . .	89
3.17	Diferentes tipos de fluidos en un yacimiento areno – arcilloso. . . . .	91
3.18	Esquema de la distribución de carga en una arena arcillosa. . . . .	93
4.1	Tipos de flama característica para el litio, sodio y potasio. . . . .	105
4.2	a) Esquema de funcionamiento de un flamómetro. b) Fotómetro de Flama Corning (Laboratorio de Química, Salón 315, Fac. Ing. UNAM). . . . .	105
4.3	Forma de la curva de calibración. . . . .	106
4.4	a) Esquema de funcionamiento de un espectrofotómetro de absorción atómica. b) Espectrofotómetro de Absorción Atómica, Analyst 300, PEMSA (Laboratorio de Química, Salón 315, Fac. Ing. UNAM). . . . .	107
4.5	Molécula del cloruro de hexamincobaltato. . . . .	115
4.6	Determinación de la <i>CEC</i> por el método de azul de metileno. . . . .	117
4.7	Molécula del catión de azul de metileno, correspondiente al cloruro azul de metileno $C_{16}H_{18}N_3S^+ \cdot Cl^-$ ( $C_{16}H_{18}N_3S \cdot 3H_2O$ ). . . . .	118
4.8	Comparación entre la $Q_v$ determinada con métodos de titulación conductimétrica (métodos destructivos del núcleo), y la $Q_v$ obtenida con mediciones de potencial de membrana. . . . .	142
4.9	a) Celda de potencial de membrana. b) Celda de potencial de membrana para un núcleo arcilloso cuando está saturado con soluciones de <i>NaCl</i> muy diluidas. . . . .	143
5.1	Equipo necesario para triturar (mortero) y tamizar (malla 150). . . . .	148
5.2	Muestras arcillosas antes de ser trituradas y tamizadas. . . . .	148
5.3	Muestras trituradas y tamizadas antes de secarse en el horno. . . . .	149

5.4	Matraz que contiene la suspensión de arcilla antes de la titulación con azul de metileno.	150
5.5	Solución de azul de metileno (izq.). Equipo utilizado para la titulación de la suspensión de arcilla con solución de azul de metileno (der.). . . . .	151
5.6	Resultados de la prueba 2 del método MBT en una muestra de mudstone arcilloso. . .	152
5.7	Resultados de la prueba 2 del método MBT en una muestra de marga. . . . .	152
5.8	Resultados de la prueba 2 del método MBT en una muestra de mudstone bentonítico.	152
5.9	Resultados de la prueba 2 del método MBT en una muestra de lutita. . . . .	152



# Lista de Tablas

1.1	Clasificaciones de los yacimientos. . . . .	1
1.2	Expresiones para el cálculo de la porosidad conforme a la interconexión del espacio poroso. . . . .	4
1.3	Expresiones para el cálculo de la porosidad conforme a las características geológicas del yacimiento. . . . .	5
1.4	Intervalos generales para la clasificación de la permeabilidad. . . . .	11
1.5	Tipos de permeabilidad. . . . .	11
1.6	Características de los principales grupos de arcillas. . . . .	25
1.7	Clasificación general de las lutitas con composición variable de minerales de arcilla. . .	25
1.8	Resumen de la nomenclatura y unidades para la salinidad del agua de formación. . . .	34
2.1	Unidades de la capacidad de intercambio catiónico ( <i>CEC</i> ). . . . .	43
2.2	Valores de peso equivalente para cationes de intercambio comunes en las formaciones arcillosas. . . . .	43
2.3	Conversión de cationes a valores miliequivalentes. . . . .	44
2.4	Unidades de la capacidad de intercambio catiónico volumétrica ( $Q_v$ ). . . . .	45
2.5	Reactividad agua – arcilla para algunas arcillas del ámbito petrolero de México. . . .	46
2.6	Determinación del $V_{sh}$ a partir de registros geofísicos. . . . .	52
2.7	Porosidades de lutita calculadas con datos de <i>CEC</i> de la lutita seca. . . . .	55
2.8	Porosidades comunes de lutitas obtenidas del registro neutrón. . . . .	55
2.9	Correlaciones para el cálculo de la saturación de agua. . . . .	59
5.1	Resumen de datos y características de las 4 muestras utilizadas para la determinación de la <i>CEC</i> . . . . .	145
5.2	Columna geológica compuesta Tabasco – Chiapas. . . . .	146

5.3 Columna geológica compuesta Tabasco – Chiapas (continuación). . . . . 147

5.4 Resultados del método *MBT* para la determinación de la *CEC* en las cuatro muestras arcillosas. . . . . 153