

13
2oj.



AVANCES Y PERSPECTIVAS EN LA
INTERPRETACION DEL REGISTRO
DE POTENCIAL NATURAL

TESIS PROFESIONAL

Ingeniería Geofísica

ROIG SAMPEDRO FRANCISCO JOAQUIN

México, D. F.

1987



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

		PAG.
	INTRODUCCION	
CAPITULO I	ORIGEN DEL POTENCIAL NATURAL	1
	1.1.-Algunos conceptos termo dinámicos	1
	1.2.-Potencial de Difusión	9
	1.3.-Potencial de Difusión-Ad sorción	19
	1.4.-Potencial de Electrofil- tración	32
	1.5.-Potencial de Oxidación-- Reducción	44
CAPITULO II	MODELO ELEMENTAL PARA GENERAR UN REGISTRO DE POTENCIAL NATU RAL	57
	II.2.-Respuesta del Registro- SP expresada como una - convolución	65
CAPITULO III	EMPLEO DEL REGISTRO DE POTEN- CIAL NATURAL.	75
CAPITULO IV	PERSPECTIVAS DEL REGISTRO DE- POTENCIAL NATURAL	92
	IV.1.-Utilización del fenóme- no de electrofiltración para la detección de -- filtraciones en presas.	92
	IV.2.-El Registro Redox	102
	CONCLUSIONES	119
	BIBLIOGRAFIA	121

INTRODUCCION

Desde hace años, se han venido publicando muchos trabajos sobre el origen del potencial natural medido en los pozos a través del registro SP, sobre las correcciones que se hacen a este último para su buena interpretación y sobre su aplicación en dos cuestiones muy importantes en la -- evaluación de formaciones y de cuencas sedimentarias, las cuales son:

- 1.-Obtención de la resistividad del agua de formación -- (R_w), de fundamental importancia en el cálculo de la -- saturación de agua (S_w).
- 2.-Discernimiento sobre la historia de sedimentación de -- una cuenca sedimentaria.

Sin embargo, entre los trabajos teóricos sobre el origen del potencial natural y los de aplicación práctica del registro SP, existe un divorcio, los primeros enfocan el -- problema desde un punto de vista ajeno a la interpreta -- ción de registros de pozos, y los segundos, a veces hacen suposiciones que no siempre están firmemente basadas en -- la teoría.

Este trabajo intenta conciliar los aspectos teórico y -- práctico a través de los siguientes puntos:

- 1.-Un análisis detallado de las bases teóricas del origen del potencial natural observado en los pozos, conside -- rando los diferentes fenómenos que lo producen.

- 2.-Analizando la curva SP, desde un punto de vista matemático, y fundamentando lo que muchos analistas habían observado experimentalmente.
- 3.-Situando al registro SP dentro del contexto matemático de la teoría de señales, expresando la respuesta del - SP como una convolución.
- 4.-Presentando una interpretación del SP, en cuanto a la obtención de R_w , congruente en mayor medida con la teoría expuesta que el método tradicional empleado hasta la fecha.

Por otra parte, mucho se ha hablado acerca de que el re - gistro SP, es un registro obsoleto, sin embargo, esto se dice por la falta de conocimiento de los fenómenos involucrados. En este trabajo se presentan dos aplicaciones - - prácticas de gran utilidad del potencial natural, empleando los fenómenos de Electrofiltración y Redox, los cuales habían permanecido casi olvidados por considerárseles como una contribución insignificante al fenómeno total del - SP.

En fin, es de suma importancia el tratar de obtener la ma yor utilidad de herramientas de bajo costo de operación, - como es el caso del registro SP, a través de una mayor -- comprensión del fenómeno involucrado, sobre todo, en esta época de crisis económica en nuestro país.

CAPITULO I

ORIGEN DEL POTENCIAL NATURAL

I.1.-Algunos conceptos termodinámicos

Los potenciales espontáneos que son medidos en un pozo, se deben a una distribución desbalanceada de los iones y concentraciones dentro de las soluciones de las formaciones y en el agujero. Estos potenciales pueden atribuirse a procesos como la difusión, adsorción, óxido-reducción y electrofiltración, los cuales involucran movimientos de iones. Es necesario antes de iniciar la discusión de los mecanismos, empezar con una descripción breve de algunos conceptos básicos de termodinámica-química que serán de mucha utilidad conforme se avance en el desarrollo teórico de una expresión matemática que explique los potenciales espontáneos que ocurren en un pozo.

Como sugiere Lynch (1962) un punto de partida lógico es iniciar con la discusión de ciertas funciones termodinámicas como la función de trabajo y la función de Gibbs.

Se han definido las siguientes funciones (Glasstone,1969):

$$A = E - TS \quad \dots 1$$

$$G = H - TS \quad \dots 2$$

donde:

A = Función de trabajo

E = Contenido de energía del sistema

T = Temperatura absoluta

S = Entropía

G = Energía libre (Función de Gibbs)

H = Entalpía

Para un proceso isotérmico 1 y 2 pueden escribirse como:

$$\Delta A = \Delta E - T\Delta S \quad \dots 3$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \dots 4$$

restando 3 de 4 se tiene

$$\Delta G - \Delta A = \Delta H - \Delta E \quad \dots 5$$

si ΔH se mide a presión constante y como

$$\Delta H - \Delta E = P\Delta V \quad \dots 6$$

donde ΔV es el cambio en volumen.

Substituyendo 6 en 5 se tiene

$$\Delta G = \Delta A + P\Delta V \quad \dots 7$$

Por otra parte

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad \dots 8$$

donde Q es el calor tomado reversiblemente.

Substituyendo 8 en 3 se llega a

$$\Delta A = \Delta E - Q \quad \dots 9$$

si bien por definición

$$\Delta E = Q - W \quad \dots 10$$

donde W es el trabajo

de 9 y 10 se obtiene que

$$-\Delta A = W \quad \dots 11$$

Hay que hacer notar que un decrecimiento en la función A

es una medida del trabajo máximo reversible que puede obtenerse en un cierto proceso isotérmico. Así se considera que W , incluye todas las formas de trabajo: mecánico, - eléctrico, etc.

Substituyendo 11 en 7 se tiene

$$-\Delta G = W - P\Delta V \quad \dots 12$$

De aquí que para un proceso isotérmico a presión constante el decremento de la energía libre es igual al trabajo neto. Por lo tanto la energía libre (Lynch op. cit.) es una medida de la tendencia de una substancia o sistema - para ir de una condición a otras y puede considerarse como el potencial responsable de los cambios físicos o químicos.

Es necesario en este punto, puesto que se necesita evaluar el potencial espontáneo, considerar el trabajo que puede ser realizado por la electricidad, ya que al ser generadas fuerzas electromotrices en el sistema pozo-fornaciones, existe un flujo de corriente. Se tiene que bajo condiciones termodinámicas ideales:

$$W = D F \quad \dots 13$$

donde

W = Trabajo
D = Voltaje
F = Constante de Faraday

y por 12, al no existir trabajo debido a expansión

$$-\Delta G = D F \quad \dots 14$$

Despejando D

$$D = - \frac{\Delta G}{F} \quad \dots 15$$

Si bien 15 nos da una expresión para calcular D, se presenta la dificultad de evaluar el cambio en la energía libre, ya que esto último implicaría que se conociese la Entalpía y la Entropía involucradas en el proceso de la generación de ese voltaje D. Es pues necesario evaluar el cambio en la energía libre, a partir de otros parámetros, y considerando por el momento una mol de gas ideal. Ya que por definición:

$$H = E + PV \quad \dots 16$$

Substituyendo esta última expresión en 4 y diferenciando

$$dG = dE + PdV + VdP - Tds - SdT \quad \dots 17$$

Suponiendo que el proceso es reversible y que el trabajo se debe totalmente a la expansión

$$dG = VdP - SdT \quad \dots 18$$

A temperatura constante se tiene

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_T = V \quad \dots 19$$

Donde

- G = Energía libre
- T = Temperatura absoluta
- P = Presión
- V = Volumen molar

Para un gas ideal

$$v = \frac{RT}{P} \quad \dots 20$$

Donde R=Constante universal de los gases.

Substituyendo 20 en 19 e integrando

$$G = RT \ln P + G_0 \quad \dots 21$$

Donde G_0 = Constante de integración que depende de la naturaleza y temperatura del gas.

La ecuación 21 puesto que ha sido deducida para un gas ideal, pierde validez cuando se trate de un gas real, es por este hecho que G.N. Lewis (1901) sugirió el concepto y el uso de la función de fugacidad (f), la cual está definida por:

$$G = RT \ln f + G_0 \quad \dots 22$$

De tal manera que la relación siempre se satisfaga independientemente de que el gas sea ideal o no. Además de que la relación

$$\frac{f}{P} \quad \dots 23$$

Donde P es la presión, se aproxima a la unidad a medida que el gas se aproxima a su comportamiento ideal - - - (cuando $P \rightarrow 0$).

Considerando el cambio de energía libre entre los estados 1 y 2, esto es, considerando la integral definida de 19 entre 1 y 2, y como además la fugacidad de un gas real es igual a su presión cuando ésta es muy baja - - -

(Glasstone, 1966) se tiene entonces

$$G_2 - G_1 = RT \ln \frac{f_2}{f_1} \quad \dots 24$$

Y como la energía libre al final del proceso siempre es menor

$$-\Delta G = RT \ln \frac{f_2}{f_1} \quad \dots 25$$

Es un hecho que para una mol de substancia pura, la energía libre G y el potencial químico μ son idénticos (Glasstone, 1969), tal que puede escribirse:

$$\mu = RT \ln f + \mu_0 \quad \dots 26$$

Por otra parte, si un líquido y su vapor están en equilibrio, el potencial químico de un cierto componente será el mismo en ambas fases; se sigue por lo tanto que el potencial químico de cualquier componente en una solución líquida puede ser representado por 26, donde f es la fugacidad del componente en el vapor en equilibrio con la solución.

Si bien la fugacidad absoluta de una substancia es muy difícil de medir, es frecuente utilizar la fugacidad relativa, ésto es, la fugacidad f relativa a una fugacidad de referencia f_0 , la cual se escoge de una manera arbitraria. Este valor relativo de la fugacidad se designa como la actividad α (Lynch, 1962).

$$\alpha = \frac{f}{f_0} \quad \dots 27$$

Entonces la ecuación 25, puede escribirse

$$-\Delta G = RT \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \dots 28$$

En la práctica se escoge un estado de referencia o estado estandar en el cual la actividad de la substancia dada es arbitrariamente tomada como la unidad. De esta manera, la actividad de un componente en solución, se expresa como la relación de su valor a aquel escogido en su estado estandar.

Se sabe que cuando una solución se aproxima a una dilución infinita, el comportamiento del solvente llega a ser mas cercano al ideal, esto es, la fugacidad (o presión de vapor) es más cercanamente proporcional a la fracción molar. Por lo tanto, se puede escribir lo siguiente:

$$a = X^Y$$

...29

Donde

a = Actividad

X = Fracción molar del constituyente

Y = Coeficiente de actividad

a se aproxima a la unidad a medida que la solución llega a ser menos y menos concentrada y tiende a ser el solvente puro. Es entonces práctica invariable escoger el solvente líquido puro como el estado estandar cuando su actividad es la unidad.

Para una solución de un soluto sólido en un solvente líquido, el estado estandar para el último es como el descripto arriba, pero para el soluto es mas conveniente escoger un estado estandar completamente diferente.

En una solución diluida, la fracción molar del soluto es -proporcional a su concentración. Para soluciones de concentración apreciable, las cuales no se comportan idealmente, es necesario incluir un coeficiente de actividad tal que:

$$G = RT \ln C \gamma_c + G_0 \quad \dots 30$$

Donde C es la concentración.

Entonces el estado estandar del soluto se escoge tal que, -el coeficiente de actividad es unidad a dilución infinita, es en este estado cuando la actividad del soluto es igual a la concentración del soluto, condición que se mantendrá sobre un rango amplio de concentración, hasta que a concentraciones altas la diferencia entre actividad y concentración sea muy apreciable (Lynch, 1962). Por lo tanto se -- puede escribir:

$$-\Delta G = RT \ln \frac{C_2}{C_1} \quad \dots 31$$

Al tener ahora evaluado el cambio en energía libre, ya sea en términos de las actividades o de las concentraciones, - la ecuación 15 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2} \quad \dots 32$$

Donde n es el número de equivalentes por mol tomando en - cuenta que las actividades están expresadas usualmente en - una base molar.

La ecuación 32 constituye el modelo matemático básico en - el análisis de la componente electroquímica del potencial - natural observado en los pozos.

I.2.-Potencial de Difusión

Se ha observado que cuando dos soluciones del mismo elec trolito entran en contacto, la más concentrada tenderá a difundirse en la más diluída, estando la velocidad de di fusión gobernada por la tasa de difusión de cada ión, la cual es proporcional aproximadamente a la velocidad de - éste en un campo eléctrico. Ahora bien, si el catión se mueve más rápido que el anión, el primero tenderá a di fundirse más rápidamente que el segundo dentro de la so lución diluída, esta última llegará a estar entonces car gada positivamente con respecto a la solución con centra da; si el anión fuera el ión más rápido, la solución di luída adquiriría una carga negativa. En ambos casos una do ble capa eléctrica se produce en la unión de las solu ciones y la atracción entre cargas opuestas previene de cual quier posible separación de los aniones y los cati ones, debe haber sin embargo una diferencia de potencial en la frontera y ésta es la que es llamada potencial de unión de líquidos o potencial de difusión.

Por otra parte, su magnitud depende de la velocidad rela tiva de los iones, de tal forma que la solución más di luída adquiere la carga del ión más rápido.

Haciendo referencia a los conceptos termodinámicos antes expuestos y considerando un sistema aislado que consta de una mezcla de 2 componentes (Fig. 1) se tiene lo si guiente: (Reynolds, 1980)

- a) La entropía del sistema es igual a la suma de las en tropías de ambos componentes.

b) El estado de equilibrio será el de entropía máxima.

Si llamamos a la entropía del sistema, S_c , se puede escribir lo siguiente:

$$S_c = S_A(U_A, V_A, N_{1A}, \dots, N_{nA}) + S_B(U_B, V_B, N_{1B}, \dots, N_{nB}) \quad \dots 33$$

Donde

U = Energía interna

V = Volumen

N_{iA} = Número de moles del constituyente i
del componente A

Ya que el sistema esta aislado

$$U_A + U_B = \text{Constante}$$

$$V_A + V_B = \text{Constante}$$

$$N_{iA} + N_{iB} = \text{Constante}$$

Para encontrar la máxima entropía se tiene:

$$\left(\frac{\partial S_c}{\partial U_A} \right)_{V_A, N_{1A}, \dots, N_{nA}} = 0 \quad \dots 34$$

$$\left(\frac{\partial S_c}{\partial V_A} \right)_{U_A, N_{1A}, \dots, N_{nA}} = 0 \quad \dots 35$$

$$\left(\frac{\partial S_c}{\partial N_{iA}} \right)_{U_A, V_A, N_{1A}, \dots, N_{(i-1)A}, N_{(i+1)A}, \dots, N_{nA}} = 0 \quad \dots 36$$

Las condiciones establecidas por 34, 35 y 36 implican que:

$$T_A = T_B \quad P_A = P_B \quad \mu_{iA} = \mu_{iB}$$

Suponiendo que ambos componentes están en equilibrio térmico y mecánico y que los potenciales electroquímicos de todos los constituyentes, salvo el i , son iguales en los dos componentes. El cambio de entropía del sistema combinado relacionado con cualquier interacción será:

$$\begin{aligned} dS_c &= dS_A + dS_B \\ dS_c &= \left(\frac{\mu_{iB}}{T} - \frac{\mu_{iA}}{T} \right) dN_{iA} \end{aligned} \quad \dots 37$$

Donde dN_{iA} representa un número infinitesimal de moles -- del constituyente i transferidos de B a A, dado que el -- sistema combinado está aislado, la Segunda Ley de la Termodinámica establece que:

$$dS_c \geq 0 \quad \dots 38$$

entonces

$$(\mu_{iB} - \mu_{iA}) dN_{iA} \geq 0 \quad \dots 39$$

La igualdad está relacionada con la transferencia reversible entre ambos componentes, que solo puede ocurrir si:

$$\mu_{iA} = \mu_{iB} \quad \dots 40$$

Ya que la desigualdad se mantiene si:

$$\mu_{iB} > \mu_{iA} \rightarrow dN_{iA} > 0 \quad \dots 41$$

6

$$\mu_{iB} < \mu_{iA} \rightarrow dN_{iA} < 0 \quad \dots 42$$

Por 41 y 42 se puede concluir que el potencial electroquímico actúa como una fuerza motriz para la transferencia -

de masa. Por lo que cualquier constituyente tratará de pasar del componente que tenga el potencial electroquímico más elevado para dicho constituyente al componente cuyo potencial electroquímico sea más bajo.

Hasta aquí se ha demostrado el porqué un ion pasa de la solución más concentrada a la de menor concentración, en lo que sigue se hará el desarrollo de una expresión que permita evaluar el potencial de difusión.

M. Planck (1890) y P. Henderson (1907) derivaron ecuaciones para el potencial entre dos soluciones cualesquiera. El primero postuló una frontera abrupta y el segundo supuso una frontera que consiste de una serie de mezclas de los electrolitos en todas proporciones. Aquí se seguirá el desarrollo de V.N. Dakhnov (1962), el cual propone el modelo que se muestra en la Fig. 2.

Donde las soluciones están divididas en una serie de elementos de volumen limitados por los planos S_1 y S_2 , considerando:

C_d = Concentración molar en la solución diluida

C_c = Concentración molar en la solución concentrada

X = Coordenada del plano S_1

$X+dX$ = Coordenada del plano S_2

P_c = Concentración parcial de cationes en S_1

P_a = Concentración parcial de aniones en S_1

P_c-dP_c = Concentración parcial de cationes en S_2

P_a-dP_a = Concentración parcial de aniones en S_2

Suponiendo un elemento de volumen entre los dos planos S_1 y S_2 , cuya sección transversal tiene un área S , cada ion-

en dicho volumen se encontrará sujeto a una fuerza osmótica la cual será proporcional al número de partículas individuales en dicho volumen, por lo que entonces se tiene:

En los cationes

$$F_{p,c} = \frac{((P_c - dP_c) - P_c)S}{CNn_c S dx} = - \frac{dP_c}{CNn_c dx} \quad \dots 43$$

De forma similar para los aniones

$$F_{p,a} = - \frac{dP_a}{CNn_a dx} \quad \dots 44$$

Donde

n_c, n_a = Número de cationes y aniones al ionizarse una molécula

N (número de avogadro) = 6.06×10^{23}

Como el potencial de difusión está relacionado al flujo iónico, es necesario evaluar el número de iones que fluyen a través del área transversal S , del volumen elemental en consideración bajo la acción de la fuerza osmótica.

