

Capítulo 2

Importancia de la Capacidad de Intercambio Catiónico en la Ingeniería de Yacimientos

2.1 Introducción

En las formaciones arcillosas existe una interacción natural entre el agua de formación y la arcilla, que está representada por fuerzas electrostáticas; debido a ésto, existe un intercambio entre los cationes de la arcilla y los cationes del agua de formación. Aunado a esta interacción, en cortes de núcleos, perforación, terminación o inyección de fluidos por estimulación de pozos o recuperación secundaria y mejorada, también se presenta el intercambio catiónico sobre la superficie arcillosa durante la falta de equilibrio en estas actividades.

Este fenómeno, llamado Capacidad de Intercambio Catiónico, puede alterar la porosidad en la formación, reducir la permeabilidad, aumentar la conductividad total y como resultado generar un alto error en los cálculos de saturación de agua realizados con la información de los registros geofísicos de pozos.

Esta propiedad característica de las arcillas es muy importante ya que su conocimiento ayudará a tener una mejor caracterización de las formaciones arcillosas, sobre todo porque mejorará la interpretación de los registros geofísicos de pozos relativo a la determinación de la saturación de agua. Esta última es una de las contribuciones más importantes de la Capacidad de Intercambio Catiónico a la Ingeniería de Yacimientos.

2.2 La estructura de los minerales de arcilla

Realizando un resumen de las características de la estructura cristalina de las arcillas, tenemos:

- **Estructuras básicas:** tetraedro de silicio, octaedro de aluminio.
- **Lámina:** unión de varias estructuras de tetraedro de silicio u octaedros de aluminio.
- **Capa:** unión de láminas de tetraedros de silicio y octaedros de aluminio.
- **Espacio interlaminar o espacio basal:** el espacio que existe entre dos capas.
- **Capa unitaria:** unión de una capa y el espacio interlaminar.
- **Cristal de arcilla:** unión de una o más capas unitarias.

El bloque estructural principal de un mineral de arcilla es el elemento silicio (Si) rodeado por 4 oxígenos (O) en una estructura tetraédrica. Este tetraedro está fusionado con un octaedro que tiene un aluminio (Al) en el centro e hidróxidos (OH) ó grupos de oxígeno en las esquinas [26]. Las longitudes de la unión del octaedro y del tetraedro deben ser casi idénticas, estas formas geométricamente regulares crean arreglos en estructuras laminares, como se describe a continuación.

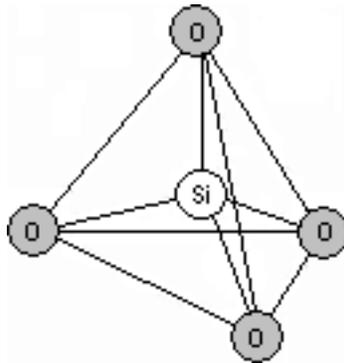


Figura 2.1: Tetraedro elemental de los silicatos formadores de arcillas.

En la estructura del tetraedro de la Figura 2.1, cada átomo de Si tiene 4 cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de O tiene 2 cargas negativas. En esa figura, cada uno de los átomos de O utilizan una de sus cargas para atraer a una de las cargas de Si , por lo que éste queda saturado; mientras que los átomos de oxígeno todavía tienen una carga negativa para enlazarse con otro átomo de carga positiva. Cuando esto último ocurre se puede formar una cadena de tetraedros, mediante enlaces del tipo [15]:



De esa manera se pueden formar cadenas horizontales y verticales para formar redes y luego superponer una red encima de la otra, para hacer un arreglo tridimensional. Siguiendo

las reglas de Pauling^A y Lowenstein^B, podemos armar arreglos geométricos de 1 tetraedro ($1T$), 2 tetraedros ($2T$) o n tetraedros (nT), los cuales forman hojas completas que constituyen el grupo de los filosilicatos, o estructuras laminares, del que forman parte las arcillas [15].

Al formar un arreglo de 6 tetraedros ($6T$) en forma de anillo, estamos formando una hoja tetraédrica (tipo T), como se ve en la Figura 2.2.

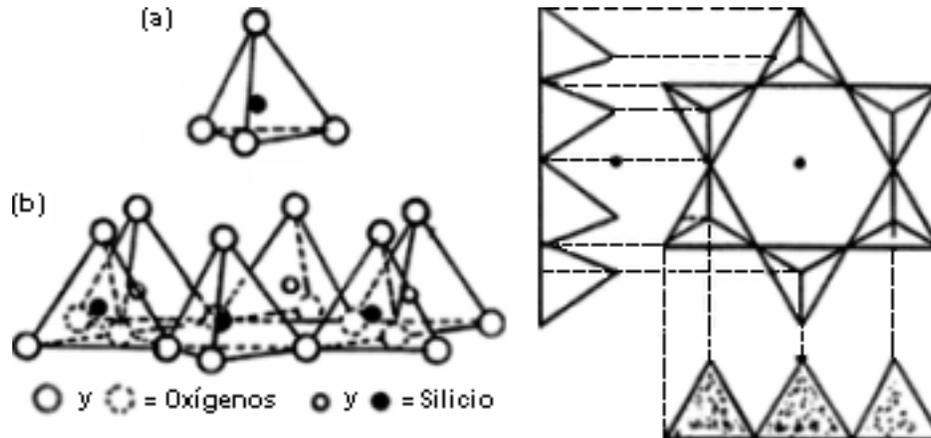


Figura 2.2: (a) Estructura tetraédrica, (b) Hoja tetraédrica; tipo T , formada por un anillo de 6 tetraedros.

Además del tetraedro, existe otro bloque estructural que forma a los minerales arcillosos: el octaedro. Similarmente podemos formar otras hojas con base en octaedros, como puede verse en la Figura 2.3; a esta hoja se le llama hoja de octaedros ó tipo O .

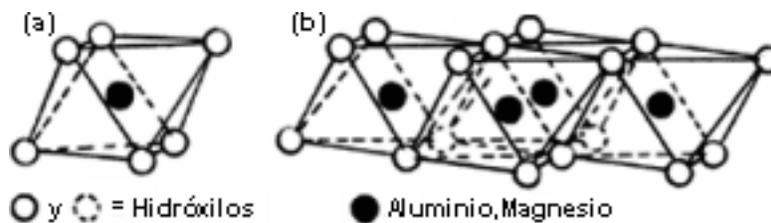


Figura 2.3: (a) Estructura octaédrica, (b) Hoja octaédrica; tipo O .

La unión de una hoja T con una O genera una lámina $T - O$ ó lámina $1 : 1$, como se ve en la Figura 2.4. Además, existe otro tipo de lámina, la $T - O - T$ o lámina $2 : 1$, ya que tiene 2 hojas T y una hoja O , como se observa en la Figura 2.5. La lámina $T - O - T$ es la más completa ya que tiene todos los enlaces saturados.

^ADe acuerdo con las reglas de Pauling, al unir 2 o más estructuras individuales debemos tomar en cuenta que la estructura resultante debe ser eléctricamente neutra, y que todos los elementos con carga positiva (cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente (aniones), coordinándose con ellos de modo que los arreglos coordinados dependen únicamente de los tamaños entre el catión y el anión respectivo [15].

^BLa regla de Lowenstein dice que no es válido enlazar dos tetraedros que tengan un átomo central de aluminio cada uno; entonces dos tetraedros de aluminio, solamente pueden enlazarse mediante otro tetraedro intermedio con base de silicio [15].

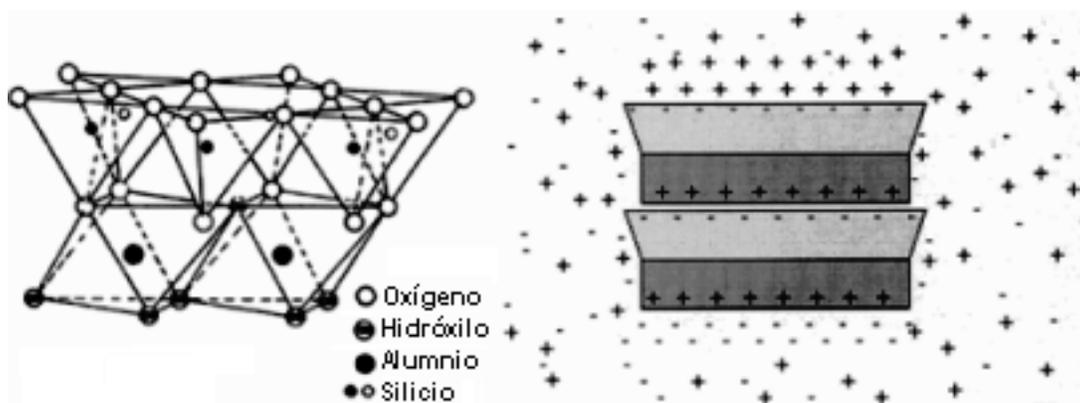


Figura 2.4: Estructura molecular de la lámina $T - O$, y representación esquemática de la distribución de cargas en la estructura de las láminas $T - O$.

Las láminas $T - O$ y $T - O - T$ son parte esencial de las arcillas, y en cada una de ellas podemos observar interacciones que contribuyen a la conductividad de una formación arcillosa; además de la conductividad proporcionada por el agua de formación del yacimiento. El exceso de cargas eléctricas que, generalmente, existe dentro de la arcilla, se debe a las sustituciones de Al^{3+} por iones de menor valencia, como la causa más común.

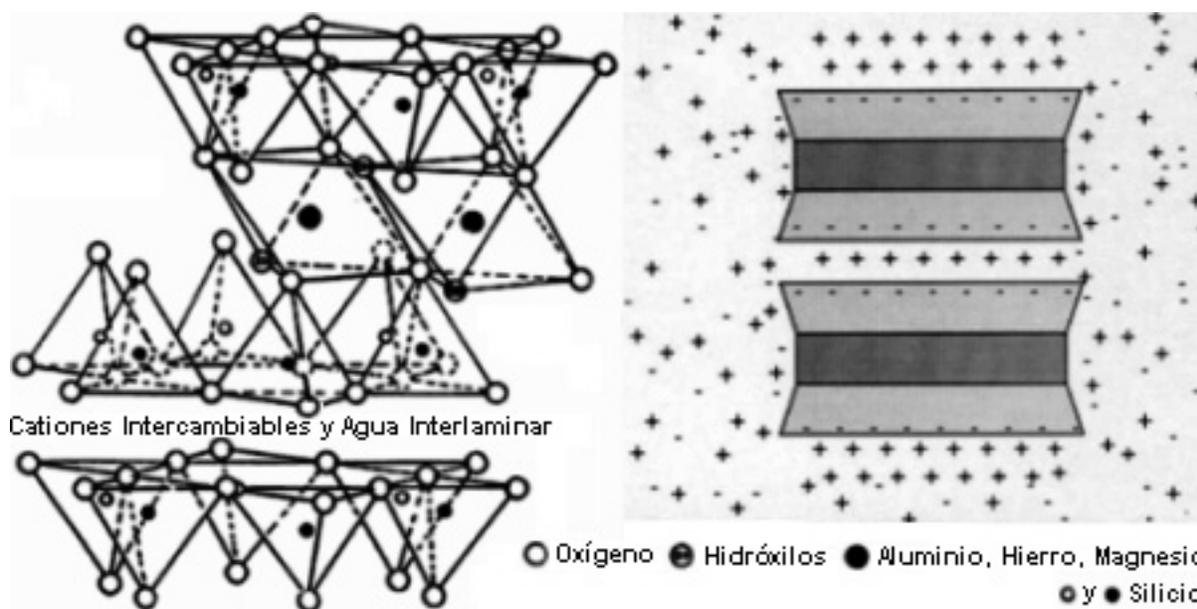


Figura 2.5: Estructura molecular de la lámina $T - O - T$, y representación esquemática de la distribución de cargas en la estructura de las láminas $T - O - T$.