Para los cationes

$$dn_{p,c} = \frac{eC}{FZ_c} CNn_c F_{p,c} S dt \quad \dots 45$$

$$dn_{p,c} = - \frac{eC}{F^2 Z_c} N \frac{dP_c}{dx} S dt \quad \dots 46$$

Para los aniones

$$dn_{p,a} = - \frac{e_a}{F^2 Z_a} N \frac{dP_a}{dx} S dt \quad \dots 47$$

F = Constante de Faraday

e = Carga ionica

Z = Valencia

ℓ_c, ℓ_a = Movilidades de cationes y aniones

Además de la fuerza osmótica, es necesario tomar en cuenta la fuerza electrostática de atracción entre los iones, así entonces:

$$F_{e,c} = - \frac{dE}{dx} Z_c e \quad \dots 48$$

$$F_{e,a} = \frac{dE}{dx} Z_a e \quad \dots 49$$

Donde E = Potencial eléctrico

De manera similar a las ecuaciones 46 y 47 se puede escribir:

Para los cationes

$$dn_{e,c} = - \left(\frac{\ell_c}{F} f_* CN n_c \frac{dE}{dx} S dt \right) \quad \dots 50$$

Para los aniones

$$dn_{e,a} = \frac{\ell_a}{F} f_* CN n_a \frac{dE}{dx} S dt \quad \dots 51$$

f_* = Actividad de cada ion en particular

Como las soluciones son eléctricamente neutras

$$Z_c e (dn_{p,c} + dn_{e,c}) = Z_a e (dn_{p,a} + dn_{e,a}) \quad \dots 52$$

Haciendo las substituciones y simplificaciones necesarias y despejando dE , se tiene:

$$dE = - \frac{1}{Ff_*C} \frac{\ell_c dP_c - \ell_a dP_a}{\ell_c Z_c n_c + \ell_a Z_a n_a} \quad \dots 53$$

Aplicando la Ley de Clapeyron, siempre y cuando que la -- concentración de los iones en difusión sea baja (Glasstone, 1969).

$$P_c = \frac{RT}{V} = RTn_c f_*C \quad \dots 54$$

$$P_a = \frac{RT}{V} = RTn_a f_*C \quad \dots 55$$

Donde V = Volumen de solución conteniendo un gramo mo-- lécula de sal.

Diferenciando 54 y 55

$$dP_c = RTn_c d(f_*C) \quad \dots 56$$

$$dP_a = RTn_a d(f_*C) \quad \dots 57$$

Substituyendo 56 y 57 en 53

$$dE = - \frac{RT}{F} \frac{\ell_c n_c - \ell_a n_a}{\ell_c Z_c n_c + \ell_a Z_a n_a} \frac{d(f_*C)}{f_*C} \quad \dots 58$$

Como el flujo de iones es de la solución concentrada a la diluida, la ecuación 58 puede ser integrada de la siguiente manera:

$$dE = - \frac{RT}{F} \frac{\ell_c n_c - \ell_a n_a}{\ell_c Z_c n_c + \ell_a Z_a n_a} f \frac{C_d f_{*d}}{C_c f_{*c}} \frac{d(f_{*c})}{f_{*c}} \quad \dots 59$$

$$E = \frac{RT}{F} \frac{\ell_c n_c - \ell_a n_a}{\ell_c Z_c n_c + \ell_a Z_a n_a} \text{Ln} \frac{f_{*c} C_c}{f_{*d} C_d} \quad \dots 60$$

f_{c*} = Actividad a la concentración C_c

f_{d*} = Actividad a la concentración C_d

La ecuación 60 permite calcular el voltaje que se desarrolla debido al fenómeno de difusión en la unión de dos soluciones de diferente salinidad.

En la figura 3 se ilustran dos medios en contacto y conteniendo soluciones diluidas ionizadas de diferentes concentraciones. Suponiendo, por el momento, que nada más contienen cloruro de sodio en solución en la forma de iones- Na^+ y Cl^- . (Hallenburg, 1971).

Separando los dos medios se encuentra una superficie permeable perpendicular a la dirección de difusión. En este caso los aniones tienen una movilidad más grande que los cationes. Por lo tanto, cuando la difusión tiene lugar se desarrolla un desbalanceo de cargas y entonces puede medirse un potencial a través de la unión, el cual será función de las concentraciones y actividades de los iones. Además que la conductividad de un electrolito es función de la concentración de iones, la ecuación 60 puede escribirse:

$$E = \frac{RT}{F} \frac{\ell_c n_c - \ell_a n_a}{\ell_c Z_c n_c + \ell_a Z_a n_a} \text{Ln} \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad \dots 61$$

Como tanto el Na^+ y el Cl^- son monovalentes

$$E = 2.3 \frac{RT}{F} \frac{\ell_c - \ell_a}{\ell_c + \ell_a} \text{ Log } \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad \dots 62$$

Donde

$$\begin{aligned} \rho_d &= \text{Resistividad de la solución diluida} \\ \rho_c &= \text{Resistividad de la solución concentrada} \\ \ell_{na^+} &= 43.5 \quad \text{cm}^2/\text{OHm} \\ \ell_{cl^-} &= 65.5 \quad \text{cm}^2/\text{OHm} \\ \Gamma &= 96500 \quad \text{coul/MOL} \\ T &= 25^\circ\text{C} + 273 = 298^\circ\text{K} \\ R &= 8.314 \quad (\text{Joules} / ^\circ\text{K MOLE}) \end{aligned}$$

Entonces para soluciones exclusivamente con NaCl

$$E = -11.8 \text{ Log } \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad [\text{milivolts}] \quad \dots 63$$

Se define K_D como el coeficiente de difusión de la siguiente forma:

$$K_D = 2.3 \frac{RT}{F} \frac{\ell_c n_c - \ell_a n_a}{\ell_c z_c n_c + \ell_a z_a n_a} \quad \dots 64$$

Otras sales tienen diferentes movilidades y consecuentemente tendrán diferentes coeficientes de difusión y potenciales. En la Tabla 1, se muestran los valores de movilidades y coeficientes de difusión para otras sales.

Resumiendo:

- 1ª. Se tendrá un potencial de difusión entre dos capas -- que tengan agua de diferente salinidad y entre el filtrado del lodo y el agua de formación, siempre y cuando haya contraste entre sus respectivas concentraciones.

2º. El potencial dependerá de las concentraciones relati-
vas de las sales.

3º. El potencial dependerá tanto en magnitud como en pola-
ridad de los tipos y movilidades de los iones.

1.3.-Potencial de Difusión-Adsorción

Los hermanos Schlumberger (Schlumberger C. y M. y Leonardon, en Mc Cardell et al., 1953) al observar que la curva de potencial del registro eléctrico, daba valores negativos para arenas limpias, con respecto a los valores de las arcillas, postularon como explicación a este hecho, que el potencial era la suma de un potencial de electrofiltración, el cual adquiriría un determinado valor dependiendo si se trataba de una arena o una lutita, y de un potencial "Electroquímico" de origen no determinado. Mounce y Rust (Mounce y Rust, 1944) demostraron que el potencial de electrofiltración es pequeño en muchos casos, y que el potencial se genera por un proceso en el cual la lutita y la diferencia en salinidades intervienen de manera esencial. Dickey, en el mismo año, (Dickey, 1944), concluyó que el potencial dependía de las propiedades de adsorción de las rocas del yacimiento.

Dakhnov (1962) señala que la diferencia en el potencial que se mide cuando se utiliza una arena limpia de grano grueso para separar dos soluciones que difieran en concentración por una relación de 10 a 1 y el calculado por la ecuación 63 para una simple unión de líquidos, es prácticamente insignificante, Fig. 4. Mientras que si en lugar de la arena, se utiliza una arcilla, la divergencia entre el potencial medido y el calculado por la ecuación 63 es grande.

La divergencia en los potenciales cuando la arcilla está presente se debe a la propiedad de su superficie de adsorber iones de la solución que la rodea. Esta propiedad no es exclusiva de la arcilla, sino de cualquier mineral

sólido. El por qué esta propiedad es más intensa en la ar
cilla se verá a continuación.

Se sabe que cualquier superficie de un sólido, contiene -
átomos en un estado diferente de aquéllos en el interior-
de su estructura. El campo de fuerza de átomos superficia
les o moléculas se utiliza únicamente en parte por otros-
componentes del sólido, por lo que todas las superficies-
del sólido exhiben una carga residual, la cual se balan-
cea por la atracción de partículas cargadas del medio que
la rodea, ésto es, las fuerzas desbalanceadas de la super
ficie del sólido deben ser balanceadas o satisfechas --
por la adsorción de iones de la solución.

Es por esto, que cuando un sólido (cristal, mineral comp
nente de roca, fragmentos coloidales de arcilla en la ro-
ca) y una solución se ponen en contacto, se genera un po-
tencial en la interfase debido a:

- a) La adsorción preferencial de iones específicos, de la-
solución a la superficie del sólido.
- b) La ionización de las moléculas superficiales del sólido.
- c) La estructura sólida en si misma puede tener una carga
determinada.

Para los minerales de arcilla las fuerzas desbalanceadas-
en la superficie pueden ser el resultado de: enlaces ro-
tos en la superficie, defectos en la estructura crystal
ina ó substitución isomorfa dentro de la estructura. (Robert
son, 1975)

La Fig. 5 ilustra la estructura cristalina de la arcilla montmorillonita, este dibujo muestra la estructura básica, la cual es eléctricamente neutra, excepto en los bordes de las partículas. De hecho en la naturaleza, esta estructura se altera levemente a causa de las diferentes substituciones, generalmente Mg y Fe por Al y algunas veces Al por Si. El efecto neto de esas substituciones, es dejar a la partícula de arcilla con una deficiencia en cargas positivas.

Por otra parte cuando un mineral de arcilla se pone en contacto con agua, las moléculas en la superficie del mineral se disocian en iones, esto es, los cationes ligeros tienden a pasar a la solución (Na^+ , K^+ , H^+ , ...), mientras que los aniones permanecen ligados a la superficie de la partícula.

Todo lo anterior trae como consecuencia que las arcillas tengan una carga negativa y que en orden de que obtengan el balance de carga requerido por la naturaleza de las partículas de arcilla, adsorban cationes (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , etc.) en sus superficies. Es por esto que se forma una capa de doble carga, una en el mineral sólido (carga superficial negativa) y la otra en el electrolito (cationes atraídos a la superficie sólida) Fig. 6. La partícula junto con la envoltura de agua que la rodea es electrostáticamente neutra, aunque el balance de carga completo no se alcanza sino hasta una cierta distancia de la partícula.

El potencial eléctrico en la superficie de la partícula está determinado por el número de iones adsorbidos por unidad de área superficial. Este potencial se puede cal-

cular termodinámicamente.

Observando la Fig. 6 se pueden diferenciar claramente 3-zonas en la vecindad que rodea a la partícula sólida cargada:

- 1.-Una zona hidrodinámicamente inmóvil, donde los cationes atraídos a la superficie están firmemente ligados, esta zona es llamada "capa fija".
- 2.-Un poco más separada de la superficie sólida, existe una zona llamada "capa difusa", donde todavía existe un exceso de iones positivos, pero el líquido está móvil.
- 3.-Una zona donde el líquido es eléctricamente neutro.

En base a la Fig. 6 se puede definir a la diferencia de potencial entre los límites interior y exterior de la capa difusa como el potencial zeta $[\zeta]$, esta definición será de utilidad más adelante. Si bien se ha presentado aquí un modelo simplificado de la doble capa, modelos -- más complicados se han propuesto, pero ayudarían poco a esta discusión (Grahame 1947, Adamson 1960).

Hasta aquí se podría decir que la presencia de material arcilloso en la roca causa desviaciones en las relaciones fisicoquímicas que existen en los materiales no arcillosos. Estas desviaciones son atribuidas a los fenómenos de adsorción en la superficie de la arcilla, lo cual implica una dependencia del área superficial de la misma. Ya que si bien los fenómenos de superficie (fenómeno de adsorción) se presentan siempre que existe una inter-

fase sólido-líquido, sus efectos se ponen de manifiesto - más ostensiblemente cuando la relación superficie/volumen de las partículas se eleva. Esto implica que el fenómeno de adsorción puede ocurrir en materiales de cuarzo de grano fino, en limolitas y mudstones además de en las arcillas de las lutitas.

El mecanismo de adsorción, si bien depende como se vió - arriba de las propiedades del sólido, también va a depender de los iones y concentraciones de éstos, que estando presentes en la solución que rodea a la fase sólida, - sean susceptibles de ser adsorbidos. De acuerdo con Hallenburt (1971) y Dakhnov (1962) existen 3 tipos de iones que están sujetos al proceso de adsorción:

- 1.-Iones los cuales son los mismos que los iones de los minerales sólidos en la roca, Fig. 7.
- 2.-Iones que pueden formar compuestos insolubles con los iones de los minerales, Fig. 8.
- 3.-Iones que a pesar de no estar relacionados con los iones en el mineral sólido, pueden ser adsorbidos a causa de su diferencia en valencia o tendencia a formar hidratos, Fig. 9.

Como resultado de la adsorción Dakhnov (op.cit) señala - lo siguiente:

- 1.-La composición del electrolito libre cambiará por pérdida de los iones atraídos en la doble capa.
- 2.-El campo eléctrico asociado con la doble capa puede -

alterar apreciablemente la difusión de los iones móviles.

Ya que la concentración de cationes en la doble capa sigue una distribución difusa en un estado de balance dinámico, entre las fuerzas coulombianas (debidas al campo eléctrico) y las fuerzas de difusión causadas por un gradiente de presión osmótica (Barlai, 1972), es por esto que el potencial desarrollado entre dos soluciones de diferente concentración en contacto dentro de la estructura porosa de la roca, será el resultado de un proceso de difusión y otro de adsorción, por eso de aquí en adelante se hará mención de dicho potencial, como potencial de difusión-adsorción [EDA], el cual está afectado por (Hallenburg, 1971, 1984; Dakhnov, 1962):

- 1.-La composición química de la matriz de la roca y la lutita o arcilla.
- 2.-La concentración y composición de las sales en el - - electrolito.
- 3.-El área superficial expuesta a el electrolito, lo que incluye:
 - a) El grado de saturación de la roca con el electrolito, Fig. 10.
 - b) La densidad de la roca, Fig. 11.
 - c) El tamaño del grano de la roca, Fig. 12.

Todos estos factores se pueden incluir en un sólo parámetro llamado coeficiente de difusión-adsorción [EDA], el-

cual está definido de la siguiente forma:

$$A_{DA} = f\left(\frac{S_o}{\phi S_w}, \zeta, C\right) \quad \dots 65$$

donde

- S_o = Es el área específica
- ϕ = Porosidad
- S_w = Saturación de agua
- C = Concentración
- ζ = Potencial zeta

La obtención de este parámetro y la expresión final del-SP considerando el fenómeno de difusión-adsorción, se verá a detalle en lo que sigue.

Siguiendo la hipótesis de B.U.Wendelstein (Dakhnov, 1961) el cual considera que únicamente la carga superficial de la doble capa altera el campo eléctrico total alrededor de los iones en difusión, se puede concluir que los io - nes en las partes centrales de los poros estarán afecta- dos por tres fuerzas, las cuales son:

- a) Presión osmótica (debida a los gradientes de concen- tración).
- b) Fuerzas electrostáticas (debidas a la separación de - cargas).
- c) Fuerza originada por el campo eléctrico creado por la doble capa de iones adsorbidos.

Considerando que:

- C_p = Concentración del agua de poro de la roca
- C_m = Concentración del agua en contacto con la- roca,

y que:

$$C_p > C_m$$

Por lo que la difusión será de la roca hacia la solución externa.

Se tiene entonces:

1.-Presión osmótica
para los cationes

$$f_{r,c} = - \frac{d r_c}{C N Y_c dx} \quad \dots 66$$

para los aniones

$$f_{r,a} = - \frac{d r_a}{C N Y_a dx} \quad \dots 67$$

2.-El campo eléctrico U causado por los iones adsorbidos

$$f_c^{(e)} = - \frac{dU}{dx} Z_c e \quad \dots 68$$

$$f_a^{(e)} = \frac{dU}{dx} Z_a e \quad \dots 69$$

Bajo la influencia de la presión osmótica los iones se difunden de la solución más concentrada a la de menor concentración, causando un cambio en la composición del electrolito libre, de tal forma que la concentración de aniones y cationes decrecen a fracciones q_a y $q_c = j q_a$ de la concentración original. De tal forma que el número de aniones y cationes que se difunden a través de un plano S, en un tiempo $d\tau$ bajo la influencia de la presión osmótica

esta dado por:

$$dn_{p,c} = -\frac{\ell_c}{F^2 Z_c} N \frac{dP_c}{dx} S d\tau \quad \dots 70$$

de la misma forma

$$dn_{p,a} = -\frac{\ell_a}{F^2 Z_a} N \frac{dP_a}{dx} S d\tau \quad \dots 71$$

donde

dP_c = Presión osmótica parcial para los cationes

dP_a = Presión osmótica parcial para los aniones

Por otra parte, si se aplicara un campo eléctrico externo E , el número de cationes y aniones que atravesarían la su superficie S en un tiempo $d\tau$ sería:

a) Cationes

$$dn_{e,c} = -\frac{\ell_c}{F} fC(1-q_c)N\gamma_c \frac{dE}{dx} S d\tau \quad \dots 72$$

b) Aniones

$$dn_{e,a} = \frac{\ell_a}{F} fC(1-q_a)N\gamma_a \frac{dE}{dx} S d\tau \quad \dots 73$$

en el equilibrio se tiene:

$$Z_c e (dn_{p,c} + dn_{e,c}) = Z_a e (dn_{p,a} + dn_{e,a}) \quad \dots 74$$

De aquí substituyendo e integrando se llega a la expresión:

$$E_{DA} = \frac{RT}{F} \frac{\ell_c \gamma_c (1-q_c) - \ell_a \gamma_a (1-q_a)}{\ell_c Z_c \gamma_c (1-q_c) + \ell_a Z_a \gamma_a (1-q_a)} \ln \frac{f_p C_p}{f_o C_o} \quad \dots 75$$

$$E_{DA} = 2.3 \left[\frac{RT}{F} \frac{\ell_c \gamma_c - \ell_a \gamma_a + \ell_c \gamma_c \ell_a \gamma_a (Z_a + Z_c) (q_a - q_c)}{\ell_c Z_c \gamma_c + \ell_a Z_a \gamma_a + (\ell_c Z_c \gamma_c + \ell_a Z_a \gamma_a) [\ell_c Z_c \gamma_c (1-q_c) + \ell_a Z_a \gamma_a (1-q_a)]} \right] \log \frac{f_p C_p}{f_o C_o} \quad \dots 76$$

que se puede escribir

$$E_{DA} = (K_D + A_{DA}) \log \frac{f_p C_p}{f_o C_o} \quad \dots 77$$

Donde f_p y C_p son los valores promedio para la actividad y la concentración del electrolito que llena los poros -- después de que la adsorción ha tenido lugar.

$$\text{Si } Z_c = Z_a \text{ y } \gamma_c = \gamma_a$$

$$A_{DA} = 4.6 \frac{RT}{ZF} \frac{\ell_c \ell_a (q_a - q_c)}{(\ell_c + \ell_a) [\ell_c + \ell_a - (\ell_c q_c + \ell_a q_a)]} \quad \dots 78$$

Como son adsorbidos mas cationes que aniones se tiene que

$$q_a \gg q_c$$

$$A_{DA} = 4.6 \frac{RT}{ZF} \frac{\ell_c \ell_a}{(\ell_c + \ell_a) [\ell_c + \ell_a (1-q_a)]} q_a \quad \dots 79$$

Si todos los cationes son adsorbidos y ninguno de los -- aniones

$$q_a = 1$$

$$A_{DA} = 4.6 \frac{RT}{ZF} \frac{\ell_a}{\ell_c + \ell_a} \quad \dots 80$$

Entonces

$$K_{DA} = K_D + A_{DA} = 2.3 \frac{RT}{ZF} \frac{\ell_c - \ell_a}{\ell_c + \ell_a} + \left(\frac{2\ell_a}{\ell_c + \ell_a} \right) \quad \dots 81$$

$$A_{DA} = 2.3 \frac{RT}{ZF} \quad \dots 82$$

Siendo A_{DA} el coeficiente de difusión-adsorción.

Freundlich (Dakhnov, 1962) propuso la siguiente relación entre los iones adsorbidos por unidad de área superficial y la concentración de iones en el electrolito.

$$a = \alpha \sqrt[\beta]{C} \quad \dots 83$$

donde

a = Iones adsorbidos por unidad de área

C = Concentración de iones en el electrolito

α, β = Parámetros que dependen de la química del electrodo y de la superficie sólida.