Con la diagénesis, en una hoja tetraédrica, el silicio tetravalente (Si^{4+}) es algunas veces parcialmente reemplazado por aluminio trivalente (Al^{3+}). En la hoja octaédrica, puede haber un reemplazo de aluminio trivalente por magnesio divalente (Mg^{2+}), ó por Fe , Cr , Zn , Li , u otros átomos. Cabe señalar que la estructura cristalina permanece igual [5].

Cuando un átomo de valencia positiva más baja reemplaza a uno de valencia más alta, genera una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa. Este exceso de carga negativa se compensa por medio de la adsorción, sobre la superficie de la capa, de cationes que son demasiado grandes para ser acomodados en el interior del cristal, como por ejemplo magnesio, potasio, hierro y sodio [5]. La cantidad de estos átomos externos (Mg , K , Fe y Na) incrementa con el número de láminas [26].

La deficiencia de carga eléctrica que se genera con esos reemplazos de cationes es responsable de algunas de las propiedades superficiales de las arcillas: la Capacidad de Intercambio Catiónico, la cual es muy importante ya que el aumento en la conductividad eléctrica y la alteración de las respuestas de los registros geofísicos de pozos se debe a este fenómeno característico de las arcillas y formaciones arcillosas.

2.3 Interacción agua – arcilla

Un sistema agua – arcilla tiene los siguientes componentes:

- Partículas de arcilla,
- Moléculas de agua,
- Cationes,
- Aniones.

En el caso de tratarse de una superficie cargada negativamente, como es el caso común de las arcillas en el yacimiento, los cationes asociados a ella reciben el nombre de contraiones, mientras que los aniones acompañantes se denominan coiones. Si se trata de una superficie cargada positivamente los contraiones son los aniones de la solución, y los coiones son los cationes de la solución [52].

Al interactuar el agua del yacimiento y la arcilla se genera una carga que está representada por una fuerza electrostática, la cual es el resultado del carácter bipolar de la molécula de agua. Este carácter bipolar se explica porque el agua se compone de un átomo de oxígeno (O^{2-}) y dos de hidrógeno (H^+), como los hidrógenos se localizan en un extremo de la molécula, de un lado aparece la concentración de carga positiva, mientras que el otro lado es más negativo. Debido a la carga negativa que presentan las arcillas, el hidrógeno de las moléculas de agua se liga fuertemente con el oxígeno del tetraedro de silicio (SiO_4) a lo largo de las superficies de arcilla,

dejando el ya mencionado sistema de intercambio agua – arcilla. Esto es más pronunciado en los poros más pequeños [34].

El agua en el espacio interlaminar está directamente influenciada por los iones adsorbidos. La capacidad de adsorber el agua en el espacio interlaminar puede reducirse reemplazando los cationes inorgánicos relativamente pequeños por especies orgánicas de mayor tamaño. De este modo, los cationes intercambiados son importantes porque neutralizan la carga laminar, teniendo influencia tanto física como química en la mayoría de los minerales arcillosos [29, 31].

2.4 Capacidad de intercambio catiónico, CEC

Como ya habíamos mencionado, las láminas de los minerales de arcilla están cargadas negativamente como resultado de las sustituciones iónicas y de la ruptura de la adhesión en los bordes de su estructura^C, dejando un desequilibrio eléctrico local que necesita ser compensado con el fin de mantener la neutralidad eléctrica de la partícula de arcilla. Para compensar esa carga negativa (también llamada actividad superficial o sitios activos) los minerales arcillosos tienen la propiedad de absorber cationes – principalmente sodio (Na^+) –, agua o especies moleculares en general, los cuales se adhieren, en un estado seco hipotético, a la superficie de las láminas arcillosas mediante atracción eléctrica y los mantienen en un estado intercambiable.

Estos cationes son los contraiones descritos anteriormente, y pueden ser intercambiados por otros que están presentes en el agua salada, lo cual modifica las propiedades eléctricas de las formaciones arcillosas y, por lo tanto, a los registros eléctricos de pozos. Cuando la arcilla está en contacto con una solución salina, los cationes Na^+ están en suspensión cerrada a la superficie de la arcilla y como resultado repelen a los aniones Cl^- en la solución, a partir de la superficie de la arcilla. La interacción en el sistema agua – arcilla nos conduce a la definición de la capacidad de intercambio catiónico.

Definición 14 *La capacidad de intercambio catiónico – CEC por sus siglas en inglés: Cation Exchange Capacity – es la habilidad que tienen algunas sustancias para retener e intercambiar cationes con soluciones del medio en que están inmersas, las cuales tienen otros cationes específicos.*

^CVer Capítulo 3, Sección 3.3 Mecanismos generadores de cargas negativas en las arcillas.

Matemáticamente, la CEC se define como la suma total o concentración de los cationes de intercambio (principalmente Na) que un mineral puede adsorber y concentrar en su superficie negativamente cargada (para neutralizar esas cargas negativas) cuando dicho material se pone en contacto con una solución acuosa. Esta suma total equivale al total de cargas negativas del material; es decir, la CEC es una medida de la concentración del exceso de carga negativa que presentan algunos minerales, como las arcillas.

La CEC es un fenómeno reversible que sucede entre una fase líquida y una sólida sin cambio sustancial en la estructura del sólido; también se le conoce como ocurrencia de adsorción o capacidad de intercambio de base de los cationes. Las unidades de la CEC se muestran en la Tabla 2.1.

Unidades de la CEC	Símbolo
Centimoles de iones de carga positiva por kilogramo de arcilla o roca seca	$cmol(+)/kg$
Mili-equivalentes de cationes intercambiables por cada 100 g de arcilla o roca seca	$meq/100\ g$
Mili-equivalentes de cationes intercambiables por gramo de arcilla o roca seca	meq/g
Equivalentes de cationes intercambiables por gramo de arcilla o roca seca	eq/g
$1\ cmol(+)/kg = 1\ meq/100\ g$	

Tabla 2.1: Unidades de la capacidad de intercambio catiónico (CEC).

La CEC generalmente se expresa en términos de miligramos equivalentes de hidrógeno por 100 g de coloide, cuya denominación abreviada es mili-equivalentes por 100 gramos o $meq/100\ g$. Por definición, se convierte en el peso de un elemento que desplaza un peso atómico de hidrógeno. Un peso equivalente es igual al peso atómico dividido entre la valencia. La Tabla 2.2 muestra los valores de peso equivalente para los cationes de intercambio comunes en las formaciones arcillosas.

Elemento	Peso atómico	Valencia	Peso equivalente
Ca	40.08	2	20.04
Mg	24.31	2	12.06
K	39.1	1	39.1
Na	22.99	1	22.99

Tabla 2.2: Valores de peso equivalente para cationes de intercambio comunes en las formaciones arcillosas.

En el laboratorio la CEC se mide en términos de la suma de las concentraciones en partes por millón (ppm) de los cationes desplazados, estos valores son convertidos a $meq/100$

g de acuerdo con la ecuación (2.1):

$$CEC \left[\frac{meq}{100g} \right] = \left(\frac{C_{ppmC+}}{m_{C+}} \right) \times 10 \quad (2.1)$$

- CEC : capacidad de intercambio catiónico, $meq/100 g$,
- C_{ppmC+} : concentración en partes por millón del catión,
- m_{C+} : masa equivalente del catión.

En la Tabla 2.3 se indican los números de los pesos usados para la conversión de cationes a valores de miliequivalentes^D [58].

Catión	Valor miliequivalente
200 ppm Ca	1 meq Ca / 100 g
120 ppm Mg	1 meq Mg / 100 g
390 ppm K	1 meq K / 100 g
10 ppm H	1 meq H / 100 g
230 ppm Na	1 meq Na / 100 g

Tabla 2.3: Conversión de cationes a valores miliequivalentes.

2.5 Capacidad de intercambio catiónico por unidad de volumen de poros, Q_v

Definición 15 *La capacidad de intercambio catiónico también puede expresarse como su contribución por unidad de volumen de fluido de poro – es decir, es una capacidad de intercambio catiónico volumétrica – se le llama Q_v y se calcula con la ecuación (2.2) o con la ecuación (2.3).*

- Q_v : CEC por unidad de volumen de poros,
- CEC : capacidad de intercambio catiónico,
$$Q_v = \frac{CEC}{V_p} \quad (2.2)$$
- V_p : volumen de poros,
- ρ : densidad de las partículas de arcilla seca o del material no poroso,
$$Q_v = CEC \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) \quad (2.3)$$
- ϕ : porosidad de la arcilla, *frac.*

^DEquivalente: 1) En una reacción redox es la cantidad de reactivo que puede dar o aceptar 1 mol de electrones, 2) En una reacción ácido-base es la cantidad de reactivo que puede aceptar 1 mol de protones [20].

En física de suelos, la Q_v se utiliza como una característica cuantitativa de la capacidad de adsorción de iones de la muestra de roca. Desde un punto de vista petrofísico es más preciso considerar a Q_v como la concentración volumétrica efectiva de los cationes de intercambio de la arcilla en el agua de poro cuando la arena está completamente saturada con agua, tal como la definieron Waxman, Smits y Thomas [42, 46, 47]. Las unidades de la Q_v se muestran en la Tabla 2.4.

CEC	ρ	V_p	Unidades de la Q_v	Símbolo
meq/g	g/mL		Mili-equivalentes de cationes intercambiables por mililitros de volumen de poro	meq/mL
eq/g	g/L		Equivalentes de cationes intercambiables por litros de volumen de poro	eq/L
meq/g		cm ³ /g	Mili-equivalentes de cationes intercambiables por centímetro cúbico de volumen poroso	meq/cm ³
meq/g	g/cm ³			

Tabla 2.4: Unidades de la capacidad de intercambio catiónico volumétrica (Q_v).

El efecto de los contraiones de arcilla sobre otras propiedades de la formación en un yacimiento que contiene tanto agua como hidrocarburos está dado por la relación Q_v/S_w la cual es la concentración de los contraiones arcilla en el agua de poro remanente [41].

Aunque la CEC predomina en las arcillas, la mayoría de los minerales de tamaño coloidal^E tienen cierta capacidad de intercambio como resultado del desbalance de cargas alrededor de su estructura [53]. Además, cuando las partículas de arena arcillosa son más pequeñas en tamaño, las propiedades fisicoquímicas de la muestra se vuelven cada vez más “arcillosas” [42].

Las arcillas tienen la habilidad para intercambiar cationes, por lo que en el yacimiento la presencia de una CEC estará atribuida principalmente a la presencia de arcillas (CEC de la arcilla) o de rocas arcillosas (CEC de la roca arcillosa). La CEC depende del tipo de arcilla presente y de la distribución de la misma en la roca del yacimiento.

La Tabla 1.6 muestra que la CEC es alta para montmorillonita, intermedia para illita, y baja para clorita y caolinita. El alto valor para cada arcilla probablemente se aplique a arcilla laminar y el valor bajo a arcilla dispersa, porque en los mecanismos formadores hay esfuerzos mecánicos durante la compactación que originan rompimiento en la adherencia [2]. La montmorillonita y la illita generalmente tienen de medios a altos valores de CEC, debido

^EUna solución puede ser coloidal si las dimensiones de los cristales son pequeñas (menor a 2 μ) y no sedimentan rápidamente.

a que ellas retienen cationes en el espacio interlaminar, además de los cationes ubicados en las superficies externas lo cual crea más sitios de intercambio y por lo tanto mayor *CEC*.

La caolinita y clorita se caracterizan por la ausencia de cationes interlaminares, es decir que en presencia de agua estos minerales son no expandibles. Además, la caolinita y clorita muestran poca variación en su composición química y deberían tener, teóricamente una *CEC* igual a cero. Sin embargo, en la naturaleza caolinitas y cloritas sí tienen algo de capacidad de intercambio, pero valores bajos o nulos. Cuando las caolinitas, illitas y cloritas son autógenas tienen baja *CEC* por su alta cristalinidad.

Como podemos observar en la Tabla 2.5, el aumento en el valor de la *CEC* es proporcional al aumento en la reactividad agua – arcilla, debido a que las arcillas pueden intercambiar sus cationes interlaminares (*Na* y *Ca*, principalmente) con otros cationes o moléculas de agua de un fluido circundante. Los valores de la *CEC* se obtienen por varios métodos, siendo el *MBT* el más conocido.

CEC, meq/100 g	Reactividad con el fluido circundante
< 10	no reactivo
10 – 18	reactivo
18 – 28	muy reactivo
> 28	incompatible

Tabla 2.5: Reactividad agua – arcilla para algunas arcillas del ámbito petrolero de México.

Por ser la fuente del exceso de conductividad mostrado en la gráfica C_o vs C_w de la Figura 1.13, la *CEC* es la propiedad más importante en la evaluación de arenas arcillosas. Las arcillas con altos valores de *CEC* juegan un rol principal en la conducción eléctrica de lutitas y arenas arcillosas [5].

2.6 Factores relacionados con la *CEC*

Varios factores están relacionados con la capacidad de intercambio catiónico, éstos son:

2.6.1 pH

Las rocas presentan distinta capacidad de intercambio catiónico en función del valor de *pH* de la solución [54]. A valores de *pH* ácidos los hidrógenos están fuertemente retenidos en las

superficies de las partículas arcillosas, por lo que éstas exhibirán poco intercambio catiónico^F. A valores de pH básicos la solución en contacto con los oxígenos interlaminares de la superficie de la lámina tetraédrica tendrá un exceso de hidróxilos (OH^-), por lo que estos últimos dominarán la superficie arcillosa. Así, los cationes de la solución serán atraídos hacia la superficie intercambiándose con los hidrógenos liberados, por lo tanto la arcilla exhibirá una mayor capacidad de intercambio catiónico. La Figura 2.6 muestra la relación de la CEC con el pH .

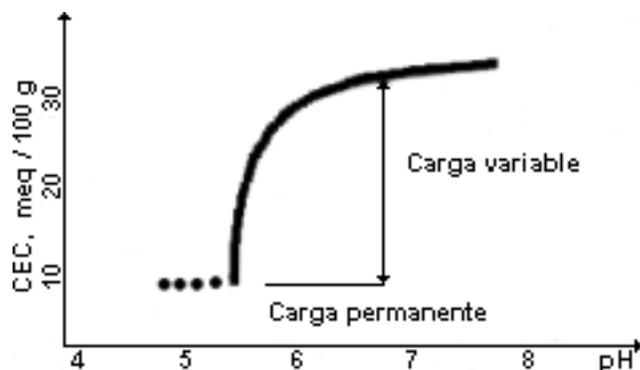


Figura 2.6: Relación de la CEC con el pH de la solución.

2.6.2 Composición del agua de formación

El proceso de intercambio catiónico es un modificador muy importante de la composición iónica de las aguas de formación. Las arcillas fijan cationes divalentes y trivalentes liberando monovalentes y divalentes al agua; esto quiere decir que con la CEC las aguas pueden cambiar su salinidad. Debido a esto en los proyectos de recuperación secundaria y mejorada por inyección de agua, agua con polímeros y/o agua con aditivos, se debe tener especial cuidado a la hora de elegir un agua que sea compatible con el agua del yacimiento, ya que de lo contrario la introducción de un agua ajena a la de la formación hará que ésta cambie en su composición, y por lo tanto pueda aumentar el proceso de intercambio de cationes en presencia de arcillas.

2.6.3 Tamaño y naturaleza de las partículas

Cuanto más pequeña sea la partícula de arcilla más grande será la capacidad de intercambio, esto se debe al desbalance de cargas alrededor de su estructura, en donde las plaquetas de

^FDe hecho, a valores de pH muy ácidos ($pH < 5$) la solución en contacto con los oxígenos interlaminares de la lámina tetraédrica tendrá un exceso de protones ($SiOH^{2+}$), atrayendo ahora a los aniones de la solución. En este caso se dice que la superficie arcillosa exhibe una capacidad de intercambio aniónico [54].

arcillas tienen más bordes y por lo tanto más sitios expuestos donde pueden acomodarse los cationes de intercambio. Por lo tanto, la composición y estructura de las partículas de arcilla también influyen en la habilidad de cambio de sus cationes. Las arcillas con grandes valores de *CEC* son usualmente arcillas hinchables, como la montmorillonita.

2.6.4 Tipo de cationes intercambiables

La naturaleza de los cationes de intercambio puede modificar el valor de la *CEC*, aumentándola o disminuyéndola, en función de su carga y de su tamaño. La deficiencia de carga positiva genera un campo eléctrico negativo alrededor de la superficie de las láminas de arcilla, y atrae a los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , etc.) presentes en el agua de formación en la que se encuentra inmersa la arcilla. Al aumentar el grado de sustitución, también aumenta la *CEC*. Los cationes divalentes y trivalentes al adsorberse aumentan la *CEC*; mientras que los cationes de gran tamaño (radicales orgánicos) disminuyen la *CEC* al bloquear, por su tamaño, posiciones de cambio.

2.6.5 Área superficial o específica

Cuanto más superficie específica tenga el mineral de arcilla y más desequilibrada se encuentre, más iones se fijaran en ella; por lo tanto la *CEC* de arcillas puras y rocas arcillosas es proporcional al área específica de la superficie de la arcilla. Este efecto se muestra en la Figura 2.7. Las áreas superficiales de las arcillas varían desde $20\ m^2/g$ para la caolinita hasta $800\ m^2/g$ para la montmorillonita.

2.6.6 Permeabilidad

La caída o pérdida de permeabilidad en una formación arcillosa depende de la abundancia de la arcilla hinchable y movable en la formación; así como de la naturaleza de la estructura, la composición, la cantidad y la concentración de los iones intercambiables en la arcilla; los cuales modifican en gran medida el valor de la *CEC*. Esto resulta en una reducción de la permeabilidad de la formación, en mayor o menor grado dependiendo de algunos factores que tienden a asociar o disociar a las partículas de arcilla en un sistema agua – arcilla. Éstos son:

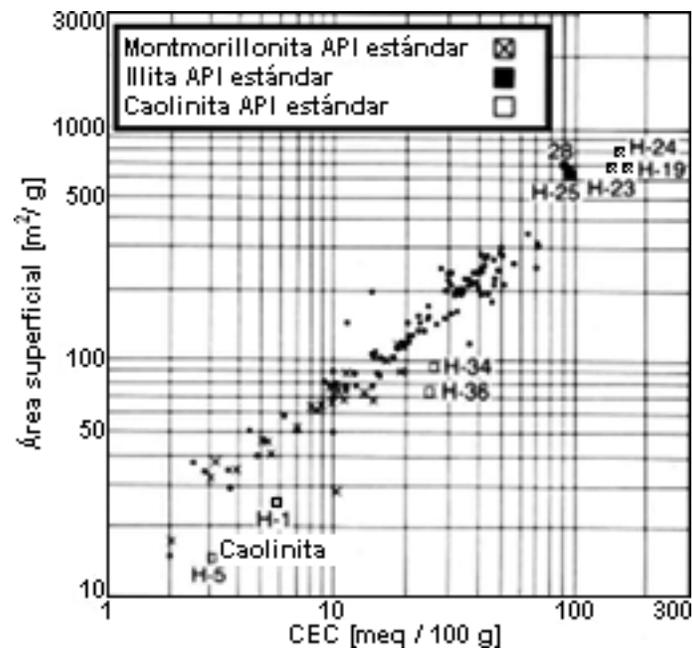


Figura 2.7: Relación de la CEC con el área superficial de las arcillas.

Factores que asocian

- Fuerzas de Van der Waals
- Sorción mutua de iones entre capas adyacentes
- Adsorción de materia orgánica del petróleo

Factores que disocian

- Hidratación de cationes intercambiados
- Repulsión de cationes intercambiados
- Desorción de materia orgánica del petróleo

Omar [35] presenta en su artículo una investigación de pruebas de desplazamiento con salmueras de diferentes composiciones en núcleos de arenisca arcillosa; el objetivo de este trabajo fue estudiar el grado del daño de permeabilidad como una función de los cambios en la concentración de los iones en las salmueras intersticial y desplazante y los iones intercambiables en los núcleos. Se encontró que la permeabilidad de los núcleos de arenisca en las pruebas de desplazamiento no sólo depende de la existencia de arcilla hinchable y dispersa, sino también de la naturaleza de los cationes intercambiables (CEC) en la arcilla. Esto se observa en la Figura 2.8.