Definiendo la capacidad de adsorción específica como

$$q = \frac{\alpha S'}{C} \quad \dots 84$$

donde

S' = Área por unidad de volumen de electrolito

Por otra parte

$$S' = \frac{S_o}{W} = \frac{S_o}{\phi S_w} \quad \dots 85$$

Donde

S_w = Saturación de agua

ϕ = Porosidad

S_o = Superficie específica por unidad de volumen de roca

Sustituyendo

$$q = \alpha \frac{S_o}{\phi S_w} = \alpha \frac{S_o}{WC} \quad \dots 86$$

Si se substituye este valor de q en la expresión de A_{DA}

$$A_{DA} = 4.6 \frac{RT}{ZF} \frac{l_c l_a (1-j) \alpha S_o}{(l_c + l_a) \left[l_c + l_a \left(1 - \frac{S_o}{\left(\frac{\beta-1}{\beta} \right) WC} \right) \left(\frac{\beta-1}{\beta} \right) \right]} \quad \dots 87$$

Entonces para grados altos de adsorción, el coeficiente de actividad para los potenciales de difusión adsorción es una función directa de la superficie específica de una roca e inversa del contenido de agua. Por lo tanto, es posible estimar la porosidad y la arcillosidad de una roca utilizando mediciones de SP.

Además, como el SP (E_{DA}) de una roca es una función de su superficie específica y ya que la permeabilidad también lo es, sería posible estimar la permeabilidad a partir de mediciones de SP.

En la Tabla No.2 se muestran en orden decreciente de actividad de difusión adsorción diferentes tipos de rocas.

La actividad de difusión-adsorción define la cantidad en que los SP medidos diferirán de un simple potencial de unión de líquidos. Si el lodo de perforación es menos salino que el agua de formación, el SP opuesto a capas con valores altos de actividad de difusión-adsorción será positivo con respecto al SP opuesto a capas con bajos valores de actividad de difusión-adsorción.

Los potenciales de difusión-adsorción también se generan en los contactos entre diferentes tipos de rocas. La magnitud y la polaridad dependen de la mineralogía, textura de las rocas y la salinidad del agua de poro. Entonces se tiene que

$$E_{DA_{2-1}} = (K_D + A_{DA_1} + A_{DA_2}) \log \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad \dots 88$$

Donde se ha substituido a las concentraciones de las aguas de formación para las rocas en contacto, por sus respectivas resistividades.

1.4.-Potencial de Electrofiltración

Los fenómenos electrocinéticos han sido estudiados desde el siglo pasado hasta nuestros días, y es posible distinguir entre ellos 3 fenómenos distintos, los cuales son:

- 1.-Electro-Osmosis: fenómeno que consiste en el desplazamiento producido por la aplicación de una FEM, de un líquido con respecto a la superficie de un sólido.
- 2.-Electroforesis: se llama así al movimiento de un sólido en suspensión o partículas líquidas en un campo eléctrico.
- 3.-Potencial de Electrofiltración: Consiste en la producción de un campo eléctrico por el movimiento de un líquido conteniendo un sólido en suspensión o partículas líquidas.

Es este último el de interés desde el punto de vista del SP y, por lo tanto, el que se abordará en este trabajo.

En 1809, Reuss (Glasstone, op. cit.) observó un flujo de agua a través de un diafragma poroso en respuesta a una diferencia en potencial eléctrico aplicada entre las caras de dicho diafragma. Esta electro-osmosis sugiere que el flujo de un líquido a través de un medio permeable debería causar una diferencia detectable de potencial entre los extremos de las líneas de flujo. Tal potencial ha sido llamado potencial de flujo y fue observado por primera vez por Quincke en 1859 (Glasstone, op. cit.). El encontró que la diferencia de potencial en los extremos de un tubo capilar de vidrio, conteniendo una solución previamente

te seleccionada, era proporcional a la diferencia de presión entre los dos extremos. El fenómeno fue explicado -- por Helmholtz en 1879 (Glasstone, op.cit.) en términos de la doble capa, la cual, la consideró fija en la interfase sólido líquido y análoga a las dos placas de un condensador eléctrico, al potencial que existe entre las dos placas lo llamó potencial zeta (ζ). Posteriormente, Gouy en 1910 y Stern en 1924 (Glasstone, op.cit.) ampliaron la -- explicación de Helmholtz incluyendo una capa difusa de -- iones móviles.

En fin, el fenómeno del potencial de electrofiltración ha sido estudiado por muchos investigadores, pero, sin embargo, hasta este momento una serie de factores que influyen en el origen de este potencial permanecen sin aclararse.

En años más recientes la investigación sobre el potencial de electrofiltración se ha orientado hacia observar su dependencia de la porosidad y permeabilidad, así como de la diferencial de presión, composición iónica, concentración del electrolito y tamaño de grano del medio poroso (Hill y Anderson 1959, Gondouin y Scala 1958, Wyllie 1951, Gondouin et. al 1962, Schriever y Bleil 1957, Ahmad 1964, -- Ogilvy et. al 1969).

Como se ha mencionado anteriormente en la interfase sólido-líquido y en particular entre las partículas minerales y el agua de poro, se forma una doble capa iónica. El concepto más reciente es que la doble capa es difusa y parte de ésta, en la fase líquida, tiene la posibilidad de desplazarse junto con el líquido a medida que este último se mueva. Fig.13. Por este medio, es que una diferencia de potencial se crea. En la naturaleza las soluciones de agua con sales mono y divalentes son las que prevalecen, por -

lo que la parte inmóvil de la doble-capa ligada con la fase sólida usualmente tiene una carga negativa, mientras que la parte móvil la tiene positiva.

Las bases teóricas para el potencial de flujo, fueron desarrolladas por Helmholtz, quien consideró el flujo laminar y permanente de un líquido bajo una presión P , con una velocidad u , a través de un tubo capilar de sección circular con un radio r_0 y una longitud L . Si la resistividad del líquido es ρ y su viscosidad es ν , se tiene lo siguiente:

Para el cuerpo libre de la Fig. 14, el flujo es permanente, entonces cada una de las partículas se mueve hacia la derecha sin aceleración, por lo tanto, la suma de todas las fuerzas en la dirección X debe ser nula.

$$P_1(\pi r^2) - P_2(\pi r^2) - \tau(2\pi rL) = 0 \quad \dots 89$$

$$\tau = \frac{(P_1 - P_2)r}{2L} \quad \dots 90$$

En el caso de un flujo laminar la tensión cortante es

$$\tau = -\nu \left(\frac{du}{dr} \right) \quad \dots 91$$

igualando 90 y 91

$$-\nu \frac{du}{dr} = \frac{(P_1 - P_2)r}{2L} \quad \dots 92$$

despejando du e integrando y como $u=0$ cuando $r=r_0$

$$u = \frac{P_1 - P_2}{4\nu L} (r_0^2 - r^2) \quad \dots 93$$

Considerando las relaciones mostradas por la Fig. 15 donde la distancia δ es el espesor de la doble capa, se tiene lo siguiente

$$\begin{aligned} r_o &= a + \delta \\ r_o^2 &= a^2 + 2a\delta + \delta^2 \end{aligned} \quad \dots 94$$

Substituyendo 94 en 93

$$u = \frac{\Delta P}{4\nu L} (2a\delta + \delta^2) \quad \dots 95$$

Si se trata a la doble capa como un condensador cilíndrico, donde uno de los cilindros coaxiales tiene como radio a - y el otro r_o y separados por una distancia δ , se sigue

$$z = \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{L} \text{Ln} \left(\frac{r_o}{a} \right) \quad \dots 96$$

Donde z = Diferencia de potencial entre las placas
 q = Carga

Entonces la capacitancia será

$$C = \frac{q}{z} = 2\pi\epsilon \frac{L}{\text{Ln} \left(\frac{r_o}{a} \right)} \quad \dots 97$$

Por lo tanto

$$q = C z = 2\pi\epsilon \frac{L}{\text{Ln} \left(\frac{r_o}{a} \right)} z \quad \dots 98$$

Suponiendo una densidad de carga superficial σ_s en $r=a$

$$\sigma_s = \frac{q}{Aa}$$

$$Aa = 2\pi aL$$

$$\sigma_s = 2\pi\epsilon \frac{L}{\ln\left(\frac{r_o}{a}\right)} \zeta \frac{1}{2\pi aL}$$

$$\sigma_s = \frac{\zeta\epsilon}{a\ln\left(\frac{r_o}{a}\right)} \quad \dots 99$$

Como el líquido fluyendo a través del tubo capilar arrastra las cargas positivas de la doble capa formada en la pared del mismo, a una velocidad u , dada por 95. Por lo tanto existirá una densidad de corriente K superficial

$$K = \sigma_s u$$

$$K = \sigma_s \frac{\Delta P}{4\mu L} (2a\delta + \delta^2) \quad \dots 100$$

Entonces, la corriente I estará dada por

$$I = \int K \, d\ell \quad \dots 101$$

$$I = K2\pi a$$

$$I = \sigma_s \frac{\Delta P}{4\mu L} (2a\delta + \delta^2) 2\pi a$$

$$I = \frac{\sigma_s \Delta P}{2\mu L} (2a\delta + \delta^2) \pi a \quad \dots 102$$

El potencial de electrofiltración E_κ , que es creado por este flujo de carga, causa un flujo de corriente eléctrica en la dirección opuesta. Si la resistividad de la solución en el tubo capilar es ρ , Helmholtz propuso la siguiente relación

$$I' = \frac{E_\kappa \pi a^2}{\rho L} \quad \dots 103$$

En un estado estable

$$I = I'$$

$$\frac{\sigma_s \Delta P}{2\mu L} (2a\delta + \delta^2) a\pi = \frac{E_\kappa \pi a^2}{\rho L} \quad \dots 104$$

Despejando E_κ

$$E_\kappa = \frac{\sigma_s \Delta P (2a\delta + \delta^2) \rho}{2\mu a} \quad \dots 105$$

$$\frac{E_\kappa}{\Delta P} = \frac{\sigma_s (2a\delta + \delta^2) \rho}{2\mu a} \quad \dots 106$$

Substituyendo el valor de σ_s dado por 99

$$\frac{E_\kappa}{\Delta P} = \frac{(2a\delta + \delta^2) \rho}{2\mu a} \frac{\zeta c}{a \ln\left(\frac{r_o}{a}\right)} \quad \dots 107$$

Sin embargo $r_o = a + \delta$, entonces

$$\ln\left(\frac{r_o}{a}\right) = \ln\left(\frac{a + \delta}{a}\right) = \ln\left(1 + \frac{\delta}{a}\right) \quad \dots 108$$

Desarrollando 108 en serie de Taylor, se tiene

$$\ln\left(1 + \frac{\delta}{a}\right) = \frac{\delta}{a} - \frac{\delta^2}{2a^2} + \frac{\delta^3}{3a^3} - \dots (-1)^n \frac{\delta^n}{na^n} \quad \dots 109$$

Como δ es muy pequeño, se pueden despreciar los términos

$$\delta^n \approx 0 \quad ; \quad n \geq 2$$

Por lo tanto

$$\frac{E_{\kappa}}{\Delta P} = \frac{2\alpha\delta \rho \zeta \epsilon}{2\mu\alpha\left(\alpha\frac{\delta}{a}\right)}$$

$$\frac{E_{\kappa}}{\Delta P} = \frac{\rho \zeta \epsilon}{\mu} \quad \dots 110$$

Donde

E_{κ} = Potencial de Electrofiltración

ϵ = Constante Dieléctrica del fluido

ζ = Potencial Zeta

ΔP = Diferencial de presión

μ = Viscosidad del fluido.

Esta ecuación muestra que para un cierto tubo capilar y -- una cierta solución

$$\frac{E_{\kappa}}{\Delta P} = \text{Constante} \quad \dots 111$$

Esto es, el potencial de electrofiltración es directamente proporcional a la diferencial de presión e independiente - de la longitud o el área de la sección transversal del tu-bo capilar.

Glasstone (op. cit.), Dakhnov (op. cit.) y Lynch (op.cit.) llegan a una expresión similar a la de la ecuación 110. -- Sin embargo, su desarrollo no es riguroso, ya que en pri-- mer lugar suponen para el cálculo de la velocidad de flu-- jo, un modelo de un tubo capilar y en el momento de efec-- tuar los cálculos eléctricos, suponen uno constituido por-- un condensador de placas paralelas, sin dar alguna justifi-- cación válida y fundamentada para tal cambio.

Por otra parte, en medios porosos tales como las rocas, - las relaciones electrocinéticas son más complicadas que - en los tubos capilares. En este caso es esencial tomar en cuenta la composición granulométrica, la permeabilidad -- del medio, la forma y tortuosidad de los poros, su área - superficial libre y el espesor de las películas de agua - ligada. En fin, hasta este momento las investigaciones ex- perimentales, por la naturaleza de sus conclusiones acer- ca de la influencia de la litología y las propiedades del medio poroso en el valor del potencial de electrofiltra- ción son demasiado contradictorias.

Agapov (en Ogilvy et. al, 1969) encontró que para las are- nas $E_k/\Delta P$ es constante. Zucker (en Ahmad, 1964) obtuvo la- siguiente relación considerando un tubo cilíndrico relle- no de arena a través del cual fluye un líquido:

$$\zeta = - 1202.5 \frac{E_k}{\Delta P} \frac{d^2 L}{R (1-\phi^2) S^4} \quad \dots 112$$

Donde

- R = Resistencia en OHMS (tubo de flujo)
- ϕ = Porosidad
- S = Diámetro del tubo de flujo
- d = Diámetro de las partículas de arena
- L = Longitud del tubo

Si ζ se supone independiente del tamaño de grano, enton- ces el potencial de electrofiltración es inversamente pro- porcional a d^2 para un cierto tubo de longitud L siempre- que R sea constante. También como μ y ϵ son independien- tes del tamaño del grano $E_k/\Delta P$ es proporcional a ζ y por- lo tanto inversamente proporcional al área de la sección- transversal de los granos. Sin embargo, la variación de - E_k con S no ha sido verificada para una ζ constante.

Hill y Anderson (1959) en su estudio sobre el potencial de electrofiltración a través del enjarre, concluyeron lo siguiente;

- a) El potencial de electrofiltración para un medio fil -- trante de baja compresibilidad es una función lineal de la diferencial de presión.
- b) La presencia de minerales de arcilla en el medio fil -- trante para una cierta solución de electrolito dada, -- disminuye el potencial de electrofiltración para una cierta diferencial de presión dada.
- c) Los potenciales de electrofiltración a través de los enjarres, normalmente no son funciones lineales de la diferencial de presión.
- d) Cuando los enjarres son depositados en capas filtran -- tes que posean permeabilidades considerablemente más -- altas que la permeabilidad del enjarre, serán observa -- dos potenciales de electrofiltración de enjarre norma -- les.
- e) Cuando los enjarres son depositados en capas filtran -- tes que tengan bajas permeabilidades (0.1 md. o menos); parte de la caída de presión ocurre en la capa filtran -- te y el potencial de electrofiltración resultante será la combinación del potencial generado para la capa fil -- trante y el del enjarre.

Con estas generalizaciones se pueden reconocer condicio -- nes que pueden resultar en potenciales de electrofiltra -- ción anormalmente grandes o bajos, cuando se esté tomando un registro SP en un pozo.

Willie (1951) propuso la relación para E_K a través del -- enjarre

$$E_{K_{mc}} = K_1 (\Delta P)^y \quad \dots 113$$

Donde $0.57 \leq y \leq 0.90$

K_1 = Constante que depende de la resistividad del lodo.

Gondouin y Scala (1958), Gondouin et al (1962) y Hill y Anderson (1959) demuestran y confirman la existencia de E_K a través de las lutitas. Gondouin y Scala proponen la relación siguiente:

$$E_{K_{SH}} = K_2 \Delta P \quad \dots 114$$

Donde

$E_{K_{SH}}$ = Potencial de electrofiltración a través de -- las lutitas.

$$K_2 \approx 0.018 (Rmf)^{1/3}$$

Ahmad (1964) reportó la dependencia de $E_K/\Delta P$ del tamaño -- de grano y derivó una relación aproximada

$$\frac{E_K}{\Delta P} = \frac{1}{d^2} \quad \dots 115$$

d = Diámetro de grano

Así también, tratando de encontrar una relación entre E_K y la permeabilidad, propuso la siguiente relación empírica (Figura 16):

$$\frac{E_K}{\Delta P} = 0.119 K^{-0.077} \quad \dots 116$$

K = Permeabilidad

La cual muestra que un decremento en la permeabilidad lleva a un incremento en la relación $E_K/\Delta P$.

En la ecuación 100 se puede observar que de los cinco pa-rámetros involucrados, tres son siempre positivos (ρ, ϵ, μ). Por lo tanto, como señala Dakhnov (op.cit.), solamente -- la presión o el potencial zeta pueden controlar la polaridad de E_K . Ya que el potencial zeta depende de la salinidad de la solución y de la composición de la sal disuelta, puede decirse que E_K es función también de la composición -- química de la solución, Fig. 17.

Es importante mencionar que los parámetros $\rho, \epsilon, \tau, \mu$, incluídos en la ecuación del potencial de electrofiltración, exhiben valores anómalos para soluciones que llenan tubos capilares muy delgados (Ogilvy, et al. 1969). Si se considera que el radio del tubo capilar es más pequeño o con -mesurable con el espesor de la capa difusa, entonces la -doble capa difusa no se desarrollaría completamente y la interacción de las cargas llevaría a una compresión de la misma, lo que traería en consecuencia un decremento del -valor del potencial τ .

En la Fig. 18, se muestra la relación entre $E_K/\Delta P$ y la -- permeabilidad de una arena para diferentes concentraciones de NaCl. La relación observada podría expresarse de -la siguiente manera: con un incremento en la permeabili -dad, empezando de 20 Darcy, la relación $E_K/\Delta P$ crece y al -

canza un máximo cuando la permeabilidad está entre 60 y 70 Darcy. Un incremento posterior en la permeabilidad reduce la relación $E_K/\Delta P$, hasta que esta alcanza un valor constante. Esto puede explicarse (Dakhnov, op. cit.) por el hecho de que relativamente poca carga es adsorbida por unidad de volumen poroso cuando los poros son grandes, y por el hecho de que en rocas con alta permeabilidad, el flujo del fluido puede ser turbulento, reduciendo por lo tanto el valor de E_K .

Hasta este momento la investigación del potencial de flujo lleva a las siguientes conclusiones:

- a) Existen discrepancias en las investigaciones llevadas a cabo en laboratorio por diversos investigadores, debidas en parte a que hacen sus observaciones en medios porosos con diámetros de poro totalmente diferentes, y también a que la técnica de medición es difícil, ya -- que obstáculos de naturaleza eléctrica los cuales no están asociados al potencial de flujo aparecen cuando se trata de medir este último (efectos "motoeléctricos" asociados con los electrodos de medición).
- b) Existe una dependencia del potencial de electrofiltración con la permeabilidad, si bien hasta el momento no se ha presentado una relación teórica, la utilización del potencial de electrofiltración para la obtención de la permeabilidad es promisoría (Chandler R.N., 1984).

1.5.-Potencial de oxidación-reducción

Los potenciales de oxidación-reducción que se miden en registros geofísicos de pozos, están asociados con las reacciones de oxidación-reducción que pueden tomar lugar en las rocas. Puede decirse que el potencial de oxidación-reducción (ORP, Potencial Redox o E_h) es una medida de la tendencia de las especies químicas en solución iónica para cambiar su estado de oxidación o reducción. Es también una medida cuantitativa de la tendencia de un sistema redox de evolucionar hacia un estado oxidado o reducido.

Las reacciones químicas que se desarrollan en las rocas involucran la transferencia de electrones y protones. Esto es, de cargas eléctricas que dependen ya sea del PH (actividad protónica), de el E_h (actividad electrónica) o de ambos y del sistema en el cual las reacciones estén tomando lugar.