La razón de la permeabilidad final de todas las pruebas de desplazamiento (K_f) – que es igual a K/K_i , donde K_i y K son las permeabilidades inicial y final en un desplazamiento en particular con una salmuera – se expresó como una función de los miliequivalentes de los cationes libres e intercambiables más abundantes; es decir la K_f como función de la CEC. La

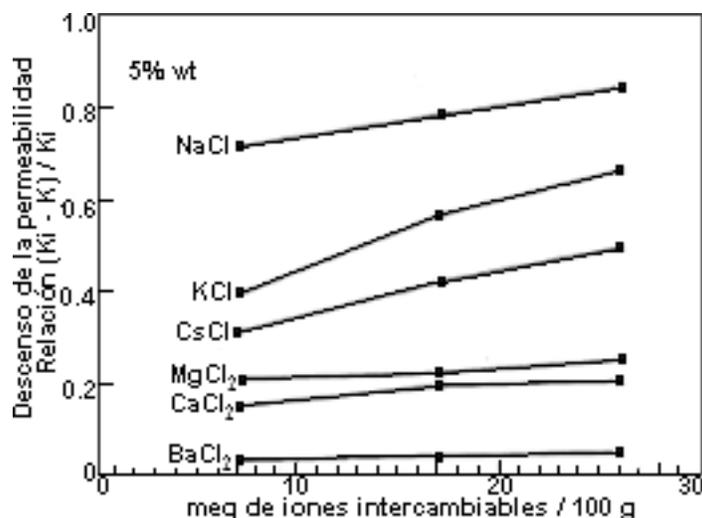


Figura 2.8: Relación de la *CEC* con la caída de la permeabilidad, para salmueras de distintas composiciones.

relación entre los miliequivalentes de estos cationes^G (I_{Na} , I_{Mg} e I_{Ca}) y la K_f se encontró que es lineal, como lo muestra la Figura 2.9.

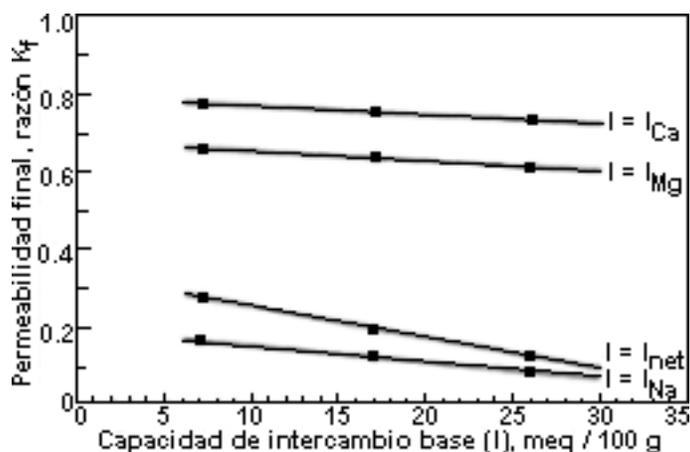


Figura 2.9: Relación de la *CEC* con la permeabilidad final en pruebas de desplazamiento.

2.6.7 Volumen de arcilla

Para un mismo contenido de lutita, V_{sh} , la magnitud de *CEC* depende del tipo de minerales de arcilla (montmorilonita, illita, clorita o caolinita) que contenga la roca. Como la *CEC* es una medida de la arcillosidad de una formación, a mayor valor de *CEC* de la roca arcillosa tendremos un mayor contenido de arcilla o lutita en esa roca.

^GEn esta investigación [35] la *CEC* se maneja con la letra *I*.

La Figura 2.10 muestra la relación Q_v (CEC) vs V_{sh} para los núcleos de las investigaciones de Hill y Milburn [22] y Waxman y Smits [46], según lo reportado por Tenchov [43]. La Q_v se obtuvo con métodos destructivos como el método de acetato de amonio y la titulación con cloruro de bario y sulfato de magnesio.

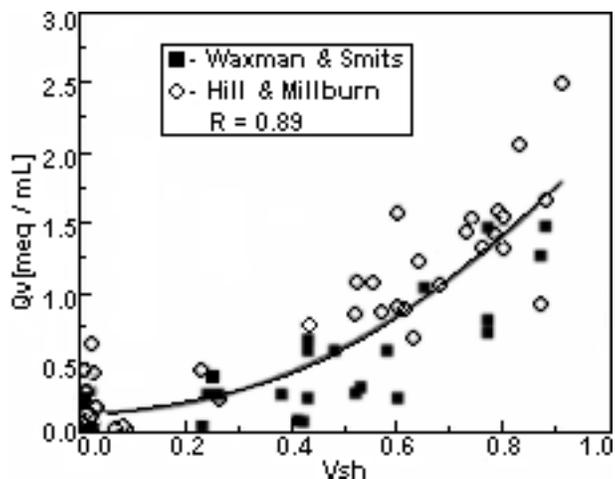


Figura 2.10: Relación de la Q_v (CEC) con el volumen de lutita.

La arcilla es uno de los componentes más importantes de las rocas en el análisis de registros, debido a su efecto en porosidad y la permeabilidad, así como la importancia de sus propiedades eléctricas que tienen una gran influencia en la determinación de las porosidades y saturaciones de fluidos libres del efecto arcilla. Por lo tanto, un paso esencial en el proceso de evaluación de la formación es la determinación del contenido de lutita o volumen de arcilla (V_{sh}) presente en la formación.

Existen varios indicadores del V_{sh} , como se muestra en la Tabla 2.6; cada uno de ellos puede dar ya sea el valor real del contenido de lutita total o un límite superior de dicho valor; el mínimo entre estos límites superiores es una buena aproximación del contenido real de lutita. Por lo tanto, al utilizar el mayor número posible de indicadores, se obtiene una evaluación fiable de la lutita [24].

Todas las técnicas que se muestran en la Tabla 2.6 consideran que la lutita en una arena arcillosa es la misma que la lutita adyacente. Es una premisa razonable para arenas con laminaciones de lutita, pero muy cuestionable para arcilla dispersa. La lutita dispersa es un producto de la diagénesis más que de un proceso deposicional; como resultado, tiende a ser de diferente mineralogía que las lutitas detríticas asociadas [5]. La manera en que el contenido de arcilla afecta a la lectura de un registro depende de su cantidad, propiedades físicas y forma

Indicador de V_{sh}	Ecuación y comentarios
Registro SP , potencial espontáneo	$V_{sh} = \frac{SSP-PSP}{SSP}$ Esta estimación se ve afectada por cambios en la salinidad, contraste resistividad del agua – resistividad del filtrado de lodo, y contenido de hidrocarburos.
Registro GR , rayos gamma	$I_{sh} = \frac{RG-RG_{min}}{RG_{max}-RG_{min}}$ Usualmente $V_{sh} = I_{sh}$, lo cual tiende a exagerar el volumen de lutita. Para solucionar esto se usa la gráfica de la Figura 2.11a, o se puede establecer una correlación empírica para una formación de interés.
Registro NGT , espectroscopía de rayos gamma.	$(I_{sh})_T = \frac{C_T-C_{Tmin}}{C_{Tmax}-C_{Tmin}}$, $(I_{sh})_K = \frac{C_K-C_{Kmin}}{C_{Kmax}-C_{Kmin}}$, $(I_{sh})_{KT} = \frac{C_K C_T - (C_K C_T)_{min}}{(C_K C_T)_{max} - (C_K C_T)_{min}}$ Este registro se recomienda si hay presencia de uranio. El I_{sh} determinado con la combinación de $(I_{sh})_T$ y $(I_{sh})_K$ es independiente del tipo de arcilla.
Combinación registros de porosidad neutrón - densidad	$(V_{sh})_{ND} = \frac{\phi_N - \phi_D}{\phi_{Nsh} - \phi_{Dsh}}$ Este método no puede aplicarse cuando hay presencia de gas [2]. También se puede usar una gráfica cruzada, para un caso específico de propiedades de lutita (Figura 2.11b), con la cual es posible detectar condiciones anormales, tales como cambios en la litología o presencia de gas.

Tabla 2.6: Determinación del V_{sh} a partir de registros geofísicos.

de distribución en el yacimiento [39]. Sin embargo, los registros de densidad, neutrón y rayos gamma son afectados por el contenido de lutita en la roca; pero no por la manera en la cual la lutita está distribuida dentro de ella.

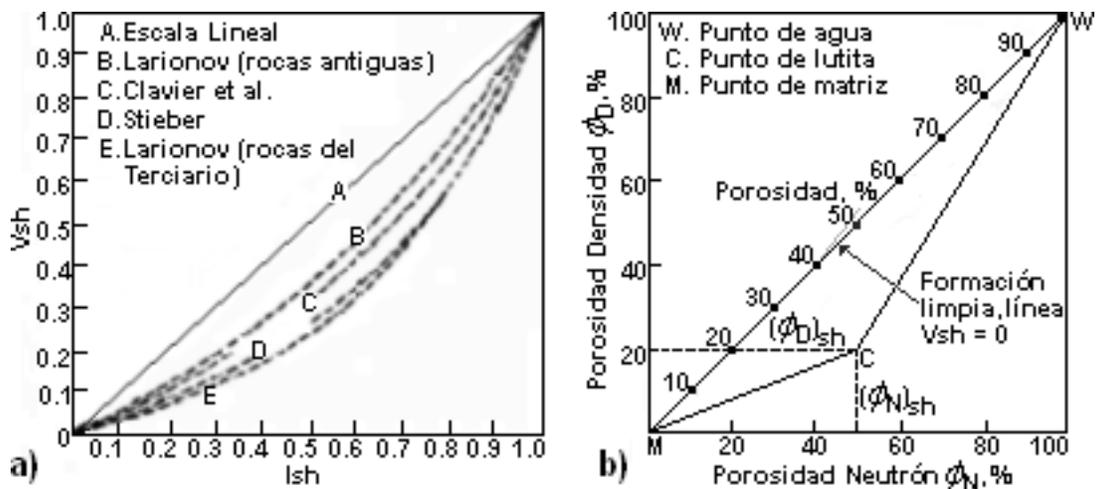


Figura 2.11: a) Correlaciones empíricas que relacionan el V_{sh} con el I_{sh} . b) Gráfica cruzada de los registros densidad – neutrón.

Estimación del V_{sh} utilizando la CEC

Las mediciones se hacen en núcleos de roca (CEC_r) y se comparan con el valor de la capacidad de intercambio catiónico específica de la arcilla (CEC_{cl}) para encontrar el V_{sh} por medio de la ecuación (2.4), la cual indica el V_{sh} para cada capa o cada tipo de arcilla.

$$V_{sh} = \frac{CEC_r}{CEC_{cl}} \quad (2.4)$$

Por otra parte, Kamel [24] estudio los datos proporcionados por Waxman y Smits [46] y propuso la ecuación (2.5) que relaciona el V_{sh} con la CEC:

$$CEC = 10^{(1.9832 \cdot V_{sh} - 2.4473)} \quad (2.5)$$

El valor de V_{sh} obtenido a partir de mediciones de la CEC sirve para calibrar los valores de V_{sh} obtenidos de los registros, en particular el registro RG [30], ya que la CEC se puede determinar como una medición química independiente de los registros geofísicos.