A partir de consideraciones de equilibrio termodinámico, el potencial redox que se mide en una solución que contenga diversas especies iónicas en diferentes estados de oxidación estará dado por la siguiente ecuación:

$$E_h = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}} \quad \dots 117$$

Siempre que la reacción que determina el potencial sea



Donde

E_h = Potencial redox del sistema, referido a el electrodo normal de hidrógeno.

E_0 = Potencial redox del sistema, en condiciones estandar ($a_{Ox} = a_{Red} = 1$, $25^\circ C$)

R = Constante universal de los gases

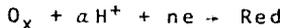
T = Temperatura en $^\circ K$

n = Número de electrones involucrados en la reacción.

F = Constante de Faraday

a_{Ox} , a_{Red} = Actividades de las especies oxidadas y reducidas respectivamente.

Si la reacción que determina el potencial involucra protones:



Entonces el potencial redox del sistema puede establecerse como:

$$E_h = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Red}} - \frac{aRT}{nF} 2.3 \text{ pH} \quad \dots 118$$

Puede señalarse que la oxidación es equivalente a una pérdida neta de electrones por la substancia que está siendo oxidada y la reducción es equivalente a una ganancia neta de electrones por la substancia que está siendo reducida. Por lo tanto una reacción redox involucra la transferencia de electrones. Es por esto que, la habilidad de un sistema para oxidarse o reducirse, puede expresarse como la habilidad para dar o recibir electrones. Dicha habilidad puede ser medida a través de medir el potencial (E_h) de un electrodo de metal inerte inmerso en una solución que contenga dicho sistema. Cuando un electrodo inerte (oro o platino) se sumerge en un sistema redox, termodinámicamente reversible, se genera un potencial, el cual

es característico del sistema. Dicho potencial puede medirse fácilmente por un potenciómetro, como la diferencia de potencial entre el electrodo inerte y un electrodo estandar de referencia, el cual es el electrodo de hidrógeno, de ahí que se le llame E_h al potencial redox.

Es importante señalar los siguientes puntos:

- a) El potencial redox de una solución depende únicamente de la relación (Ox/Red) y no es afectado por la adición de sales neutras ionizadas tales como el cloruro de sodio.
- b) Todas las reacciones redox consisten en la remoción - de electrones de la substancia que esta siendo oxidada y ya que un sistema debe permanecer eléctricamente neutro, toda oxidación va acompañada de una reducción. Por lo tanto, todas las reacciones de óxido-reducción consisten esencialmente en un intercambio de electrones entre los oxidantes y los reductores contenidos - en el mismo sistema. Es por esto que el estudio cuantitativo del proceso redox se lleva a cabo a través - de medir diferencias de potencial eléctrico.

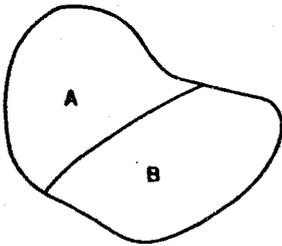


Fig. 1.- A y B representan dos componentes.
(Reynolds, et al., 1980)

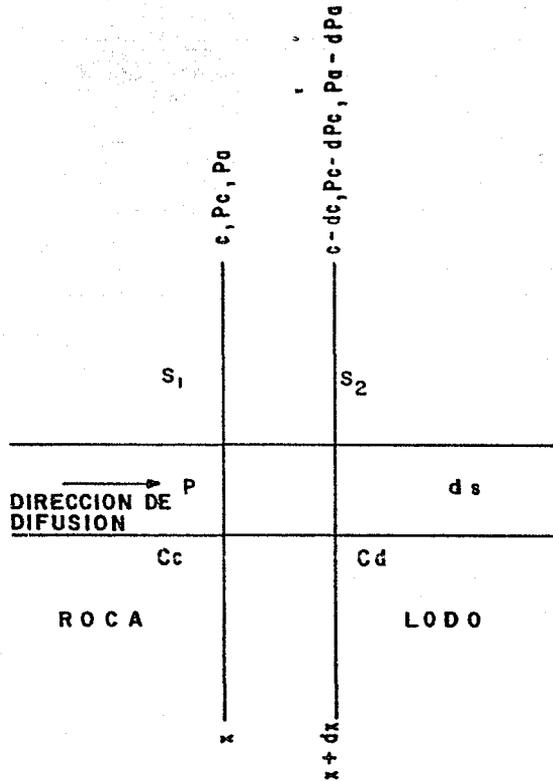


Fig. 2.- Modelo propuesto por Dakhnov para la discusión teórica del potencial de difusión.
(Dakhnov, V. N., 1962)

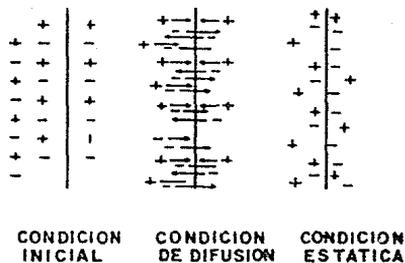


Fig. 3.-Dos medios en contacto y conteniendo soluciones diluidas ionizadas de diferentes concentraciones.
(Hallenburg, J. K., 1971)

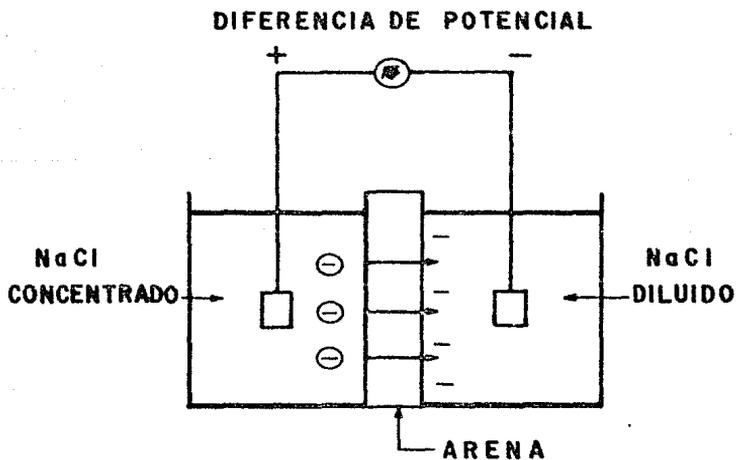


Fig. 4.-Generación del potencial de unión de líquidos utilizando arena para separar las soluciones.
(Serra, O., 1984)

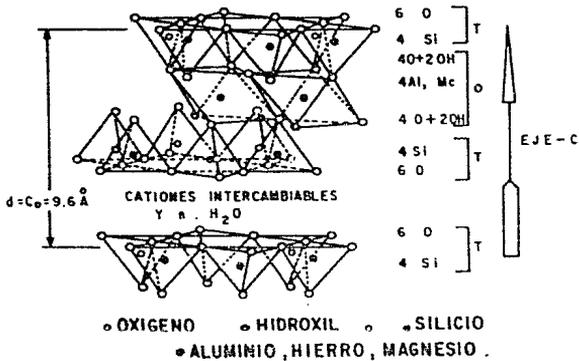


Fig. 5.-Dibujo diagramático de la estructura de la smectita, grupo de la montmorillonita.

T= Tetrahedros de silicio

O= Capa octahedral

(Robertson, J. O., 1975)

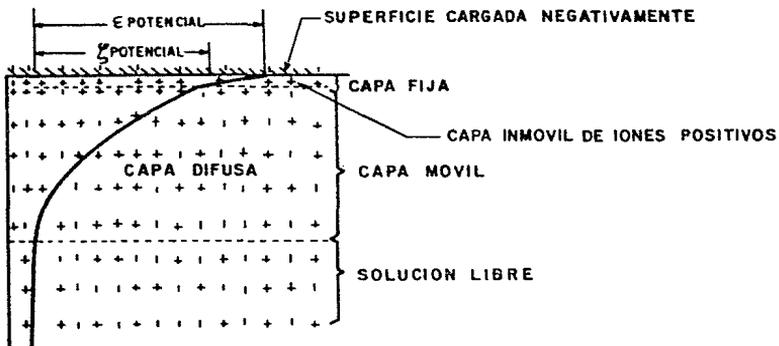


Fig. 6.-Distribución del agua absorbida en una partícula de arcilla. la distribución de los iones y la localización del potencial ψ y ζ , se muestran esquemáticamente.
 (Robertson, J. O., 1975)

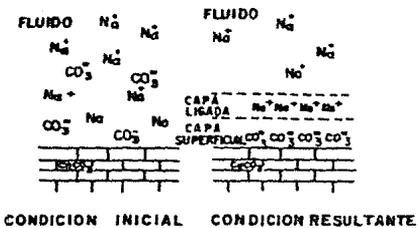


Fig. 7.-Adsorción de iones iguales a los de los minerales sólidos en la roca. (Hallenburg, J. K., 1971)

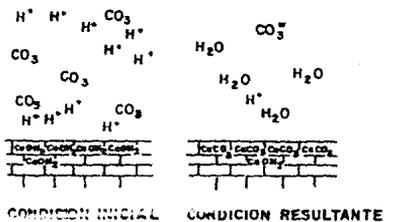


Fig. 8.-Adsorción de iones que pueden formar compuestos insolubles con los iones de los minerales. (Hallenburg, J. K., 1971)

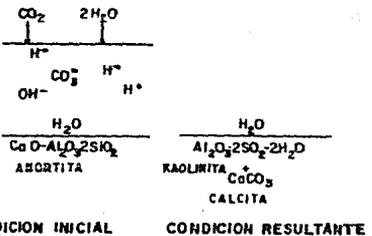
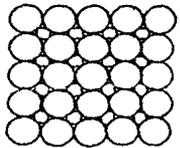


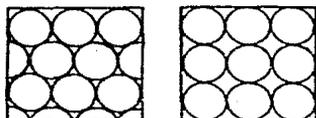
Fig. 9.-Adsorción de iones no relacionados a los del mineral sólido, pero que son adsorbidos por su tendencia a formar hidratos. (Hallenburg, J. K., 1971)



SATURACION DE UNA ROCA CON ELECTROLITO

Fig. 10.-El grado de saturación con electrolito de una roca es un factor que influye en el área superficial expuesta al electrolito. (Hallenburg, J. K., 1971)

DENSIDAD ALTA DENSIDAD BAJA



RELACION SUPERFICIE AREA 10.5:9

Fig. 11.-A menor densidad de la roca mayor área superficial es expuesta al electrolito.
(Hallenburg, J. K., 1971)



RELACION SUPERFICIE AREA 1:5.5

Fig. 12.-A menor tamaño de grano mayor área superficial es expuesta al electrolito.
(Hallenburg, J. K., 1971)

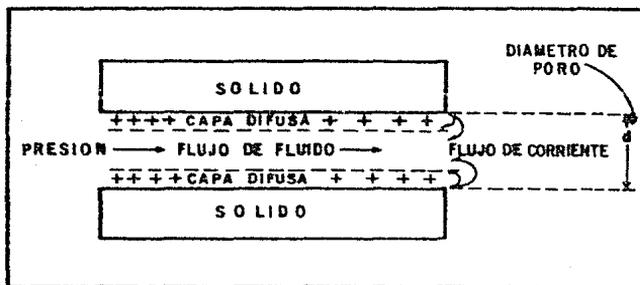


Fig. 13.-Generación del potencial de electrofiltración en un poro cilíndrico por medio de la aplicación de una presión diferencial a través del poro.
(Serra, O., 1984)

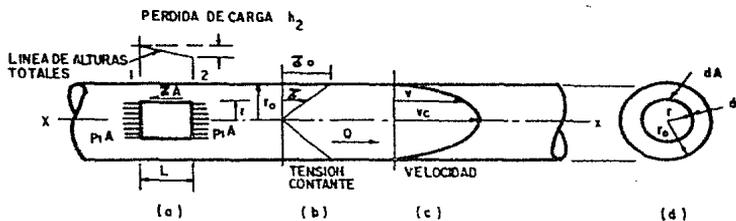


Fig. 14.-Diagrama de cuerpo libre que ilustra los parámetros -
empleados en la obtención de la expresión teórica del
potencial de electrofiltración.
(Giles, D., 1969)

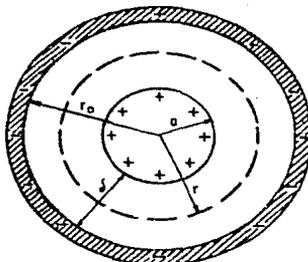


Fig. 15.-Condensador cilíndrico
Se ilustran los parámetros empleados
en el cálculo de E_K
 r_0 = Radio del tubo capilar
 δ = Espesor de la doble capa
 $a = r_0 - \delta$

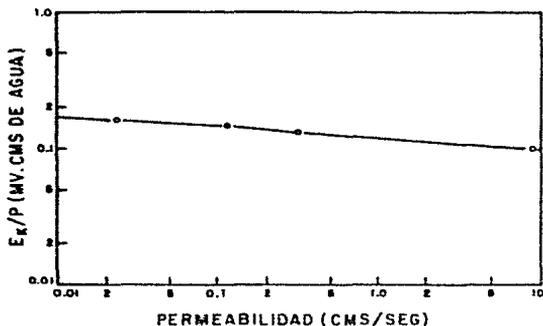


Fig. 16.-Potencial de electrofiltración por unidad de diferencia de presión, en función de la permeabilidad para arenas in consolidadas.
(Ahmad, M. U., 1964)

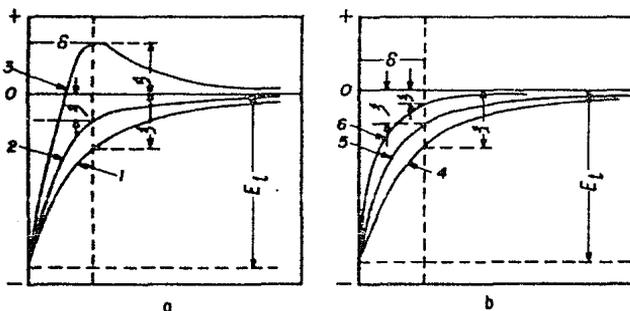


Fig. 17.-Variación del potencial a partir de una superficie sólida en la cual han sido adsorbidos iones.

- a) Curvas para iones adsorbidos de diferentes valencias
 1. Cationes monovalentes
 2. Cationes divalentes
 3. Cationes tetravalentes
 - b) Curvas para electrolitos con diferentes concentraciones
 4. Concentración muy baja de iones monovalentes
 5. Concentración moderada de iones monovalentes
 6. Concentración alta de iones monovalentes
- (Dakhnov, V.N., 1962)

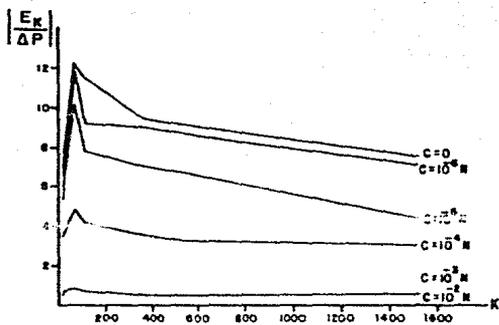


Fig. 18.- $E_{\kappa}/\Delta P$ como función de la permeabilidad para agua destilada y soluciones de -- NaCl.

(Ogilvy, A.A., et al., 1969)

T A B L A I

CARACTERISTICAS DE DIFUSION PARA DIFERENTES SALES

SAL	CATION	ANION	SOLUCIONES DILUIDAS					A CONCENTRACION DE 0.1 M.				
			MOBILIDAD cm ² /ohm		$\frac{u_+}{u_-}$	$\frac{u_+}{u_+ + u_-}$	mV K _D			$\frac{u_+}{u_+ + u_-}$	$\frac{u_+}{u_+ + u_-}$	mV K _D
			CATION	ANION				CATION	ANION			
NaCl	Na	Cl	43.5	65.5	-0.202	-11.8	34.25	55.5	-0.209	-12.7		
KCl	K	Cl	64.6	65.5	-0.069	-0.4	55.0	55.5	-0.0025	-0.1		
CaCl ₂	Ca	Cl	51.6	65.5	-0.339	-19.6	31.5	55.5	-0.457	-26.4		
MgCl	Mg	Cl	45.0	65.5	-0.389	-22.5	27.5	55.5	-0.503	-29.1		
Na ₂ SO ₄	Na	1/2SO ₄	43.5	67.9	0.86	5.0	36.25	40.0	0.213	12.3		
K ₂ SO ₄	K	1/2SO ₄	64.5	67.9	0.231	13.4	55.0	40.0	0.368	21.3		
CaSO ₄	1/2Ca	1/2SO ₄	51.6	67.9	-0.136	-7.9	31.5	40.0	-0.119	-6.9		
MgSO ₄	1/2Mg	1/2SO ₄	45.0	67.9	-0.203	-11.7	27.25	40.0	-0.185	-10.7		
NaHCO ₃	Na	HCO ₃	43.5	40.7	-0.078	2.2	—	—	—	—		
Na ₂ CO ₃	Na	1/2CO ₃	43.5	60.0	0.13	7.5	36.25	38.0	0.282	13.5		
K ₂ CO ₃	K	1/2CO ₃	64.6	60.0	0.27	16.0	55.0	38.0	0.387	22.4		
Ca(HCO ₃) ₂	1/2Ca	HCO ₃	51.6	46.7	-0.212	-12.3	—	—	—	—		
CaCO ₃	1/2Ca	1/2CO ₃	51.6	60.0	-0.076	-4.4	31.5	38.0	-0.0935	-5.4		
Mg(HCO ₃) ₂	1/2Mg	HCO ₃	45.0	46.7	-0.284	-15.2	—	—	—	—		
MgCO ₃	1/2Mg	1/2CO ₃	45.0	60.0	-0.143	-8.3	27.5	38.0	0.16	9.3		
H ₂ SO ₄	H	SO ₄	345	67.9	0.734	42.4	—	—	—	—		
HCl	H	Cl	345	65.5	0.56	37.9	—	—	0.665	38.3		
H ₂ S	H	HS	345	76.2	0.762	44.0	—	—	—	—		
H ₂ CO ₃	H	HCO ₃	345	46.7	0.806	46.6	—	—	—	—		
NaOH	Na	OH	43.5	174	0.600	34.7	—	—	—	—		

TABLA II
COEFICIENTES DE DIFUSION - ADSORCION A_{DA} PARA ALGUNAS
ROCAS SEDIMENTARIAS

TIPO DE ROCA	A_{DA} (m v)		
ARENAS LIMPIAS Y ARENISCAS POBREMENTE CEMENTADAS	- 5	a	+ 5
ARENISCAS PROMEDIO CON PEQUEÑAS CANTIDADES DE ARCILLA	2	a	10
ARENISCAS CEMENTADAS CON PEQUEÑAS CANTIDADES DE ARCILLA	7	a	- 20
ARENISCAS CEMENTADAS CON CARBONATO	5	a	15
CAPAS ROJAS ARENOSAS	0	a	10
CAPAS ROJAS ARCILLOSAS	5	a	20
LUTITAS	20	a	70
CALIZAS LIMPIAS	- 7	a	+ 5
CALIZAS (DE 2 A 10% DE ARCILLA)	- 5	a	+ 15
CALIZAS ARCILLOSAS (10 A 30 % DE ARCILLA)	10	a	40
MARGAS	20	a	70
DOLOMIAS ARCILLOSAS	20	a	55

CAPITULO II

II.1 MODELO ELEMENTAL PARA GENERAR UN REGISTRO DE POTENCIAL NATURAL

Para desarrollar una expresión teórica que permita conocer la variación del potencial espontáneo a lo largo del eje - de un pozo, hay que tener en cuenta los siguientes factores que lo afectan:

- 1.-La FEM involucrada
- 2.-El espesor de la capa
- 3.-La resistividad de la capa
- 4.-La resistividad de las capas adyacentes
- 5.-La resistividad del lodo
- 6.-El diámetro del agujero
- 7.-La profundidad de penetración del filtrado del lodo dentro de la capa permeable.