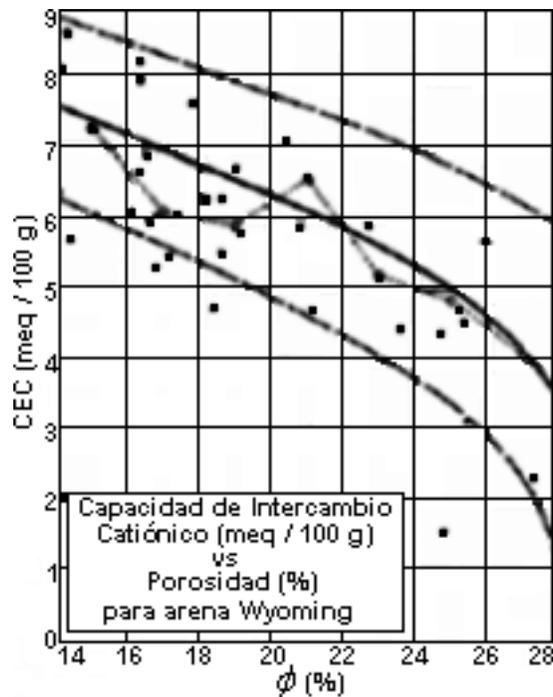
2.6.8 Porosidad y porosidad efectiva

En formaciones arcillosas la pérdida de la porosidad se debe al aumento de las arcillas en el yacimiento; como la CEC es proporcional al contenido de arcilla, podemos decir que la porosidad disminuye con el incremento en la CEC. La Figura 2.12 muestra la relación de la porosidad con la CEC [13].

Como ya dijimos en el Capítulo 1, la porosidad efectiva es la porosidad que tendríamos si se eliminaran la arcilla y su agua ligada^H, y se dejara solamente la fase de arena limpia. Esta agua ligada ocupa un espacio que sólo puede contener “agua de arcilla”, no puede ser desplazada por los hidrocarburos ni puede contribuir a la permeabilidad de la roca. Los cationes de intercambio de la arcilla se encuentran en su capa de agua ligada, ésta reduce el espacio vacío en la roca y por consiguiente la porosidad efectiva. En general a mayor valor de CEC más agua ligada a la arcilla y, por lo tanto, menor porosidad efectiva.

Usar modelos de formación limpia en la interpretación cuantitativa de los registros de porosidad resultará en una sobreestimación de los valores de porosidad [5]; en particular si se utiliza el registro neutrón para determinar esta propiedad. La porosidad del registro neutrón en un intervalo arcilloso es una función tanto del contenido de lutita como de la porosidad efectiva

^HLa definición del agua ligada a la arcilla se da en la Sección 3.6 del Capítulo 3.


 Figura 2.12: Relación de la porosidad con la CEC .

llena de fluido. Este registro proporcionará valores de porosidad aparente más altos debido a que “agrega” los hidrógenos del agua ligada a la arcilla; esto pudiera representar un yacimiento potencial de hidrocarburos; pero como parte del espacio poroso está ocupado por esta agua ligada, en realidad hay una disminución de la porosidad efectiva.

Porosidad de la lutita como función de la CEC

Se considera una lutita en la cual Y es la fracción de su contenido de arcillas secas y CEC la capacidad de intercambio catiónico en meq/g . Teniendo en cuenta que las densidades de los granos de la arcilla seca y de los sedimentos sean los mismos, la CEC de la lutita seca es: $CEC_{sh} = CEC_{cl} \cdot Y$. Al aplicar la ecuación (2.3) con $Q_v = 3.3$ y $\rho = 2.65$, se puede predecir la porosidad de la lutita con la ecuación (2.6):

$$\phi_{sh} = \frac{0.80 \cdot CEC_{cl} \cdot Y}{1 + 0.80 \cdot CEC_{cl} \cdot Y} \quad (2.6)$$

De esta manera, las porosidades de las lutitas compactas ($Q_v = 3.3$) se determinan primero por el contenido y la CEC de la arcilla y no por la presión. El cálculo de las porosidades para la ecuación (2.6) se enlista en la Tabla 2.7, para el rango de valores de Y normalmente encontrados en lutitas; esta tabla muestra que a mayor fracción de arcilla y CEC mayor será

la porosidad. Del rango de valores dados en la Tabla 1.6, las lutitas con mayor contenido de montmorillonita tendrán porosidades en el rango de 5 a 20%, mientras que para las lutitas con caolinita/clorita será de 1 a 5%. Esto explica el porqué las porosidades de lutita no necesariamente disminuyen uniformemente con la profundidad y por qué altas porosidades se pueden encontrar a grandes profundidades.

Tipo de arcilla	CEC promedio <i>meq/g</i>	ϕ_{sh}		
		$Y = 0.35$	$Y = 0.55$	$Y = 0.75$
Montmorillonita	1.0	0.22	0.30	0.37
Illita	0.25	0.07	0.10	0.13
Caolinita / Clorita	0.04	0.01	0.015	0.02

Tabla 2.7: Porosidades de lutita calculadas con datos de *CEC* de la lutita seca.

Por otro lado, si utilizamos los valores de porosidad *CNL* (registro neutrón compensado) de la Tabla 1.6, las porosidades neutrón (ϕ_{CNL}) se enlistan en la Tabla 2.8.

Tipo de arcilla	CEC <i>meq/g</i>	$(\phi_{sh})_{CNL}$		
		$Y = 0.35$	$Y = 0.55$	$Y = 0.75$
Montmorillonita	1.00	0.28	0.39	0.48
Illita	0.25	0.15	0.22	0.29
Clorita	0.04	0.19	0.30	0.40
Caolinita	0.04	0.14	0.22	0.29

Tabla 2.8: Porosidades comunes de lutitas obtenidas del registro neutrón.

2.6.9 Interpretación de registros geofísicos en formaciones arcillosas

En formaciones arcillosas, la evaluación por medio de la interpretación de registros geofísicos se torna difícil, ya que los minerales arcillosos afectan en distinto grado, a todas las mediciones de registros de pozos [44]. Debido a que la lutita es rica en minerales de arcilla, los términos “arcilloso” y “lutítico” son usados indistintamente en los registros de pozos. El problema de la interpretación de registros en formaciones arcillosas son los efectos que tiene la arcilla sobre el yacimiento. Estos son [22, 53]:

- Las arenas limpias que contienen agua pueden (para la misma salinidad del agua de formación) ser más resistivas que las arenas arcillosas que contienen aceite; es decir, la resistividad eléctrica de una arena es considerablemente reducida cuando está presente

material arcilloso. En consecuencia, las arenas arcillosas pueden mostrar un incremento de 2 o 3 en su conductividad con respecto a las arenas limpias.

- La interpretación convencional de la curva SP para formaciones arcillosas resulta en salinidades erróneas de las aguas intersticiales, particularmente cuando las aguas son relativamente dulces. Sin embargo, aunque la reducción del SP usualmente se deba a un cambio de salinidad, puede también originarse por la presencia de arcillas.

Registro de resistividad

Las herramientas de registros eléctricos miden la resistividad aparente R_a , la verdadera R_t o la de la zona invadida R_{xo} . El parámetro de resistividad de mayor importancia es R_t , debido a su relación con la saturación de hidrocarburos en la zona virgen. La presencia de lutita hidratada y su alta conductividad en una arena modifica los valores de resistividad leídos de los registros, ya que tiende a reducir la R_t de las zonas que contienen hidrocarburos y a disminuir el valor de R_o . Esto afecta de manera cuantitativa a la interpretación de registros si se utilizan modelos de formación limpia para calcular la saturación de agua, ya que se calculará un alto valor de S_w no representativo de la formación, subestimando el potencial de la zona [5]. Los análisis de CEC son realizados en núcleos con el fin de determinar la conductividad adicional debida a la arcilla hidratada. Con ello se tendrá una mejor calibración del registro de resistividad.

Registro de potencial espontáneo

El potencial espontáneo (SP) o potencial natural es usualmente causado por la separación de cargas en la arcilla u otros minerales, por la presencia de una membrana semipermeable que impide la difusión de los iones a través del espacio poroso, o por flujo natural de un fluido conductivo que es el agua de formación. Los componentes del SP son [44]:

- **Componente electroquímico.** Se origina por diferencia de salinidades entre el agua de formación y el filtrado del lodo de perforación, y es el principal componente del SP .
- **Componente electrocinético o de electro - filtración.** Se origina por el flujo de un electrolito a través de un medio no metálico permeable. Este componente del SP frecuentemente no se toma en cuenta.

El componente electroquímico (o potencial electroquímico) consiste en un potencial de membrana de la lutita y un potencial de contacto de líquido (llamado también potencial de

membrana de la arena arcillosa en el caso de una formación arcillosa). El primero es la más importante contribución al potencial electroquímico ya que la lutita actúa como una membrana semipermeable, varía con el contenido de arcilla y la porosidad de las lutitas. El potencial de membrana se reduce si la lutita no es una buena membrana catiónica, es decir, si tiene una baja CEC . El potencial electroquímico neto es la diferencia entre los potenciales de membrana de las lutitas y arenas arcillosas; Smits [41] encontró que éste depende de:

- Salinidad del filtrado de lodo,
- Salinidad del agua de formación,
- Q_v de la arena arcillosa, Q_{vr} ,
- Q_v de la lutita, Q_{vsh} .

Existen cartas como la de la Figura 2.13 que facilitan la interpretación de la parte electroquímica (E_c) del registro SP en términos de los cuatro parámetros anteriores. En esas cartas E_c está graficado como una función de la concentración de $NaCl$; cada carta está disponible para un valor particular de Q_{vsh} .

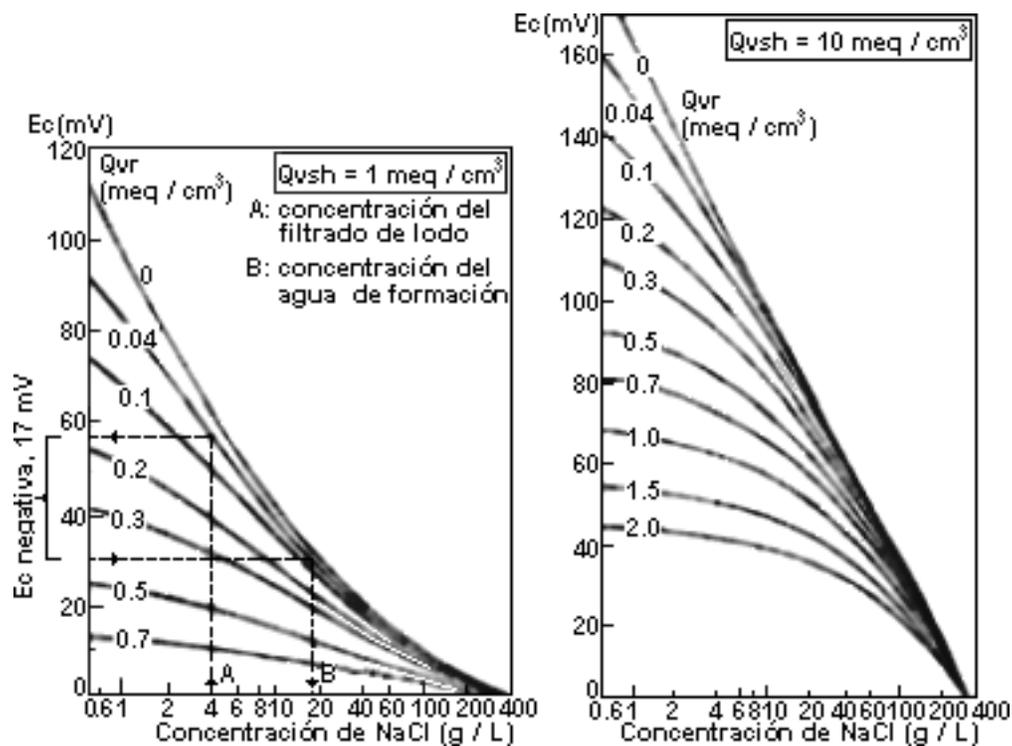


Figura 2.13: Gráficas de E_c vs. Concentración de $NaCl$, para $Q_{vsh} = 1 meq/cm^3$ (izq.), y para $Q_{vsh} = 10 meq/cm^3$ (der.).

Cuando se analizan los registros, debemos tener en cuenta el hecho de que en zonas que contienen aceite el valor efectivo de Q_v puede ser aumentado en un 20 a 30%, dependiendo

del valor de saturación residual de aceite [41]; esto es porque el efecto de la arcilla sobre las propiedades eléctricas de las rocas de yacimientos incrementa cuando la relación de arcilla al contenido de agua incrementa. Es probable, por lo tanto, que la saturación de hidrocarburos aumente también el efecto de la arcilla tanto sobre la resistividad como sobre el SP [22].

Tanto el SP como los fenómenos de resistividad en las formaciones arcillosas están relacionados con la capacidad de intercambio catiónico por unidad de volumen de poro (Q_v). La determinación química independiente de este parámetro es por lo tanto un medio para determinar el contenido efectivo de arcilla de las muestras de núcleos [22].

2.6.10 Saturación de agua

La saturación de agua S_w es uno de los parámetros más importantes en la caracterización de formaciones y yacimientos petroleros, debido a que su valor nos indica tanto la fracción de hidrocarburos existentes en el mismo, así como el potencial productor de hidrocarburos en un yacimiento. La S_w se determina, para un nivel en particular, en forma directa con análisis de núcleos en el laboratorio, y de forma indirecta con modelos matemáticos aplicados de acuerdo con las condiciones y características petrofísicas específicas de cada formación. El evaluar un yacimiento para encontrar su saturación de agua y de hidrocarburos incluye conocer R_w , F , ϕ y R_t [39].

Todas las determinaciones de saturación de agua a partir de los registros de resistividad en formaciones limpias con porosidad intergranular homogénea y donde el agua es el único conductor de la electricidad se basan en la ecuación de Archie o variaciones de la misma [30]. Por el contrario, si existe arcilla en la formación la S_w aumenta porque la conductividad total C_t aumenta, debido a la conductividad proporcionada por la CEC de la arcilla (Figura 1.13), para una misma porosidad efectiva. Por lo tanto la ecuación de saturación de agua de Archie deberá modificarse o se deberá desarrollar un nuevo modelo para relacionar la resistividad de la roca con la saturación de agua en formaciones arcillosas, ya que ahora se tienen dos conductores de la electricidad: el agua de formación y la arcilla hidratada. El componente de conductividad asociado con la arcilla es independiente de la conductividad del agua.

A través de los años, los investigadores han propuesto varios modelos de interpretación para el cálculo de saturación de agua en arenas arcillosas, algunos de ellos se muestran en la Tabla 2.9. Estos modelos se basan en:

Modelo	Ecuación y comentarios
Formaciones limpias	
<i>Archie</i>	$S_w^n = \frac{R_o}{R_t} = \frac{F \cdot R_w}{R_t} = \frac{a \cdot R_w}{\phi^m \cdot R_t}$; en caso desconocido: $a = 1, m = 2, n = 2$. Funciona en yacimientos carbonatados o de arenas con porosidad moderadamente regular y es de menor exactitud para formaciones con fracturas o cavidades.
Formaciones arcillosas	
<i>Disperso</i>	$S_w = \left(\sqrt{\frac{0.8 R_w}{\phi_S^2 \cdot R_t} + \left(\frac{q}{2}\right)^2} - \left(\frac{q}{2}\right) \right) (1 - q)^{-1}$; $q = (\phi_S - \phi_N)$ Funciona en arenas con arcilla autógena, y también se aplica a lutita laminar.
<i>Simandoux</i>	$\frac{1}{R_t} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \cdot S_w + \frac{1}{F \cdot R_w} \cdot S_w^n$; efecto de lutita: $\alpha = V_{sh}/R_{sh}$ Modelo V_{sh} aplicable a lutita dispersa o laminar [2]. Se basa en datos de 4 muestras de montmorillonita de ϕ constante. Es optimista aún cuando $\phi < 20\%$.
<i>Fertl y Hammack</i>	$S_w = \left(\frac{F \cdot R_w}{R_t} \right)^{1/2} - \frac{V_{sh} \cdot R_w}{0.4 \cdot \phi_e \cdot R_{sh}}$ Modelo V_{sh} . Calcula valores altos de S_w , subestimando el potencial de hidrocarburos de la formación. Un valor grande de V_{sh} , sobreestimaré este potencial.
<i>Poupon et. al</i>	$C_t = \frac{(1 - V_{sh}) \cdot C_w \cdot S_w^2}{F} + V_{sh} \cdot C_{sh}$ Es el modelo de lutita laminada. F se relaciona con los estratos de arena limpia y S_w , con el espacio poroso interconectado total de los mismos estratos.

Tabla 2.9: Correlaciones para el cálculo de la saturación de agua.

- Cantidad de lutita presente en una geometría específica dentro de una arena arcillosa. A estos modelos se les conoce como modelos V_{sh} ;
- Forma de distribución de las arcillas en el yacimiento (laminar, dispersa, estructural);
- Características específicas de la lutita, como su CEC o área superficial.

Es raro encontrar una cantidad significativa de mineral conductivo en una roca de un yacimiento potencial, cuando eso sucede la interpretación del registro debe tomar en cuenta dicha conductividad. Sin embargo las arcillas y lutitas no son raras, y contribuyen a la conductividad de la formación debido a la CEC que presentan. Los modelos V_{sh} usados para expresar la resistividad de la arena arcillosa ahora son generalmente considerados como incompletos o incorrectos; por lo tanto se deben utilizar con extrema precaución [5].

La manera en que la conductividad de los contraiones – exceso de conductividad proporcionado por la CEC – actúa en el espacio poroso afecta los cálculos de la conductividad total de la arena y la evaluación del cálculo de la saturación de agua. En general, a mayor CEC (Q_v) menor S_w . Con base en esto se propusieron dos modelos que incluyen a la CEC en el cálculo de la S_w : el modelo de Waxman – Smits y el de Dos Aguas.

2.7 Modelos para el cálculo de saturación de agua basados en la CEC

2.7.1 Modelo de Waxman – Smits

Reconociendo que los modelos V_{sh} tienen deficiencias y que los cationes de intercambio de la arcilla son los responsables del exceso de conductividad que presentan las formaciones arcillosas, en 1968 Waxman y Smits [46] introdujeron un modelo físico de conductividad que incorpora la CEC de la arcilla. Ellos y Hill y Milburn [22] demostraron que el comportamiento electroquímico de las arenas arcillosas se relaciona con la CEC del sedimento y con la Q_v de la roca.

De esta manera, Waxman y Smits propusieron una ecuación para arenas arcillosas que relaciona la conductividad eléctrica de una arena arcillosa saturada con agua, con la conductividad del agua, índice de resistividad, saturación de agua y capacidad de intercambio catiónico por unidad de volumen de poro de la roca. Este modelo se extiende también a arenas arcillosas saturadas con agua y aceite. Las ecuaciones de Waxman y Smits fueron desarrolladas para incluir el exceso de conductividad proporcionado por la CEC de las arcillas, con el fin de determinar valores más exactos y precisos de las propiedades petrofísicas que se pueden obtener de los registros eléctricos.

Para su investigación, Waxman y Smits realizaron mediciones de laboratorio para determinar la resistividad eléctrica y el potencial electroquímico en aproximadamente 315 núcleos, cubriendo una variedad grande de rocas sedimentarias y una amplia gama de concentraciones de solución de $NaCl$. Las muestras de arenas arcillosas fueron seleccionadas de tal manera que hubiera un amplio rango de variación tanto en la CEC como en la manera de distribución de la arcilla. El rango de los valores de Q_v se extendió desde 0 hasta 1.5 meq/mL . Los núcleos con valores de $0.3 \leq Q_v \leq 1.5$ son originarios del horizonte Terciario Inferior y contienen bastante montmorillonita pura como fracción de arcilla, principalmente rodeando los granos e intersticios. Los núcleos en los cuales $0 \leq Q_v \leq 0.5$ vinieron de un horizonte Eoceno y Albiano y contienen principalmente caolinita e illita; en estos núcleos, la arcilla se presenta alrededor de los granos, pero principalmente en láminas delgadas.

Debido a que los cationes de intercambio conducen una corriente eléctrica solamente

cuando están hidratados con agua, la contribución de las arcillas a la conductividad total de la roca no es medida cuantitativamente por la *CEC* por sí misma, pero sí por la *CEC* por unidad de volumen de fluido de poro, Q_v . Waxman y Smits tuvieron en cuenta esto; de esta manera, su modelo considera lo siguiente:

- Dos elementos de conductividad que actúan de forma independiente en el espacio poroso dando trayectorias de conducción paralelas: uno es el electrolito libre contenido en el volumen poroso de la roca, y el otro es el resultado de la contribución de la conductividad de los cationes de intercambio asociados con la arcilla;
- Una movilidad del catión de intercambio que incrementa a un valor máximo y constante con el incremento en la concentración del electrolito equilibrante;
- Constantes idénticas de conductividad geométrica, aplicables para la contribución tanto del electrolito libre como la conductancia del catión de intercambio en la arcilla, a la conductividad de la arena.