En la Figura 1 se muestra la geometría del modelo propuesto por Dakhnov (op. cit.), el cual tiene simetría radial y en el que se han hecho las siguientes suposiciones:

- a) Todas las resistividades involucradas son iguales.
- b) Todos los mecanismos generadores de potencial están presentes.
- c) Las capas arriba y abajo de la capa de interés son de espesor infinito.

Considerando que en cada interfase se forma una doble capa

eléctrica, el potencial en cualquier punto M fuera de la--
capa será la suma algebraica de los potenciales causados--
por cada una de las dobles capas.

$$\Delta U_{Sp} = U_{12} + U_{23} + U_{01} + U_{02} + U_{03} \quad \dots 1$$

Siguiendo el desarrollo de Dakhnov (op. cit.) se tiene lo--
siguiente:

$$U = \frac{\omega}{4\pi} E \quad \dots 2$$

donde

ω = Es el ángulo sólido trazado a partir
del punto M por los límites de la do
ble capa

E = Diferencia de potencial a través de--
la doble capa

De acuerdo a la Fig. 1, y usando coordenadas cilíndricas

$$U_{Sp} = \frac{2\pi - \omega_p}{4\pi} p E_{21} + \frac{2\pi - \omega_q}{4\pi} q E_{23} + \frac{4\pi - \omega}{4\pi} p E_{01} + \frac{\omega_p - \omega_q}{4\pi} E_{02} + \frac{\omega}{4\pi} E_{03} \quad \dots 3$$

donde

$$\omega_p = 2\pi \left[1 - \frac{z - h/2}{\left[\left(z - \frac{h}{2} \right)^2 + \left(\frac{r}{2} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \quad \dots 4$$

$$\omega_q = \pi 2 \left[1 - \frac{z + h/2}{\left[\left(z + \frac{h}{2} \right)^2 + \left(\frac{r}{2} \right)^2 \right]^{1/2}} \right] \quad \dots 5$$

$$U_{sp} = \frac{1}{2} E_q G(2z+h) - \frac{1}{2} E_p G(2z-h) + E_0 \quad \dots 10$$

En puntos lejanos a la capa, es decir si $z \rightarrow \infty$ se tendrá

$$U_{sp} = E_0 \quad \dots 11$$

De esta forma el potencial anómalo generado por la capa -- permeable y medido por el electrodo M al pasar frente a -- ella, estará dado por:

$$\Delta U_{sp} = U_{sp} - E_0 = - \left[\frac{1}{2} E_q G(2z+h) - \frac{1}{2} E_p G(2z-h) \right] \quad \dots 12$$

$$\Delta U_{sp} = \frac{1}{2} E_p G(2z-h) - \frac{1}{2} E_q G(2z+h) \quad \dots 13$$

Para un diámetro de agujero infinitamente pequeño, la función $G(z)$ es igual al signo (+1) del argumento. En este límite el potencial será igual a:

$$\frac{E_p - E_q}{2} \quad \text{para} \quad z > \frac{h}{2} \quad \dots 14$$

$$- \frac{(E_p - E_q)}{2} \quad \text{para} \quad -\frac{h}{2} < z < \frac{h}{2} \quad \dots 15$$

$$\frac{E_q - E_p}{2} \quad \text{para} \quad z < -\frac{h}{2} \quad \dots 16$$

Si se impone la condición

$$E_p = E_q = E \quad \dots 17$$

Se tendría que el potencial sería igual a cero frente a -- las capas de lutita (por 14 y 16) y frente a la capa permeable igual a $-E$ (por 15), que es la llamada FEM estática que representa las contribuciones de cada uno de los mecanismos de potencial espontáneo en la capa permeable.

Muchas discusiones sobre la interpretación del registro SP suponen la condición expresada por 17, basándose en que comúnmente la lutita arriba y abajo de la capa permeable -- presenta las mismas características* (Doll, op. cit.; Hallenb. op. cit), aunque algunas veces en la realidad no siempre es así. Este hecho se observa en algunos registros SP que presentan una desviación en la línea base de lutitas (Fig.2).

Entonces la ecuación 17 implica que:

$$E_{21} = E_{23} \quad ; \quad E_{01} = E_{03} \quad \dots 18$$

normalizando con respecto al diámetro del pozo r , la ecuación 6 se convierte en:

$$U_{sp} = \left[\frac{2z_r + h_r}{[(2z_r + h_r)^2 + 1]^{\frac{1}{2}}} - \frac{2z_r - h_r}{[(2z_r - h_r)^2 + 1]^{\frac{1}{2}}} \right] \frac{E_{21} - E_{01} + E_{02} + E_{01}}{2} \quad \dots 19$$

$$U_{sp} = F(z_r, h_r) \frac{E_{21} - E_{01} + E_{02} + E_{01}}{2} \quad \dots 20$$

en puntos lejanos a la capa permeable

$$U_{sp} = E_{01} \quad \dots 21$$

ya que

* Fisicoquímicas

$$F(z_r, h_r) \rightarrow 0 \quad \dots 22$$

$$z \rightarrow \infty$$

igual que antes se tiene

$$\Delta U_{sp} = U_{sp} - E_{01} = -F(z_r, h_r) \frac{E_{01} - E_{02} - E_{21}}{2} \quad \dots 23$$

pero la ecuación 18 implica que $E_p = E_q$, entonces

$$\Delta U_{sp} = -F(z_r, h_r) E_s \quad \dots 24$$

donde E_s es la FEM estática que se mencionó anteriormente. En la Figura 3, se muestra la gráfica de la ecuación 23 -- cuando $E_{01} = E_{03}$ y $E_{01} = \frac{1}{2} E_{03}$.

Derivando la ecuación 23 con respecto a z , e igualando a - cero, se encuentra su valor extremo

$$\frac{\partial F}{\partial z} = 2 \left[\frac{1}{[(2z_r + h_r)^2 + 1]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{[(2z_r - h_r)^2 + 1]^{\frac{3}{2}}} \right] = 0 \quad \dots 25$$

ecuación que se satisface sólo si $z_r = 0$, lo que en la Figura 1, equivale al punto medio de la capa permeable. Dicho punto extremo será un máximo o un mínimo, dependiendo de - la polaridad de E_s . Entonces para un máximo se tendrá - que:

$$\max \Delta U_{sp} = \frac{h_r}{(h_r + 1)^{\frac{1}{2}}} (E_{01} - E_{02} - E_{21}) \quad \dots 26$$

Si en lugar de sustituir $z_r = 0$, se sustituye $z_r = \pm \frac{h_r}{2}$, se - tiene entonces el SP en los límites de la capa

$$1_c \Delta U_{sp} = - \frac{h_r}{(4h_r + 1)^{\frac{1}{2}}} E_s \quad \dots 27$$

Observando que la ecuación 23 es simétrica respecto al -- origen, y que precisamente en éste se encuentra su máximo, utilizando la ecuación 27 se encuentra la relación del SP en el límite de la capa y el SP en la parte media de la -- misma (máximo en $z=0$).

$$\frac{I_c \Delta U_{SP}}{\max \Delta U_{SP}} = \frac{\sqrt{h_r^2 + 1}}{\sqrt{4h_r^2 + 1}} \quad \dots 28$$

De aquí que si $h \gg r$, la anomalía SP en los límites de la -- capa será la mitad que la anomalía en la parte media de -- la misma. Este hecho es de importancia ya que permite mar -- car los límites de capa en un registro SP en los puntos -- donde la deflexión sea media de la deflexión máxima.

Por otra parte, si se integra la ecuación 23 para obtener el área bajo la curva de la anomalía SP, se tiene:

$$A = 2 \frac{E_s}{2} \int_0^{\infty} F(z_r, h_r) dz_r = E_s h_r \quad \dots 29$$

Este resultado implica que si conocemos de una manera pre -- cisa el espesor de la capa, podremos conocer E_s y a tra -- vés del coeficiente de difusión-adsorción poder inferir-- la litología.

Es importante señalar que el modelo desarrollado cumple -- con las observaciones y consideraciones hechas por Doll -- (op. cit.) para una curva de SP en un medio homogéneo, -- las cuales se escriben a continuación:

- a) La deflexión máxima de la curva SP ocurre en el punto -- medio de la capa permeable.

- b) Si $h \gg r$, por la ecuación 26 la deflexión máxima del SP se aproxima a la FEM estática E_s (Fig. 4).
- c) Los cambios en la línea base de lutitas que señala -- Doll, el modelo los contempla si se considera $E_p \neq E_q$ ($E_{21} \neq E_{23}$, $E_{01} \neq E_{03}$) (Fig. 3).
- d) Doll hace hincapié en que el efecto del diámetro del agujero no debe tomarse aislado sino en relación al espesor de la capa, es decir, debe considerarse la relación del espesor de la capa al diámetro del agujero. Esto se toma en cuenta en el modelo al efectuarse la normalización respecto a r .
- e) El modelo justifica lo mencionado por Doll respecto a la utilización del área bajo la curva SP.

II.2. RESPUESTA DEL REGISTRO SP EXPRESADA COMO UNA CONVOLUCION

Un registro geofísico de pozo se puede definir como la suma de varias componentes individuales, siendo cada una el resultado de un impulso generado por cierta característica de la formación. Bajo esta perspectiva el problema que se plantea es en términos de separar e identificar cada una de las componentes del registro y las condiciones por las cuales son causadas. Un método utilizado para determinar las componentes de una señal, es el análisis de Fourier, el cual permite definir las componentes individuales de la señal como sinusoides en función de frecuencia y fase -- (Arroyo, 1981).

En el inciso anterior se encontró una expresión del SP para un modelo simplificado en donde todas las resistividades son iguales y las únicas variables que entran en el problema son el espesor de la capa h , el diámetro de agujero r y desde luego las fuerzas electromotrices E_p y E_q -- (ecuación 6). Este modelo tiene una solución cerrada que puede expresarse en forma de una operación de convolución. Existen, como señala Nosal (Nosal, 1982) dos razones importantes para realizar esto:

- 1.-Separar la contribución individual de la herramienta y de la formación.
- 2.-Situar al registro SP dentro del contexto matemático del análisis de señales.

Siguiendo a Nosal (op. cit.), tomando la ecuación 13

$$\therefore U_{Sp}(z) = \frac{1}{2} E_p G(2z-h) - \frac{1}{2} E_q G(2z+h) \quad \dots 13$$

Tomando la transformada de Fourier de 19 y considerando -- que $g(\omega)$ es la TF de $G(z)$

$$u(\omega) = \frac{1}{2} g\left(\frac{\omega}{2}\right) [E_p e^{-\frac{i\omega h}{2}} - E_q e^{\frac{i\omega h}{2}}] \quad \dots 30$$

Como $G(z)$ es real y de simetría impar

$$g(\omega) = -i2 \int_0^\infty G(z) \text{sen } \omega z \, dz \quad \dots 31$$

$$g(\omega) = -i2r K_1(r\omega) \quad \dots 32$$

donde

K_1 = Función de Bessel de primer orden y segunda clase

r = Diámetro del agujero

Aunque la ecuación 32 está definida sólo para frecuencias-positivas, la solución para todas las frecuencias puede establecerse, ya que se sabe que $g(\omega)$ debe ser tanto imaginaria como impar, puesto que $G(z)$ es real y de simetría-impar, entonces la transformada completa de $U_{sp}(z)$ estará dada por:

$$u(\omega) = -i\frac{r}{2} \text{SGN}(\omega) K_1\left(\frac{r|\omega|}{2}\right) [E_p e^{-\frac{i\omega h}{2}} - E_q e^{\frac{i\omega h}{2}}] \quad \dots 33$$

Si se toma el límite de la ecuación 33 cuando $\omega \rightarrow 0$ y -- $E_p = E_q = E_s$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} u(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left[-i\frac{r}{2} \text{SGN}(\omega) K_1\left(\frac{r|\omega|}{2}\right) [E_p e^{-\frac{i\omega h}{2}} - E_q e^{\frac{i\omega h}{2}}] \right] \quad \dots 34$$

ya que

$$\lim_{x \rightarrow 0} K_1(x) = \frac{1}{x} \quad \dots 35$$

$$\begin{aligned}
 u(\omega) &= -i \frac{r}{2} E_s \left(\frac{2}{r\omega} \right) [e^{-i\frac{\omega h}{2}} - e^{i\frac{\omega h}{2}}] \quad \dots 36 \\
 &= -i \frac{E_s}{\omega} [e^{-i\frac{\omega h}{2}} - e^{i\frac{\omega h}{2}}] \\
 &= 2 \frac{E_s}{\omega} [\text{sen } \frac{\omega h}{2}]
 \end{aligned}$$

como

$$\text{sen } \frac{\omega h}{2} \approx \frac{\omega h}{2}$$

entonces

$$u(\omega) = 2 \frac{E_s}{\omega} \left[\frac{\omega h}{2} \right] = E_s h \quad \dots 37$$

que es el área bajo la curva.

Visto de otra manera, si la definición de TF es:

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(z) e^{-i\omega z} dz \quad \dots 38$$

si $\omega=0$, la integral se convierte en

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(z) dz$$

y por la ecuación 29, se sabe que dicha integral es igual a $E_s h$

La ecuación 33 se puede considerar como el producto de dos funciones, ya que h y r aparecen separadas, una la función de la formación:

$$S(\omega) = E_p e^{-i\frac{\omega h}{2}} - E_q e^{i\frac{\omega h}{2}} \quad \dots 39$$

y la otra, la función de transferencia de la herramienta:

$$\ell(\omega) = -i \frac{r}{2} \text{SGN}(\omega) K_1 \left(\frac{r|\omega|}{2} \right) \quad \dots 40$$

Apoyándose en el teorema de convolución y utilizando a la-- transformada de Fourier, en el dominio de la frecuencia, la TF de la señal registrada es igual a la multiplicación de la TF de la señal proveniente de la formación por la función de transferencia de la sonda.

$$u(\omega) = \ell(\omega) \cdot S(\omega) \quad \dots 41$$

encontrando las inversas de $\ell(\omega)$ y $S(\omega)$, se tiene que

$$S(z) = E_p \delta(z - \frac{h}{2}) - E_q \delta(z + \frac{h}{2}) \quad \dots 42$$

y

$$\ell(z) = \frac{z}{[(2z)^2 + r^2]^{1/2}} \quad \dots 43$$

Considerando la sección de pozo presentada en la Fig. 1, - la cual presenta dos unidades homogéneas, se tendrán dos - impulsos, uno positivo y otro negativo, entonces al pasar - la herramienta por la primera interfase, recibirá un impul - so y al detectar la segunda, el impulso será en sentido -- contrario, regresando a las condiciones originales.

Se puede considerar entonces, que la curva registrada es - igual a la convolución de la función de transferencia de - la sonda con la secuencia de impulsos provenientes de las - unidades litológicas, Fig. 5.

Tomando el límite cuando $r \rightarrow 0$ en la ecuación 40

$$\lim_{r \rightarrow 0} \ell(\omega) = \lim_{r \rightarrow 0} \left[-i \frac{r}{2} \text{SGN}(\omega) K_1 \left(\frac{r|\omega|}{2} \right) \right] \quad \dots 44$$

por la ecuación 35 se tiene

$$\ell(\omega) = -i \frac{r}{2} \left(\frac{2}{r|\omega|} \right) = -\frac{i}{\omega} \quad \dots 45$$

$$\ell(\omega) = \frac{1}{i\omega} \quad \dots 46$$

como

$$F\left(\int f(z) dz\right) = \frac{F(\omega)}{i\omega} \quad \dots 47$$

Entonces en el límite cuando $r \rightarrow 0$, la herramienta se comporta como un integrador.

Generalizando, para una capa permeable situada en cualquier posición arbitraria Z_i , con un espesor h_i y FEM estáticas E_{p_i} y E_{q_i} , se designará como $S_i(z)$ su respectiva función impulsiva. Considerando un diámetro de pozo constante a través de N formaciones, se podrá modelar el registro SP a través de la expresión siguiente:

$$U(z) = L(z) + \sum S_i(z) \quad \dots 48$$

En la Fig. 6 se muestra una comparación entre el espectro de la respuesta de la herramienta de un registro real obtenido a través de una técnica estimativa propuesta por Branisa (Branisa F., 1974) y $\ell(\omega)$; de lo cual Nosal (op. cit.) concluye que si bien el modelo se construyó a través de considerar un medio homogéneo, esto es, que todas las resistividades fueran iguales; las correcciones para contrastes reales de resistividad son mucho mas pequeñas que la dinámica expresada por $\ell(\omega)$.

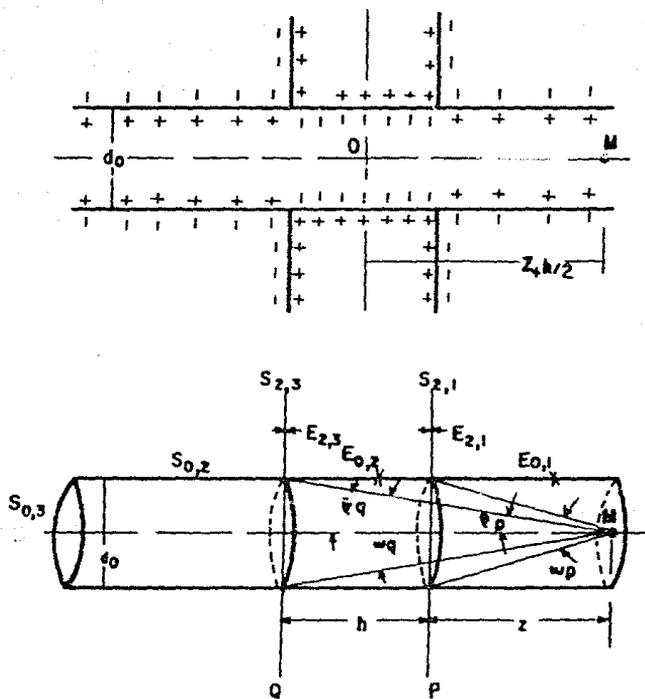


Fig. 1.-Modelo usado para calcular la curva de potencial natural a lo largo de un pozo.
(Dakhnov, W.N., 1962)

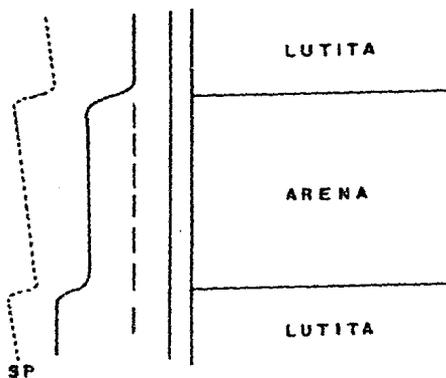


Fig. 2.-Cambio en la línea base de lutitas en un registro SP.
(Pied, B., 1966)

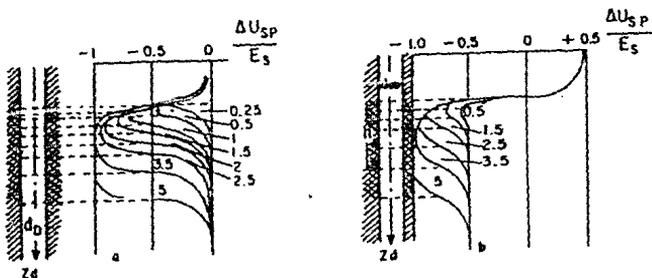


Fig. 3.-Curvas teóricas de la variación de $\Delta U_{SP}/E_s$ a través de una capa delgada.

a. $E_{01} = E_{03}$

b. $E_{01} = 0.5 E_{03}$

(Dakhnov, V.N., 1962)

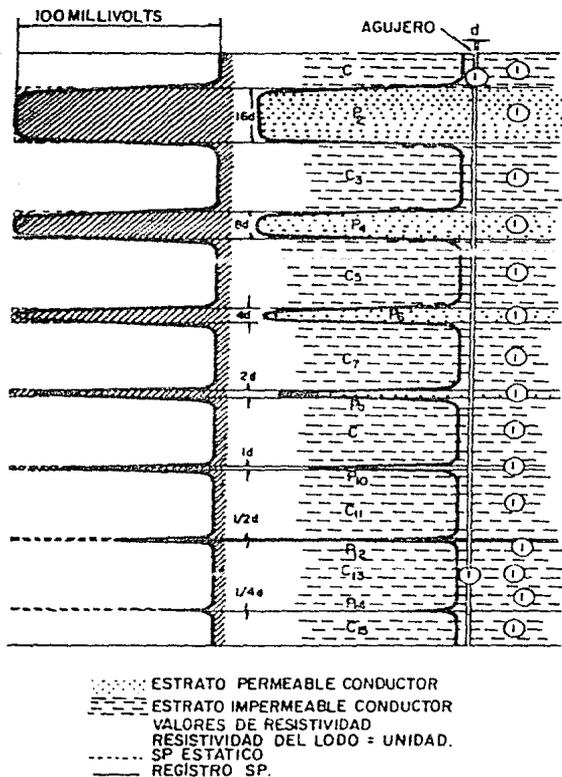


Fig. 4.-Curva SP para diferentes espesores de capas permeables ($R_t = R_m$)

(Doll, H. G., 1948)

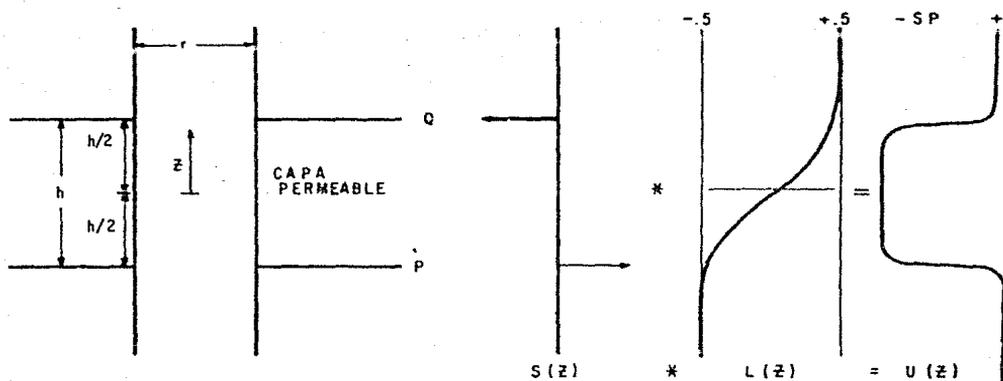


Fig. 5.-La curva SP registrada es igual a la convolución de la función de transferencia de la sonda con la secuencia de impulsos provenientes de las unidades litológicas.

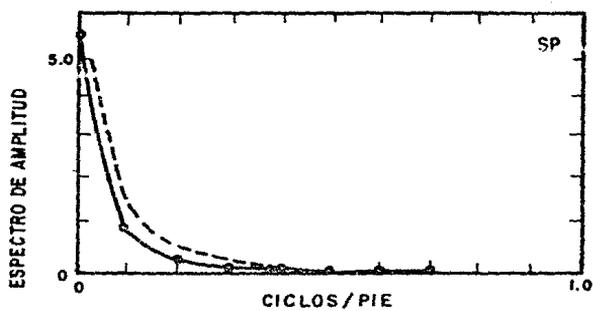


Fig. 6.-Espectro de amplitud suavizado de una curva SP obtenido por Branisa (1974) mostrado por la línea continua. La línea discontinua es la curva generada por la Ec. 40. (Nosal, E.A., 1982)

CAPITULO III

EMPLEO DEL REGISTRO DE POTENCIAL NATURAL

Para formaciones limpias, la saturación de agua se estima por:

$$S_w = \left(\frac{R_w}{\phi^m R_t} \right)^{1/n} \quad \dots 1$$

donde

S_w = Saturación de agua en % de volumen de poro

R_w = Resistividad del agua de formación

ϕ = Porosidad

R_t = Resistividad verdadera de la formación

n = Exponente de saturación

m = Exponente de cementación

Gael, B.T. (Silva, 1981) ha señalado la sensibilidad de la ecuación I respecto a variaciones en el valor de R_w , diciendo que una sobreestimación de R_w tenderá a dar una sobreestimación de S_w , además observa que, puesto que el rango de R_w (0.2 - 0.02) es mayor que el rango típico -- del exponente de saturación (1.5 - 2.5), la R_w debe ser determinada con más precisión que el exponente. Esto hace que la resistividad del agua de formación (R_w) sea un parámetro de interpretación muy importante en la estimación de la saturación de agua, que es uno de los fines esenciales en la interpretación de registros geofísicos de pozos.

Cuando se dispone de muestras de agua, R_w se determina ya sea a partir de su medición directa o calculada a partir del análisis químico. Sin embargo es más práctico es

timar R_w a partir del registro SP.

En 1949 Wyllie (Wyllie, 1949), sugirió que la R_w podía obtenerse del registro SP a partir de la ecuación

$$SP = -K \log \frac{\alpha_w}{\alpha_{mf}} \quad \dots 2$$

donde

SP = Deflexión SP del registro en mv, corregida por espesor de capa y otros factores ambientales de medición.

α_w = Actividad del agua de formación [$\frac{\text{gr-ión}}{\text{litró}}$]

α_{mf} = Actividad del filtrado del lodo [$\frac{\text{gr-ión}}{\text{litró}}$]

K = Coeficiente que depende de la temperatura de la formación ($K = 61 + 0.133 T$, T. en °F)

Suponiendo que las aguas de formación y el filtrado del lodo fueran soluciones puras diluidas de NaCl y apoyándose en los resultados experimentales de la Figura 1 que permitan relacionar la actividad con la resistividad, propuso para determinar R_w la ecuación:

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad \dots 3$$

Puesto que en realidad en muchas zonas, las aguas de formación no son soluciones diluidas de NaCl, la ecuación 3 proporciona valores erróneos de R_w , ya que como se observa en la Figura 1 para valores de R_w menores de 0.1 OHm-m, la resistividad ya no se comporta de la forma

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w} \quad \dots 4$$

Para salvar este problema, Gondouin, Tixier y Simard -- (Gondouin, et al., 1957) introdujeron el concepto de re-

sistividad equivalente, la cual fue definida como la extrapolación de la porción recta de la curva, de tal forma que $(R_w)_e$ es por consiguiente proporcional al recíproco de la actividad

$$(R_w)_e = \frac{A}{a_w} \quad \dots 5$$

donde A es la constante de proporcionalidad elegida de esta forma que

$$(R_w)_e = R_w \quad \dots 6$$

Para soluciones puras de NaCl de resistividades mayores a 0.3 OHM-m.

De acuerdo a la definición de resistividad equivalente, la ecuación 2 puede escribirse

$$SP = -K \log \frac{R_{mfe}}{R_{we}} \quad \dots 7$$

donde

R_{mfe} = Resistividad equivalente del filtrado delgado.

R_{we} = Resistividad equivalente del agua de formación

La relación entre R_w y $(R_w)_e$ está dada por la gráfica experimental presentada por Gondouin et al. (Gondouin, et al., 1957) Fig. 2.

Cabe señalar que el concepto de resistividad equivalente, constituye la base del "Método Schlumberger" para estimar R_w a partir del registro SP.

El "Método Schlumberger" para la obtención de R_w a partir del SP consiste de los siguientes pasos (Hilchie, -- 1978):

- 1.-Determinar la línea base de lutitas en el registro SP.
- 2.-Localizar las zonas permeables.
- 3.-Tomar el valor del SP de la zona de interés a partir de la línea base de lutitas (máxima deflexión).
- 4.-Determinar la temperatura de formación y calcular K a partir de $K = \frac{(61 + 0.33 T, T \text{ en } ^\circ F)}{(64 + .23 T, T \text{ en } ^\circ C)}$
- 5.-Determinar el espesor de la capa a partir de los puntos de inflexión de la curva.

- 6.-Corregir R_{mf} a temperatura de formación

$$R_{mf} = R_{mf} \frac{(T_1 + 7)}{(T_2 + 7)} \quad \dots 8$$

T en °F

- 7.-Corregir la lectura SP por espesor de capa si es necesario.

$$SSP = SP \times 10^P$$

$$x = a + b \log (R_i/R_m) + c \log (\text{Espesor}) \quad \dots 9$$

$$P = 10^x$$

$$a = - 0.4183$$

$$b = 0.4831$$

$$c = 1.3920$$

- 8.-Si R_{mf} es menor que 0.1 corregir a $(R_{mf})_e$ utilizando la gráfica de la Fig. 2.
- 9.-Resolver la ecuación 7 para $(R_w)_e$
- 10.-Convertir $(R_w)_e$ a R_w utilizando la gráfica de la Fig.2.

Es relativamente común encontrar discrepancias en las R_w calculadas a partir del SP a través del "Método Schlum

berger" y aquellas obtenidas de análisis químicos, en algunos casos tales discrepancias son atribuidas a la no representatividad de las muestras de agua obtenidas del pozo, sin embargo aún cuando se disponga de muestras con fiables las discrepancias persisten (Silva, 1981; Silva y Bassiouni, 1981; Silva, 1983).

Tales discrepancias pudieran ser el resultado de una o ambas de las suposiciones que están implícitas en la ecuación 7, las cuales son las siguientes: (Silva y Bassiouni, 1981).

- 1.- Tanto el agua de formación como el filtrado del lodo se consideran como soluciones puras de NaCl.
- 2.- El cociente de las actividades iónicas es considerado igual al cociente de resistividades

$$\frac{(a_{Na})_w}{(a_{Na})_{mf}} = \frac{R_{mf}}{R_w} = \frac{(R_{mf})_e}{(R_w)_e} \quad \dots 10$$

- 3.- La lutita es una membrana catiónica perfecta, esto es, aquella membrana que solo adsorbe cationes.

Esta última suposición esta presente en la ecuación 7 -- puesto que K sólo depende de la temperatura, ver la ecuación 82 del Capítulo I que se obtuvo al suponer que sólo los cationes son adsorbidos (el valor de K en ambas ecuaciones es el mismo).

Para salvar dichas discrepancias, el primer paso se dió en el sentido de obtener una expresión para el SP en donde se considerarán otras sales además del cloruro de sodio (NaCl). Ya que estrictamente hablando, las solucio--

nes involucradas en la generación del SP no son soluciones puras de NaCl, ahora bien, que tanto en una solución impura de NaCl se comportará como una solución "pura" és to dependerá del tipo y cantidad de otros iones presentes en el agua.

Gondouin y colaboradores (Gondouin et al. 1957) trataron el caso de soluciones de mezclas de cloruros de calcio, magnesio y sodio, y observaron lo siguiente: cuando la salinidad es baja, la presencia de Ca^{++} y Mg^{++} afecta -- más al SP que los iones de Na^+ . Por otro lado, para soluciones de alta salinidad la concentración de iones divalentes es relativamente pequeña comparada con la concentración de cationes, y sus efectos son prácticamente negligibles.

Si bien el efecto de otras sales diferentes del NaCl en el SP constituye un problema muy complejo, Gondouin y colaboradores encontraron que la actividad total del agua considerando los efectos del Ca^{++} y del Mg^{++} podía ser descrita por la siguiente relación:

$$a_T = a_{\text{Na}} + \sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}} \quad \dots 11$$

Donde

$$\sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}} = \text{Corrección debida a la presencia de calcio y magnesio.}$$

De tal forma que una ecuación más precisa para el SP para soluciones que contengan otras sales además del NaCl, puede escribirse como

$$\text{SP} = -K \log \frac{(a_{\text{Na}} + \sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}})_w}{(a_{\text{Na}} + \sqrt{a_{\text{Ca}} + a_{\text{Mg}}})_{mf}} \quad \dots 12$$

Donde

a_{Na} = Actividad iónica del Na

a_{Ca} = Actividad iónica del Ca

a_{Mg} = Actividad iónica del Mg

Si las concentraciones del Na, Ca y Mg son conocidas, entonces se puede utilizar la gráfica de la Fig. 3, para determinar la actividad total a_T de una determinada solución. Como se dijo anteriormente, para incluir el efecto de otras sales además del $NaCl$ y obtener una expresión en función de términos más familiares (resistividades), Gondouin y colaboradores introdujeron el concepto de resistividad equivalente como función de la actividad total del agua.

Tratando de encontrar una relación más precisa entre la actividad total y la resistividad, Silva (Silva, 1981) llegó a la siguiente expresión, después de haber graficado a_T contra las R_w de diferentes muestras, las cuales eran soluciones predominantemente de $NaCl$ con concentraciones limitadas en otras sales.

$$(a_T)_w = \frac{a}{R_w b} \quad \dots 13$$

Donde los coeficientes a y b reflejan la composición de las muestras consideradas. De la misma forma, una expresión similar puede desarrollarse para el filtrado del lodo, siempre y cuando se cuente con análisis químicos del filtrado.

Usando el resultado anterior, la ecuación 2 puede escri-

birse de la siguiente forma:

$$SP = - K \log \alpha \frac{R_m^\beta}{R_w^\gamma} \quad \dots 14$$

Pedro Silva (Silva y Bassiouni, 1981) encontró que los valores α , β y γ son prácticamente iguales a uno (1.008, 1 y 1.07, respectivamente) por lo que la ecuación 14 puede reducirse a:

$$SP = - K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad \dots 15$$

para los casos siguientes:

- 1.-Para aguas de formación y filtrados de lodo que sean soluciones predominantemente de NaCl , siempre y cuando el Ca y el Mg estén presentes en cantidades limitadas.
- 2.-Para aguas de formación donde el NaCl predomine en ausencia de análisis químico del filtrado de lodo.

Debe notarse que la ecuación anterior fue usada antes de la introducción del concepto de resistividad equivalente por parte de Gondouin en 1956.

Sin embargo, los resultados de R_w obtenidos de la ecuación 14 tienen aún una correlación muy pobre con los valores de R_w obtenidos a partir de análisis químicos, Ver Fig.4 (según correlaciones obtenidas por Silva y Bassiouni); lo que hace pensar, que si bien uno de los problemas para obtener R_w del SP es el considerar que las soluciones son soluciones puras de NaCl , no es éste el problema fundamental.

Es importante notar que la ecuación 14 aún supone que --

las lutitas se comportan como membranas catiónicas ideales, mientras que mediciones hechas en laboratorio de -- muestran que las lutitas no se comportan como membranas ideales.

Como se vió en el Capítulo I, el coeficiente K para membranas no ideales, ésto es K_{DA} , depende de muchos parámetros relacionados con las características de intercambio catiónico de las lutitas. Desafortunadamente, dichos parámetros difícilmente se pueden obtener, por lo que es necesario encontrar una propiedad eléctrica de las lutitas, la cual sea de fácil medición y que refleje las características de membrana de la lutita, a la cual poder relacionar K .

La única propiedad eléctrica fácilmente disponible es la resistividad, la cual se puede obtener de cualquier registro eléctrico. Aunque ninguna relación precisa ha podido ser inferida entre la resistividad de la lutita -- (R_{SH}) y K , se ha podido observar que para un valor fijo de R_{SH} , el valor de K tiende a incrementarse a medida -- que: R_{mf} decrece y la lectura SP crece (Silva y Bassiouni, 1981).

En la Fig. 5, Silva y Bassiouni (op. cit.) presentan una gráfica de R_{SH}/R_{mf} contra K , de la cual se observa que -- para un valor constante de R_{SH}/R_{mf} , K tiende a crecer a medida que la lectura SP crece. Así mismo, se comprueba que K no sólo depende de la temperatura sino del medio -- de medición, como se vió en el Capítulo I, en el cual se aprecia la dificultad de obtener una expresión para K , -- debido a las muchas incógnitas involucradas.

Sin embargo, existe un parámetro que refleja todas las -- variables posibles que controlan el fenómeno SP y que es

tá disponible de los registros. Tal parámetro es, desde luego, la misma lectura SP.

Silva (op. cit.) encontró que cuando graficaba la relación R_{mf}/R_w contra la relación R_{SH}/R_{mf} , Fig.6, para cada valor del SP, se obtenía una relación bien definida. En la Fig. 7 se presenta una forma más práctica para la interpretación en donde R_{mf}/R_w se grafica contra la lectura SP como función de diferentes valores de R_{SH}/R_{mf} . Si se compara la gráfica de interpretación comúnmente usada, Fig. 8, con esta nueva correlación, se puede observar lo siguiente: para lecturas SP altas (formaciones limpias) ambas correlaciones tienden a dar los mismos valores de R_w , mientras que para lecturas bajas los valores de R_w difieren substancialmente. Esta diferencia pudiera explicar las fallas del "Método Schlumberger" en formaciones arcillosas.

Basado en los conceptos anteriores, Pedro Silva propone la siguiente técnica para el cálculo de R_w (Silva, 1981).

- 1.-A partir del registro SP determinar la máxima deflexión
 - 2.-Calcular la temperatura de la formación de interés
 - 3.-Obtener R_{mf}
 - 4.-Determinar R_{SH} de la lutita adyacente
 - 5.-Determinar las relaciones R_{SH}/R_{mf} y R_{mf}/R_w
 - 6.-Corregir el valor SP por espesor de capa si es necesario
 - 7.-A partir de la gráfica de la Fig. 7 obtener R_w
- En los trabajos de Silva y Bassiouni se puede apreciar -

las ventajas de esta nueva técnica sobre el "Método -- - Schlumberger", ya que los valores obtenidos en R_w obtenidos a través de ésta, logran una mejor correlación con los obtenidos a partir de análisis químicos. Esto es de esperarse ya que al tomar en cuenta el comportamiento de membrana no-ideal de las lutitas, ésta nueva técnica es congruente con los conceptos expuestos en el Capítulo I, que gobiernan el fenómeno del SP.

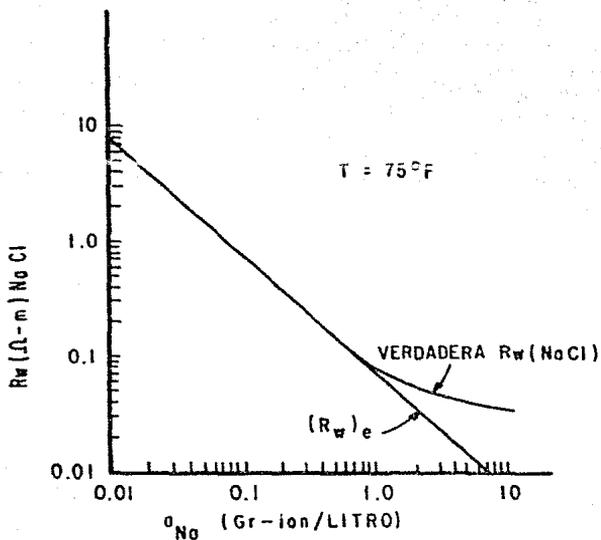


Fig. 1.-Definición del término de resistividad de - -
agua equivalente.

(Gondouin, M., et al., 1957)

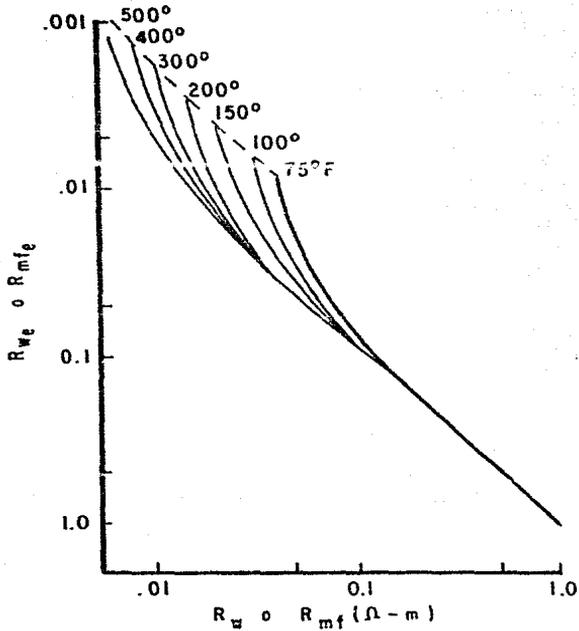


Fig. 2.-Relación entre las resistividades reales y - equivalentes para aguas de formación y fil - trados de lodo.