Considerando los elementos de conductividad en paralelo, el electrolito libre y los cationes de intercambio, se tiene la ecuación (2.7).

$$C_o = x \cdot C_e + y \cdot C_w \quad (2.7)$$

C_o : conductividad del núcleo saturado con salmuera, $mho\ cm^{-1}$,

C_e : conductividad de los cationes de intercambio de la arcilla, $mho\ cm^{-1}$,

C_w : conductividad del agua de formación en equilibrio, $mho\ cm^{-1}$,

x, y : constantes geométricas apropiadas.

Además, el modelo supone que la corriente eléctrica transportada por los contraiones asociados con la arcilla recorre la misma trayectoria tortuosa que la corriente que es atribuida a los iones en el agua de poro; de esta manera, la tortuosidad es la misma para todos los iones y los parámetros geométricos x y y pueden suponerse iguales. Se asume también que la solución electrolítica en el sistema poroso tiene la misma conductividad eléctrica que la solución en equilibrio. Por analogía con la idea de factor de resistividad de la formación para arenas limpias, se puede escribir:

$$x = y = \frac{1}{F^*} \quad (2.8)$$

donde F^* es el factor de resistividad de la formación de la arena arcillosa, el cual está relacionado con la porosidad interconectada total y es independiente de la salinidad del agua

de formación. F^* se relaciona con la porosidad de acuerdo con la relación de Archie:

$$F^* = \phi^{-m^*} \tag{2.9}$$

El exponente m^* de la ecuación (2.9) incrementa con la arcillosidad, alcanzando valores tan altos como 2.9 en lutitas. Esto sugeriría que la tortuosidad de las formaciones arcillosas es mucho más grande que la de las arenas limpias. Waxman y Smits reportaron un valor de 1.74 para arenas del Eoceno y 2.43 para arenas del Terciario Inferior.

Sustituyendo la ecuación (2.8) en la ecuación (2.7) se tiene:

$$C_o = \frac{1}{F^*} (C_e + C_w) \tag{2.10}$$

Para arenas limpias, $C_e = 0$ y F^* se reduce a F , el factor de formación usual definido como C_w/C_o o R_o/R_w .

Waxman y Smits ilustraron a $1/F^*$ como la pendiente de la porción de línea recta de la curva de conductividad del núcleo, C_o , vs conductividad del agua en equilibrio, C_w , ilustrada por las Figura 1.13 y Figura 2.14 (excepto para valores bajos de conductividad del agua en equilibrio). Puesto que C_e es constante sobre este rango de los valores de C_w , la pendiente de la porción de línea recta de la curva de conductividad es igual al recíproco del factor de formación $1/F^*$; la ordenada al origen \overline{BC} , obtenida por extrapolación de la porción de línea recta de la gráfica de conductividad al eje C_o , es igual a C_e/F^* , y el segmento de línea \overline{AB} es igual a C_e o $(\lambda_{Na}^e Q_v)/1000$.

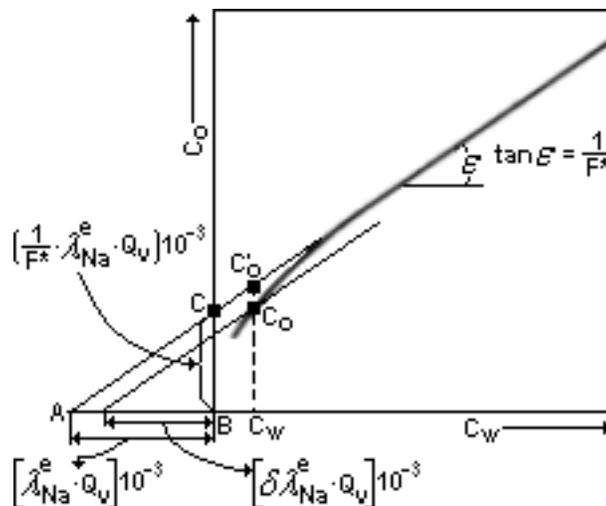


Figura 2.14: Conductividad del núcleo con $S_w = 100\%$ en función de la conductividad de la solución en equilibrio.

El aspecto más importante del modelo de Waxman – Smits, es que la conductividad

con la que contribuye la arcilla, es definida como el producto de la capacidad de intercambio catiónico volumétrica, Q_v , y la conductividad equivalente del contraíón, B . La conductividad de los iones de intercambio de la arcilla, C_e , está expresada entonces como:

$$C_e = B \cdot Q_v \quad (2.11)$$

B es la conductancia equivalente de los contraiones de la arcilla y sodio, está en función de la movilidad del contraíón y de la conductividad de la solución C_w . El coeficiente B a 25 °C, en unidades de $mho\ cm^2\ meq^{-1}$, está empíricamente expresado como [5, 46]:

$$B = 0.046 \left(1 - 0.6e^{C_w/0.013} \right) \quad (2.12)$$

La Figura 2.15 proporciona valores de B determinados experimentalmente por Waxman y Thomas para diferentes temperaturas [5]. Por otra parte, en términos de la resistividad del agua, B puede expresarse de la siguiente manera [30]:

$$B = 4.6 \left(1 - 0.6e^{-0.77/R_w} \right) \quad (2.13)$$

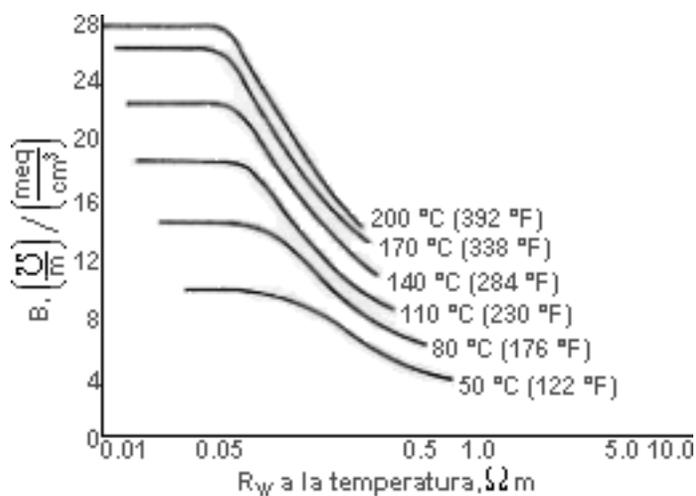


Figura 2.15: Conductancia equivalente de los contraiones, B , vs. resistividad de la salmuera en equilibrio a varias temperaturas.

El modelo de Waxman y Smits, ecuación (2.10), para arenas arcillosas saturadas con agua se vuelve entonces:

$$C_o = \frac{1}{F^*} \cdot (B \cdot Q_v + C_w) \quad (2.14)$$

En este caso, la conductividad efectiva del agua a una saturación del 100% se considera como:

$$C_{we} = C_w + B \cdot Q_v \quad (2.15)$$

- C_w : conductividad del agua libre dentro del poro, mho/m ,
 B : conductividad específica de los contraiones, $(mho/m)(meq/cm^3)$,
 Q_v : CEC, meq por unidad de volumen de fluido de poro.

En el caso de formaciones productoras de hidrocarburos, se tiene $S_w < 1$ y desplazamiento del agua libre, el volumen de fluido de poro disponible para hidratar los cationes de intercambio es reducido; entonces se considera que la concentración de los contraiones asociados con la arcilla aumenta en el agua de poro remanente y la S_w disminuye. Esto quiere decir que a mayor CEC (Q_v) menor S_w . Esta concentración Q'_v se relaciona con Q_v y S_w :

$$Q'_v = \frac{CEC}{V_p \cdot S_w} = \frac{Q_v}{S_w} \quad (2.16)$$

- Q'_v : concentración efectiva de los iones de intercambio cuando $S_o > 0$,
 V_p : volumen de poros, cm^3/g .

Se asume que la movilidad de los iones de intercambio no es afectada por el reemplazo parcial del agua; entonces la conductividad de los contraiones está dada por BQ_v/S_w ($mho\ cm^{-1}$), y la conductividad de una formación areno – arcillosa que contiene agua e hidrocarburos puede ser descrita con una ecuación análoga a la ecuación (2.15) para arenas saturadas con agua. Por lo tanto, la ecuación de conductividad de Waxman – Smits para formaciones arcillosas productoras de hidrocarburos es:

$$C_t = \frac{1}{G^*} \left(C_w + \frac{B \cdot Q_v}{S_w} \right) \quad (2.17)$$

C_t es la conductividad de la arena parcialmente saturada con agua, y G^* es un factor geométrico el cual es una función de la porosidad, saturación de agua y geometría de poro, pero independiente del contenido de arcilla (Q_v). Se supone que G^* incrementa cuando S_w disminuye puesto que el espacio poroso saturado con agua disminuye. El factor geométrico G^* está definido como:

$$\frac{1}{G^*} = \frac{S_w^n}{F^*} \quad (2.18)$$

Para arenas limpias F^* y G^* se reducen a:

$$F = \frac{C_w}{C_o} = \frac{R_o}{R_w} \quad (2.19) \qquad G = \frac{C_w}{C_t} = \frac{R_t}{R_w} \quad (2.20)$$

Considerando la ecuación de saturación de Archie para yacimientos y formaciones limpias:

$$\frac{F^*}{G^*} = \frac{R_o}{R_t} = S_w^{n^*} \quad (2.21)$$

donde n^* es el exponente de saturación para formaciones arcillosas en el modelo de Waxman – Smits. El valor de n^* debe variar con el tipo de roca, pero es independiente de Q_v ; sin embargo, en ausencia de datos se puede utilizar $n^* = 2$.

Sustituyendo valores de G^* de la ecuación (2.21) en la ecuación (2.17) resulta que la conductividad total dada por la ecuación de Waxman y Smits es:

$$C_t = \frac{S_w^n}{F} \left(C_w + \frac{B \cdot Q_v}{S_w^{n-1}} \right) \quad (2.22)$$

S_w está relacionada con el espacio poroso interconectado total.

La ecuación para arenas arcillosas saturadas con agua y con aceite del modelo de Waxman Smits, también se puede escribir en términos de resistividades como:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{S_w^n}{F} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{B \cdot Q_v}{S_w^{n-1}} \right) \quad (2.23)$$

La conductividad efectiva del agua está dada por:

$$C_{we} = C_w + \frac{B \cdot Q_v}{S_w} \quad (2.24)$$

El modelo de Waxman – Smits es muy confiable debido a su simplicidad y fundamento experimental; generalmente predice mayores estimaciones del aceite in – situ que las que son obtenidas a partir de relaciones de arenas usualmente limpias (cuando se usa la ecuación de Archie).