(Gondouin, M., et al., 1957)

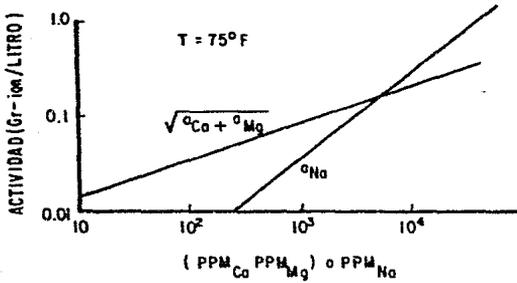


Fig. 3.-Concentración de Na, Ca y Mg en función de la actividad.

(Schlumberger, 1972)

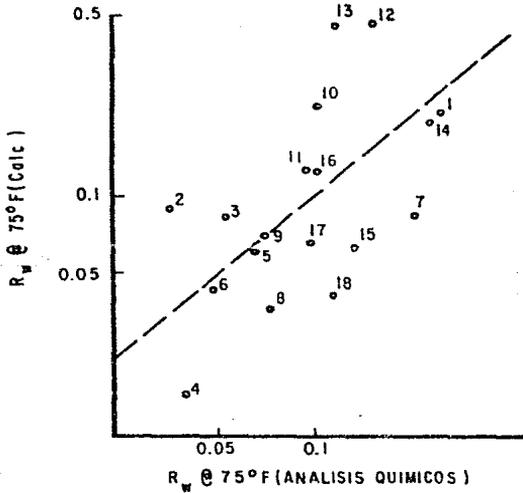


Fig. 4.-Comparación de los valores de R_w obtenidos con la ec. 14 y los obtenidos a partir de análisis químicos.

(Silva y Bassiouni, 1981)

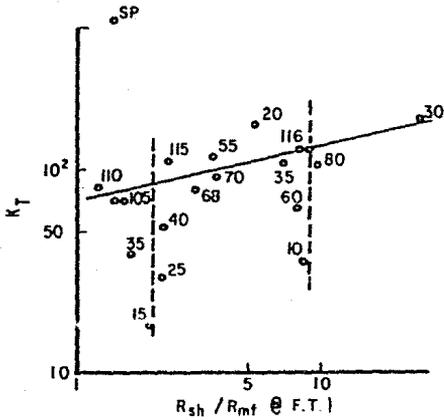


Fig. 5. - K_T en función de la relación R_{sh}/R_{mf} @ F.T. y el valor de SP.
(Silva y Bassfouni, 1981)

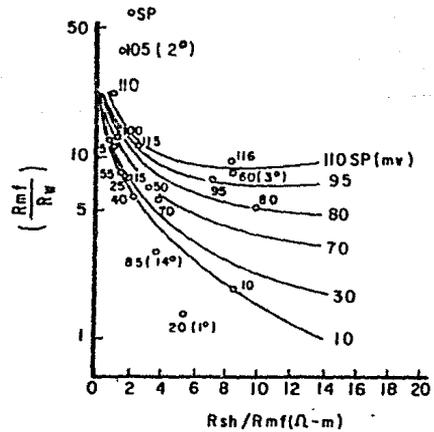


Fig. 6. - Correlación entre (R_{mf}/R_w) y (R_{sh}/R_{mf})
en función del valor SP.
(Silva y Bassfouni, 1981)

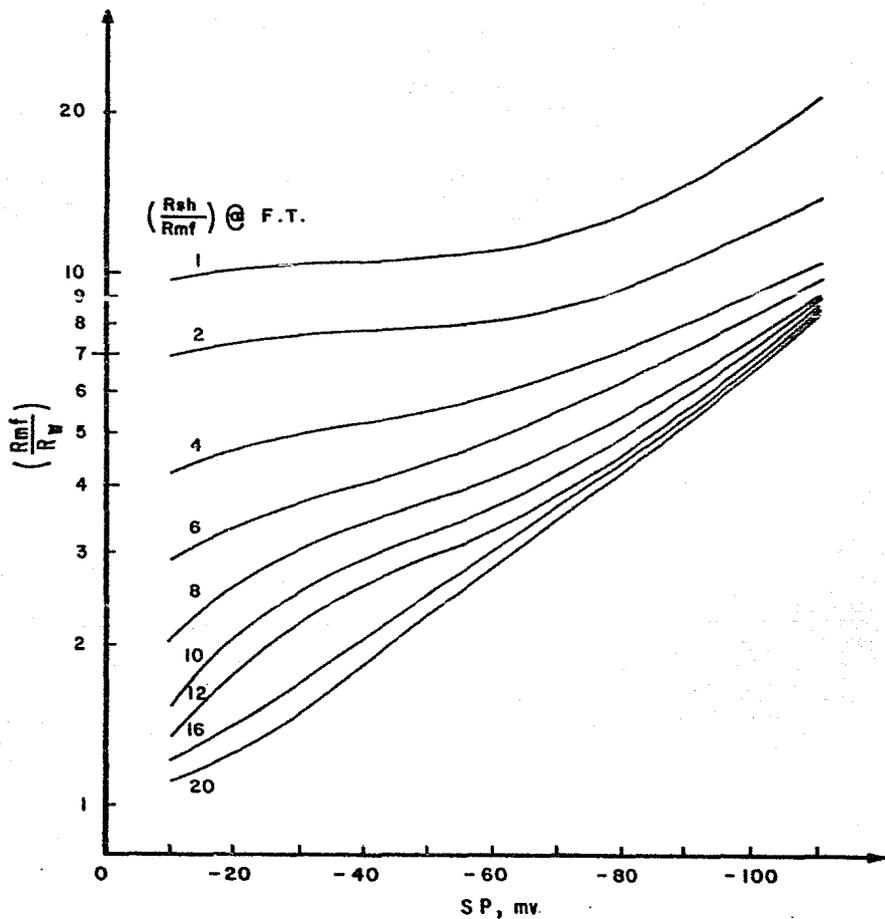


Fig. 7.-Gráfica propuesta por Silva y Bassiouni para calcular R_w a partir del registro SP.

(Silva y Bassiouni, 1983)

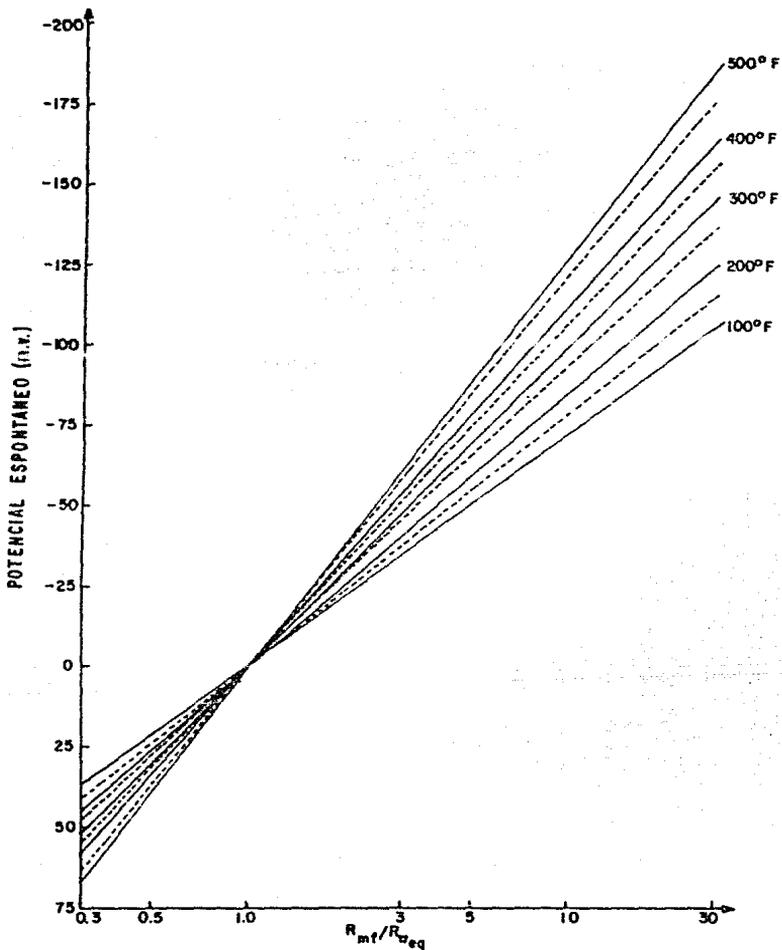


Fig. 8.-Solución gráfica de la ecuación SP
(Dresser Atlas, 1979)

CAPITULO IV

PERSPECTIVAS DEL REGISTRO DE POTENCIAL NATURAL

IV.1.-UTILIZACION DEL FENOMENO DE ELECTROFILTRACION PARA LA DETECCION DE FILTRACIONES EN PRESAS

El hecho de que el potencial de electrofiltración contribuye a la curva SP, junto con el potencial de difusión, difusión-adsorción y redox, ha sido reconocido desde hace mucho tiempo y resaltado por investigadores como Pirson y Wong (Pirson y Wong, 1972). Sin embargo, en general, la existencia de este componente en la curva SP ha sido ignorado.

En gran parte, ésto se ha debido a la falta de comprensión del mecanismo de generación del potencial de electrofiltración, o a la falta de datos básicos adecuados que permitieran su evaluación cuantitativa.

Un mayor estudio y comprensión del fenómeno de electrofiltración y los parámetros involucrados que lo afectan, ha traído en consecuencia que se le haya encontrado una aplicación práctica, ésto es, en la detección de filtraciones de agua en presas o embalses (Ogilvy, A.A., et al., 1969; Bogoslovsky, V.A. y Ogilvy, A.A., 1972; Haines, B.M., 1978).

Esta aplicación fue seleccionada para presentarla en este capítulo de perspectivas del registro de potencial natural por cuatro razones:

- 1.-Se le encuentra aplicación práctica y muy útil a una componente del SP que hasta ahora había sido despreciable.
- 2.-El estudio del potencial de electrofiltración en filtraciones de agua en presas o embalses, puede llevar a una mejor comprensión del fenómeno de electrofiltración

y su relación con parámetros tales como la permeabilidad de las rocas. Relación que de establecerse teóricamente, - sería de gran importancia, sobre todo si dicho resultado - se extrapola a la interpretación del registro SP en pozos.

3.-Si bien esta aplicación no se lleva a cabo en un pozo, la técnica de su medición es prácticamente la misma que - se utiliza para obtener la curva SP en un pozo.

4.-La importancia de detectar filtraciones en presas o embalses, en un país como México que tiene escasos recursos hidrológicos, es de una importancia incuestionable, sobre todo que la técnica de utilizar el potencial de electro - filtración es sumamente barata y puede desarrollarse completamente en el país sin el concurso de tecnologías ex - tranjeras.

En fin, esta técnica se ofrece como una perspectiva, pues hasta el momento, no se tiene noticia de su utilización - en México, si bien en los Estados Unidos se ha empezado a utilizar recientemente, como lo demuestran los trabajos - presentados al respecto en la Convención de la SEG de - - 1984. (Proc. SEG, 1984).

La descripción de la técnica fue tomada de los artículos - de A.A.Ogilvy, M.A.Ayed y V.A.Bogoslovsky (op.cit. 1969), - Bogoslovsky y Ogilvy (op.cit.,1972) y B.M.Haines (op.cit.,1978).

Quando en las presas y embalses ocurren filtraciones con - siderables de agua, pueden ocasionarse severos problemas. Muchos ejemplos de subestimación de la permeabilidad de - rocas o material de la presa, llevan al hecho de que los - embalses no se llenen hasta la marca planeada, haciendo - su explotación incosteable. Consecuencias más severas se - presentan cuando toma lugar la concentración de flujos --

de agua en terrenos inconsolidados, generándose una difusión, erosión y subsidencia que puede ocasionar el colapso de la presa.

Por lo tanto, es necesario en casos de alta filtración, tomar medidas para liquidarlos. A menudo el costo de las medidas para prevenir la filtración, las cuales se encuentran que son necesarias hasta después de la terminación de la presa, son commensurables con el costo de construcción de la misma.

Entonces queda claro, cuan importante es detectar a tiempo las filtraciones de agua y, si es posible, localizarlos sitios donde se producen, ya que la determinación de los lugares de filtración y el trazado del movimiento -- del agua, hacen posible planear unas medidas de prevención de filtraciones más técnicas y económicas.

Sin embargo, la puesta en práctica de las medidas mencionadas, se detiene por la ausencia de información confiable acerca de los lugares de filtración. Su presencia a menudo se detecta a través del uso del método de balance, ésto es, comparando la cantidad de agua que entra y sale del embalse, después de descontar la pérdida por evaporación. Este método es sumamente impreciso y puede determinar únicamente filtraciones muy grandes que sobrepasen -- al 10% de la descarga total de agua en el embalse. Por otra parte, a través de este método no es posible resolver el problema más importante, el cual es saber donde -- están localizados los sitios de filtración. Observaciones del comportamiento de los niveles de agua en pozos -- de control, así como la aparición de nuevos brotes de -- agua subterránea en las regiones cercanas ayudan a dar -- una definición un poco más precisa. Estos datos, junto -- con la información geológica-estructural del área, hacen

posible el mapeo de las supuestas zonas peligrosas; pero la precisión de la información así obtenida no satisface los requerimientos de los ingenieros, quienes necesitan datos concretos acerca de la localización de los flujos de agua.

Los primeros experimentos para detectar lugares de filtración de agua en embalses usando el fenómeno del potencial de electrofiltración, proporcionaron resultados prometedores: mostrando que usando las anomalías naturales del potencial de electrofiltración, es posible localizar exactamente los lugares de filtración a través del fondo así como a través de los bancos del embalse.

La posibilidad de usar el fenómeno del potencial de electrofiltración de agua de los embalses, se basa en el fenómeno del campo eléctrico formado por el flujo de agua a través de un medio poroso, descrito en el Capítulo I. Como se mencionó en éste, es posible concluir que con el incremento en los gradientes hidráulicos se observe un incremento en la anomalía del potencial (ver Capítulo I. Dependencia de E_x de ΔP). Esto es válido para todo el rango de tasas de flujo que obedezcan al flujo laminar; esta Ley se viola cuando el flujo es turbulento en fisuras.

El valor del potencial de electrofiltración está afectado considerablemente por la permeabilidad natural del terreno a través del cual la filtración toma lugar. Las máximas anomalías de potencial de electrofiltración se observan cuando la filtración toma lugar en un material con una permeabilidad del orden de 60 Darcy, éste corresponde a permeabilidades en arenas con granos de tamaño medio, con valores más bajos de permeabilidad, los valores de potencial de electrofiltración caen abruptamente;

por lo tanto, las filtraciones a través de material poco filtrante son difíciles de descubrir aunque cubran grandes áreas.

Si existen fisuras y toma lugar un flujo turbulento, como se dijo antes, la relación lineal entre el potencial de electrofiltración y el gradiente hidráulico se viola. Pero al mismo tiempo, tomando en consideración el hecho de que a menudo se deposita material secundario en las fisuras, y si dicho material es arena de grano medio, entonces arriba de esas fisuras se esperarán grandes anomalías de potencial de electrofiltración: por otro lado, la argilitización de las fisuras, al reducir la permeabilidad -- origina una caída en los potenciales de electrofiltración.

La presencia de material arcilloso en las fisuras aún si parte de éste permanece libre puede cambiar considerablemente la situación. De acuerdo a lo visto en el Capítulo I, las capas de arcilla están caracterizadas por valores positivos relativamente altos de potencial natural debido al fenómeno de difusión-adsorción. Entonces opuesto a las fisuras rellenas de arcilla en el fondo y en las márgenes de los embalses, pueden encontrarse valores positivos de los potenciales de electrofiltración.

Por otra parte, es importante tomar en cuenta la salinidad del agua, ya que las condiciones más favorables se dan cuando se tienen aguas de baja salinidad. La presencia de sales disueltas multivalentes es desfavorable.

Por tratarse de una técnica que aún en México no se ha -- puesto en práctica, se considera necesario hacer una breve descripción del método de observación, la cual se hace a continuación:

El método de observación consiste, en primer lugar, en colocar cuerdas flotantes a través del área de estudio - con el fin de señalar las líneas de observación. Ver - - Fig.1. Para llevar a cabo las mediciones de SP, se precisa de 2 electrodos impolarizables "M" y "N", uno de los cuales se mueve a lo largo del perfil ("M"), mientras -- que el otro ("N") permanece fijo emplazado en la orilla -- del agua, en un punto seleccionado previamente de acuerdo a reconocimientos hechos con antelación en un área -- donde el campo eléctrico sea estable. El desbalance en -- tre los electrodos se verifica a través de colocar el -- electrodo móvil muy cerca del fijo y confirmar una lectu -- ra de cero en el multímetro. Después de esto, las lectu -- ras pueden hacerse de dos maneras:

- a) De forma continua, si se dispone de un equipo de re - gistro automático, como el que se utiliza en la toma de registros de pozos. De esta manera, la sonda (elec trodo "M") se sumerge en el agua en el punto seleccio nado para empezar las mediciones y entonces se mueve - a lo largo del fondo del embalse por medio del malaca te. Fig. 2.
- b) Mediciones tomadas en estaciones separadas a una cier ta distancia a lo largo de la línea, donde el electro do móvil se baja hasta el fondo del agua por medio de un malacate, se efectúa la lectura y se toma nota de la posición y profundidad del agua.

En cualquiera de las dos maneras, la escala de grabación es determinada de acuerdo con el nivel de ruido, la am - plitud de la señal útil y la característica de cambio -- del campo del potencial de electrofiltración a lo largo de una dirección determinada.

La interpretación de los resultados se lleva a cabo con-siderando que, relativo a lo que es llamado "campo nor-mal", los sitios de infiltración están caracterizados por valores negativos del potencial de electrofiltración y -- que la amplitud de una anomalía indica la intensidad de la filtración. En muchos casos, sin embargo, las anomalías de potencial de electrofiltración se distorsionan por la influencia de potenciales naturales que no se deben a la filtración, en conexión con ésto, frecuentemente se tiene la influencia de potenciales debidos al fenómeno de difusión-adsorción. Tales potenciales se observan en los con-tactos de roca de diferente litología. Por ejemplo, el in-cremento de la argilitización en depósitos bentónicos ge-nera un incremento de los valores positivos del potencial natural, un hecho que dificultaría reconocer el potencial originado por filtración.

Cuando se interpretan resultados de SP es necesario con-siderar con gran atención la litología de las rocas que -- constituyen el embalse y también tomar en consideración -- factores como la redistribución de los depósitos bentóni-cos durante el proceso de explotación del embalse, ya que esta redistribución lleva, en algunos casos al sellamien-to de fisuras pequeñas por medio del material arcilloso.

Hay que hacer notar que las mediciones de SP pueden y de-ben ser correlacionadas con mediciones de flujo bentónico y mediciones de temperatura, con el fin de precisar si la filtración está tomando lugar. Ver Fig. 3.

Una vez recolectados los datos de SP, las zonas de filtra-ción pueden reconocerse en una base areal como se ilustra en la Fig. 1. Se observa una región amplia de valores ne-gativos altos, extendiéndose a través de las porciones --

sur de las líneas 1, 2 y 3. Mientras tales regiones pueden indicar zonas de filtración en un sentido amplio, Haines (Haines B.M., op. cit.) sostiene que las zonas de filtración son mejor examinadas en perfil, donde se han obtenido datos en dos o más períodos, en los cuales, los niveles de agua (y las presiones hidrostáticas, por consiguiente) han cambiado significativamente.