Las pruebas de conductividades C_o/C_w , especialmente utilizadas para núcleos provenientes de formaciones arcillosas laminadas, son excelentes para la medición del factor BQ_v en las ecuaciones de Waxman – Smits. De lo anterior es de gran importancia en el análisis de registros eléctricos para arenas arcillosas, incluir a la *CEC* como un parámetro de cálculo.

2.7.2 Modelo de Dos Aguas

En el tiempo en que se desarrolló y presentó el modelo de Waxman – Smits no se disponía de una medición continua de la *CEC* de la roca in situ, como resultado surge el modelo de Dos Aguas. Este modelo se basa en tres premisas:

- La conductividad de la arcilla se debe a su *CEC*;
- La *CEC* de arcillas puras es proporcional al área superficial de la arcilla (ver Figura 2.7);

- En soluciones salinas, los aniones se excluyen de una capa de agua ligada a la arcilla.

En el modelo de Dos Aguas, se considera que la arcilla consiste en dos componentes, agua ligada y minerales de arcilla. Como los minerales de arcilla (coloides secos) se consideran eléctricamente inertes, pueden tratarse como otros minerales; así que la conductividad de la arcilla proviene solamente de la conductividad del agua ligada que se supone es independiente del tipo de arcilla (del segundo postulado que se mencionó). Además la conductividad de la arcilla es proporcional al volumen de agua ligada que está en contacto con la superficie de los granos de arcilla.

En este modelo también se considera que la conducción de los contraiones se restringirá al agua ligada donde éstos residen y la conducción del electrolito normal se asociará al agua libre, puesto que los aniones de Cl^- se excluyen de la parte impregnada y solamente están presentes los cationes requeridos para balancear la carga negativa sobre la superficie de arcilla. Esto usualmente causa que el agua ligada a la arcilla sea menos salada que el agua en la arena asociada, por esta razón el nombre de “Dos Aguas”. En consecuencia, se supone que la conductividad de una formación arcillosa se comporta como la de una formación limpia de la misma porosidad, de conductividad efectiva C_{we} , y que contiene dos tipos de agua: agua ligada a la arcilla y agua libre.

Agua ligada a la arcilla

Esta agua asociada con las lutitas tiene conductividad C_b , y ocupa una fracción del espacio poroso que es S_b . La saturación del agua ligada S_b puede expresarse como:

$$S_b = \frac{\gamma_c(n)}{\gamma(n)} \cdot v_Q \cdot Q_v \quad (2.25)$$

$\gamma_c(n)$: salinidad crítica del agua,

$\gamma(n)$: salinidad del agua a condiciones de yacimiento,

Q_v : CEC por unidad de volumen de poros de la roca.

$$v_Q = \frac{A_v \cdot x_H}{Q_v} \quad (2.26)$$

A_v : área superficial de la arcilla por unidad de volumen poroso,

x_H : espesor de la doble capa.

Debido a que el agua ligada contiene todos los contraiones, su concentración es igual a Q_v/S_b , y la conductividad aparente del agua ligada, C_b , puede ser expresada de acuerdo con la

ecuación (2.11) como:

$$C_b = \frac{B \cdot Q_v}{S_b} = \frac{\gamma_c(n)}{\gamma(n)} \cdot v_Q \cdot B \quad (2.27)$$

Agua libre

Esta agua es libre de la superficie de arcilla, tiene conductividad C_w , ocupa la fracción del espacio de poro remanente. Se llama así para distinguirla del agua ligada; pero esta terminología no implica productividad ya que también incluye al agua de formación irreductible. Considerando que S_{wt} es la saturación total de agua en fracción de volumen de la porosidad total, ϕ_t ; la saturación del agua libre $1 - S_b$ está expresada como:

$$S_{wt} - S_b = S_{wt} - \frac{\gamma_c(n)}{\gamma(n)} \cdot v_Q \cdot Q_v \quad (2.28)$$

Suponiendo que los contraiones y los iones de sal del agua libre recorren la misma trayectoria tortuosa, la formación 100% saturada con agua se comporta como si tuviera un agua de conductividad efectiva C_{we} , como se indica en la ecuación (2.29):

$$C_{we} = C_w (1 - S_b) + C_b \cdot S_b \quad (2.29)$$

Esquemáticamente, las formaciones arcillosas con $Sw = 100\%$ se consideran con el modelo de Dos Aguas como se ilustra en la Figura 2.16.

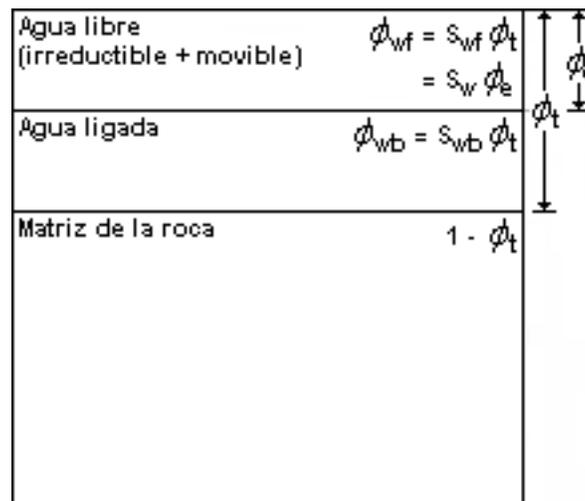


Figura 2.16: Modelo de Dos Aguas de una formación arcillosa saturada al 100% con agua.

En el caso de las formaciones arcillosas que contienen hidrocarburos, éstos desplazan solamente el agua libre. Cuando esto sucede, una cantidad relativa de agua impregnada y de libre se intercambian dando una conductividad efectiva del agua en el canal de poro como sigue:

$$C_{we} = C_w \left(1 - \frac{S_b}{S_{wt}}\right) + \left(\frac{C_b \cdot S_b}{S_{wt}}\right) \quad (2.30)$$

Para la mayoría de las rocas (excepto para minerales conductivos como la piritita que no puede tratarse de esta manera) sólo es necesario considerar la parte porosa al discutir las propiedades eléctricas y se trata de acuerdo con la ecuación de la saturación de agua de Archie. La conductividad en la arena con hidrocarburos es:

$$C_t = (S_{wt} \cdot \phi_t)^2 \left[C_w \left(1 - \frac{S_b}{S_{wt}}\right) + \left(\frac{C_b \cdot S_b}{S_{wt}}\right) \right] \quad (2.31)$$

Como la conductividad de los contraiones, BQ_v , se restringe a la fracción del espacio poroso WQ_v , el modelo predice que la conductividad del agua impregnada C_b será el cociente:

$$C_b = \frac{B}{W} \quad (2.32)$$

Considerando que $S_b = WQ_v$, donde W es el volumen de agua ligada, la ecuación de conductividad se convierte en:

$$C_t = (S_{wt} \cdot \phi_t)^2 \left[C_w \left(1 - \frac{W \cdot Q_v}{S_{wt}}\right) + \frac{B \cdot Q_v}{S_{wt}} \right] \quad (2.33)$$

C_t : conductividad de la formación no invadida,

S_{wt} : fracción del espacio poroso total que contiene agua.

La ecuación (2.33) representa la relación del modelo de Dos Aguas para el cálculo de la saturación de agua. La Figura 2.17 muestra la división de una arena arcillosa con hidrocarburos, según el modelo de Dos Aguas. La matriz de la roca está compuesta de partículas de arena, sedimentos y partículas de arcilla seca. El fluido está compuesto de agua impregnada, agua libre e hidrocarburos [2].

La porosidad total se designa como ϕ_t y la porosidad efectiva como ϕ_e , la cual se puede expresar como: $\phi_e = \phi_t(1 - S_b)$, donde S_b es la fracción del espacio poroso. La fracción volumétrica de hidrocarburos es: $\phi_h = \phi_t(1 - S_{wt})$.

Debe observarse que ϕ_t y S_{wt} se refieren al volumen total de los poros saturados con agua ligada y agua libre. S_{wt} es una cantidad difícil de determinar en la interpretación de arenas arcillosas; esto se debe a que la carga de los contraiones asociada con la arcilla, en otras palabras la CEC, aumenta la conductividad eléctrica. Esto toma la forma de cationes que migran de un sitio a otro cuando se impone un campo eléctrico [2].

Para poder evaluar una formación arcillosa con el modelo de Dos Aguas deben determinarse cuatro parámetros que son C_w (o R_w), C_b (o R_b), ϕ_t , y S_b . Para determinar exactamente

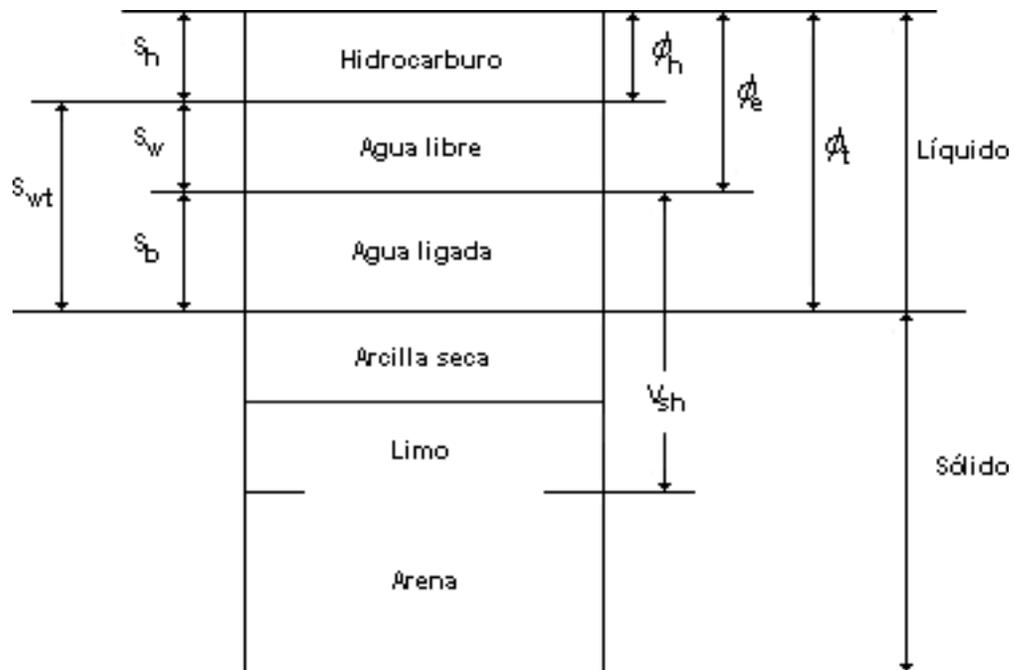


Figura 2.17: Esquema de la división de una arena arcillosa saturada con agua e hidrocarburos en el modelo de Dos Aguas.

a S_b , se requiere de una medida directa de Q_v obtenida en el laboratorio.