Considerando el siguiente caso hipotético mostrado en la Figura 4, en donde se observa una zona permeable rodeada por roca impermeable. Cuando los niveles de agua son altos, la filtración a través de la zona permeable se provoca por la creciente presión hidrostática, y un perfil SP se mide tal como el perfil 1 de la figura 5 (notar los picos menos negativos adyacentes). A un nivel de agua menor como en el perfil 2, las amplitudes se reducen; cuando el nivel de agua ha caído hasta cero, se registra un valor cero como en 3.

De las mediciones hechas por Haines, que se muestran en la Figura 1, el mismo autor obtuvo el perfil que se muestra en la figura 5, donde las zonas de filtración son claramente evidentes en aquellas regiones donde los datos tomados a un nivel alto de agua son negativos con respecto a los tomados con un nivel de agua más bajo. Si además de medir el SP a niveles diferentes de agua, se obtuvieran datos de velocidad de flujo bentónico y de temperatura, la localización de los sitios de filtración sería más evidente.

En base a la cantidad limitada de trabajos publicados a la fecha respecto a esta técnica, el método ofrece un medio para la investigación de pérdidas de agua en presas, embalses y otras estructuras para retener el agua. Una perfección futura del método aquí presentado procedería -

principalmente en la dirección de determinar las descargas de filtración en unidades absolutas en cuanto a esto, como señalan Ogilvy et al. (Ogilvy et al., op. cit.) son posibles dos direcciones:

- 1.-La examinación estadística de todos los parámetros medidos y el establecimiento de relaciones correlativas entre ellos, con el propósito de compararlos con mediciones de balance de agua.
- 2.-Modelar el proceso natural tomando en consideración los principios de similaridad, con el propósito de establecer la relación física entre la intensidad de la anomalía con la permeabilidad de las rocas.

Intuitivamente parecería que la relación de la variación del SP con respecto al cambio de nivel del agua (cambio en la presión hidrostática) ofrece la perspectiva de cuantificar esas indicaciones cualitativas, en términos de la tasa de flujo y/o permeabilidad de la roca.

De hecho, ya se está en ese camino, como lo demuestra el resumen de la patente perteneciente a Richard N. Chandler (Chandler R. N., 1984) de un sistema para registrar permeabilidad a través de medir el potencial de electrofiltración. Dicho sistema consiste de un aparato que inyecta un fluido a alta presión dentro de la formación para causar en ésta la generación de un potencial electrocinético momentáneo. Los potenciales de electrofiltración momentáneos generados son detectados por electrodos apropiados, y las respuestas de los electrodos representativas de los potenciales generados son procesadas para determinar una respuesta característica en el tiempo de esos potenciales de electrofiltración. Después de eso, a partir de un cono

cimiento de la respuesta característica en el tiempo de los potenciales de electrofiltración detectados, se deriva una medida de la permeabilidad de la formación. Desgraciadamente el resumen publicado en Geophysics, no dice más al respecto y hasta el momento no se ha publicado nada referente al éxito o al fracaso de dicho sistema.

En fin, se puede decir que respecto al estudio del potencial de electrofiltración y su relación con la permeabilidad, que existen amplias perspectivas de investigación ya que de lograrse algo positivo en ese sentido, sería de gran importancia en el estudio de evaluación de formaciones.

IV.2 EL REGISTRO REDOX

La curva de potencial espontáneo es un registro de varias-componentes, las cuales como se ha visto son: electrofil - tración, difusión-adsorción y reducción-oxidación (Redox). La componente más ampliamente usada en la actualidad es la de difusión-adsorción, cuyo empleo en la determinación de la resistividad del agua de formación es muy conocido. Por otra parte, a la componente de electrofiltración en años recientes se le han encontrado aplicaciones interesantes, como lo expuesto en IV.1. Sin embargo, muy poca investigación ha sido llevada a cabo respecto de la componente Redox de la curva SP y sus usos posibles. Sólo algunos investigadores como Veneziani y colaboradores (Veneziani I., -- et al., 1972) y Pirson (Pirson S.J., 1982), han estudiado la cuestión del potencial Redox y han encontrado que la medición de dicho potencial es de gran utilidad en la explotación tanto de minerales, como de petróleo y gas.

A continuación se expone el uso del registro Redox como una perspectiva del uso del registro de potencial natural, ya que hasta el momento el registro Redox aún no se ofrece comercialmente; pero en base a las consideraciones teóricas y a los experimentos llevados a cabo por Veneziani y colaboradores (Veneziani I., et al., op.cit.) y Pirson (Pirson, S.J., 1982), puede decirse que el registro Redox tiene posibilidades de ser una herramienta estratigráfica poderosa.

La exploración mineral y en menor extensión la petrolera, dependen del conocimiento del estado de la roca del yacimiento con respecto a la alteración, oxidación y química en general. Estos tres factores son importantes con respecto al transporte, depositación y localización tanto de minerales como de hidrocarburos. Se puede decir, por lo tanto,

que las acumulaciones económicas de minerales en la tierra están asociadas con condiciones geoquímicas bien definidas.

Existen potenciales de contacto (electroquímicos) entre -- las capas geológicas y su efecto puede ser comparado al -- que se observa en una batería donde el voltaje es el resultado de una reacción Redox. Por otra parte, es bien sabido que las formaciones geológicas en la tierra tienen diferentes potenciales Redox o Eh.

De acuerdo con esto, es posible suponer que cuando 2 formaciones geológicas de diferente Eh, entran en contacto, exhibirán una diferencia de potencial, la cual existirá hasta que el equilibrio de Eh sea establecido, el cual nunca es alcanzado en el tiempo geológico.

Por lo tanto, los contrastes de potenciales Redox son mantenidos en la tierra sobre el tiempo geológico y el carácter transgresivo o regresivo de las formaciones sedimentarias persistirá a través del tiempo. Por lo que el registro Redox es una herramienta estratigráfica poderosa. Fig.6.

Las principales modificaciones en el potencial Redox de -- los sedimentos ocurren en o cerca de la superficie de la tierra, donde están sujetos a la oxidación proveniente de la atmósfera, pero más particularmente debido a la infiltración de agua meteórica. Esta infiltración es la responsable de los contrastes laterales y verticales, los cuales son de gran importancia en la búsqueda de depósitos minerales de tipo sedimentario, como los de uranio, manganeso, cobre, cobalto, hierro, etc., así como hidrocarburos. Fig.7.

Entonces un registro que pueda medir continuamente el po-

tencial Redox de las formaciones adyacentes en un pozo sería importante porque nos daría una idea de los factores físicoquímicos que trabajaron durante la diagénesis sedimentaria.

Se ha demostrado que la curva SP convencional mide solamente una pequeña fracción del contraste total de potencial Redox entre las formaciones, por lo que fue necesario diseñar un sistema que midiera en gran parte el potencial Redox, tal sistema es el registro Redox que fue inventado -- por Veneziani y Colombo (Veneziani I., et al., op.cit.). Dicho registro puede correrse en lodos salados (sales inorgánicas), indicar la presencia de hidrocarburos en las formaciones y el contacto agua-aceite. El registro Redox puede tener un cero absoluto si se quiere. Sin embargo, no puede correrse si el lodo es rico en sustancias orgánicas rápidamente oxidables, tales como el quebracho cáustico y aceites altamente sulfurosos.

El registro Redox mide continuamente el potencial de óxido-reducción (E_h), por medio de dos electrodos que viajan al mismo nivel en el pozo, uno inerte (oro o platino) y uno de referencia (plomo). Indica las proporciones presentes en cada formación geológica de las formas oxidadas y reducidas de diferentes minerales y iones en las aguas de formación.

En la Fig. 8, se presenta en el carril izquierdo la curva SP y la curva Redox, la medición fue hecha con una sonda de 4 electrones (2 Pb, Pt, Au). La curva SP proviene del Electrodo de plomo, mientras que la curva Redox mide y registra el potencial entre el mismo electrodo de plomo y el electrodo de platino al mismo nivel. Por lo tanto, no existe efecto óhmico en la curva Redox y las deflexiones serán más grandes que las del SP a

los mismos niveles.

En la Fig. 9, se muestran los diferentes potenciales Redox que se generan en el pozo:

$$Eh_m = Eo_m + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox_m}{Red_m}$$

$$Eh_{SH} = Eo_{SH} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox_{SH}}{Red_{SH}}$$

$$Eh_o = Eo_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox_o}{Red_o}$$

$$Eh_{SW} = Eo_{SW} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{Ox_{SW}}{Red_{SW}}$$

Cuando dos sistemas Redox se ponen en contacto a través de una membrana semipermeable, las cargas eléctricas se transfieren. Ya que las lutitas tienen una gran capacidad para intercambiar iones, modificarán la carga eléctrica del lodo frente a ellas oxidándolo, adsorbiendo muchos de los iones cloro del lodo. El lodo por lo tanto adquiere cargas -positivas frente a las lutitas. En un grado menor ocurre -lo mismo frente a la zona de hidrocarburos. Frente a la zona de agua, el lodo recibe cargas negativas extras, ya que la zona de agua actúa como una zona oxidada. Considerando el potencial Eh que la zona de aceite crea, el efecto del aceite está bien marcado y el contacto agua-aceite puede -ser observado sin ninguna duda. En la Fig. 10, se muestra la curva SP convencional que se observaría para la misma -zona.

El registro Redox en la Fig. 11, es la diferencia entre una curva SP(IES) y una curva tipo SP usando un electrodo de -oro en el pozo más el electrodo de referencia en la super-

ficie usado en el IES. El electrodo de oro actúa como el electrodo inerte requerido para las mediciones Redox; donde el diferencial entre las dos curvas es positivo indica un ambiente oxidado, donde es negativo indica un ambiente reductor.

Así también el registro Redox, permite una determinación del contacto entre el agua salada y dulce. Ya que el agua dulce subterránea proviene de la infiltración del agua meteórica, existirá un contraste bien marcado del E_h entre el agua salada y la dulce. Sin embargo, como resultado de que el agua percola hacia abajo, el oxígeno gradualmente desaparece a medida que la distancia de infiltración aumenta. El contacto puede ser entonces una zona de transición, o un gradiente de E_h de un medio oxidado en la zona de agua dulce a uno menos oxidado (o aún reducido) en la zona de agua salada connata. Otra aplicación interesante del registro redox en la geohidrología sería: la de poder trazar la distancia de infiltración de aguas contaminadas a un acuífero útil, ya que el agua contaminada con materia orgánica exhibe un E_h negativo, el cual puede incrementarse gradualmente con la distancia a partir de los --puntos de infiltración a medida que los contaminantes son absorbidos o destruidos.

También el registro Redox puede utilizarse como indicador de un medio ambiente favorable para el depósito de minerales de la forma siguiente:

1.-Acumulaciones de aceite y gas

Los registros Redox pueden resolver el problema de encontrar aceite de dos maneras:

a) Estableciendo el nivel diferencial de reducción de los

sedimentos que sobreyacen al yacimiento.

- b) Estableciendo la secuencia redoxomórfica de los sedimentos y su manera y profundidad de depositación, ya sea línea de costa, nerítico somero, nerítico profundo, o si se trata de una secuencia transgresiva o regresiva.

2.-Depósitos sedimentarios de uranio

Muchos de los depósitos de uranio, son yacimientos típicos de enriquecimiento secundario, esto es, aquellos derivados por un proceso genético que depende de la oxidación y disolución de elementos minerales selectos por una serie de factores meteóricos (aire, lluvia, etc.) en una zona de aguas arriba, y de la migración aguas abajo hacia una zona de reducción, donde los elementos son redepositados. Este proceso epigenético es característico de muchos depósitos de sulfuros (cobre, mercurio, etc.), así como también de yacimientos de uranio, vanadio, magnesio, etc. La depositación de uranio, ocurre entonces en el frente de agua meteórica que infiltrándose y avanzando, se mueve dentro de las capas permeables de sedimentos gruesos de una secuencia sedimentaria regresiva. Las aguas meteóricas ricas en oxígeno, bicarbonatos, uranio y otros elementos traza tales como el selenio, molibdeno, etc., moviéndose hacia el centro de la cuenca bajo la influencia de la fuerza de gravedad, depositan varios minerales, incluyendo el uranio. La precipitación del uranio y otros minerales ocurre en un punto de su trayectoria dentro de los acuíferos permeables, donde los parámetros físicoquímicos ambientales llegan a ser apropiados como un resultado del incremento en la cantidad de arcillas.

Se puede decir entonces, que las acumulaciones comerciales siempre están asociadas con secuencias regresivas, como se puede observar en el registro redox de la Fig.12. - Es oportuno mencionar que en cuencas uraníferas de las Rocas callosas, el registro redox fue muy superior desde el punto de vista redoxomórfico al SP convencional. (Veneziani-1., et al., op. cit.).

De lo anterior se puede concluir que:

- 1.-El registro redox permite obtener una curva TIPO SP en todos los salados.
- 2.-En el futuro, si se dispone de suficientes registros redox, el carácter sedimentario, condiciones ambientales y trayectorias de desplazamiento de fluidos, podrán ser obtenidos de los registros redox.
- 3.-Si se calibra en el registro redox, el potencial E_h -- con respecto al electrodo estandar de hidrógeno, se obtendrá una curva TIPO SP con una referencia cero. Esto es muy importante para fines de correlación de pozo a pozo, ya que podrá hacerse dicha correlación sobre bases absolutas.
- 4.-Los registros redox, son muy útiles para el mapeo -- areal de zonas susceptibles desde el punto de vista de ambiente geoquímico propicio para la depositación de minerales.

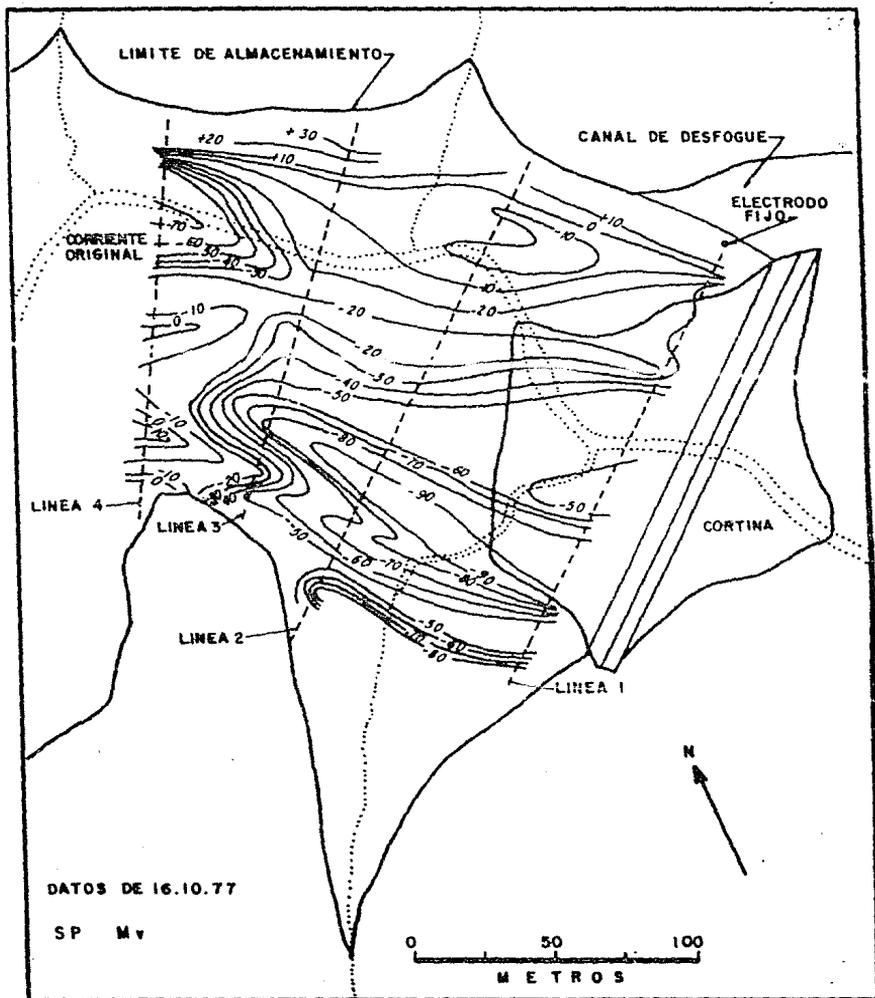


Fig. 1.-Trazado de las líneas de medición de SP y configuración de los valores medidos.

(Haines, B.M., 1978)



Fig. 2.-Medición de SP en un embalse

- 1.-Camión de registro
- 2.-Cable
- 3.-Electrodo móvil
- 4.-Electrodo fijo
- 5.-Lancha a motor

(Ogilvy, A.A., et al., 1969)

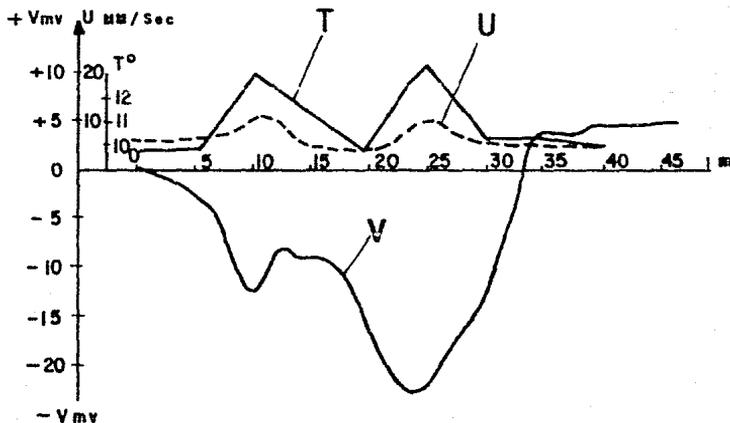


Fig. 3.-Perfiles de SP (V), flujo bentónico (U) y Temperatura (T).

(Ogilvy, A.A., et al., 1969)

CORRIENTES DE POTENCIAL DE ELECTROFILTRACION

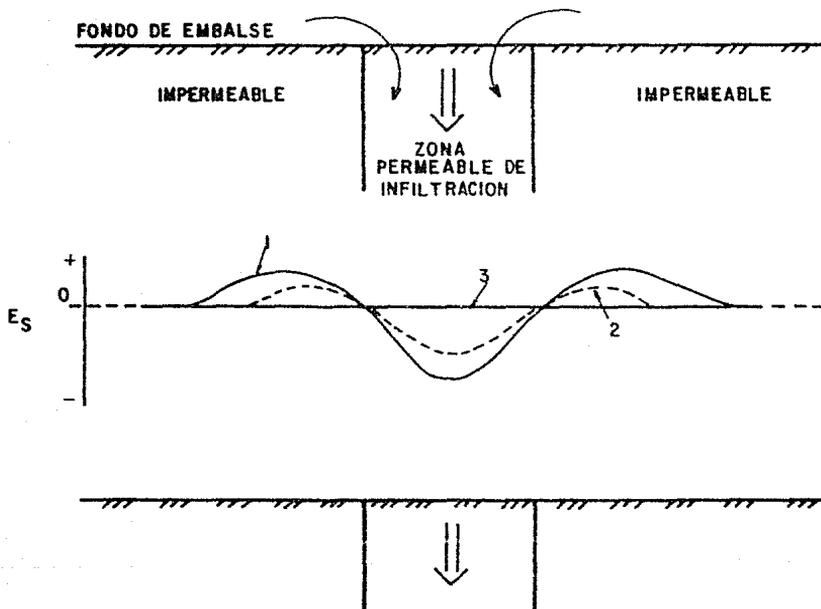


Fig. 4.-Caso hipotético que ilustra la filtración de agua a través de una zona permeable rodeada por roca impermeable, y los perfiles de SP, medidos a diferentes tirantes de agua.

(Haines, B.M., 1978)

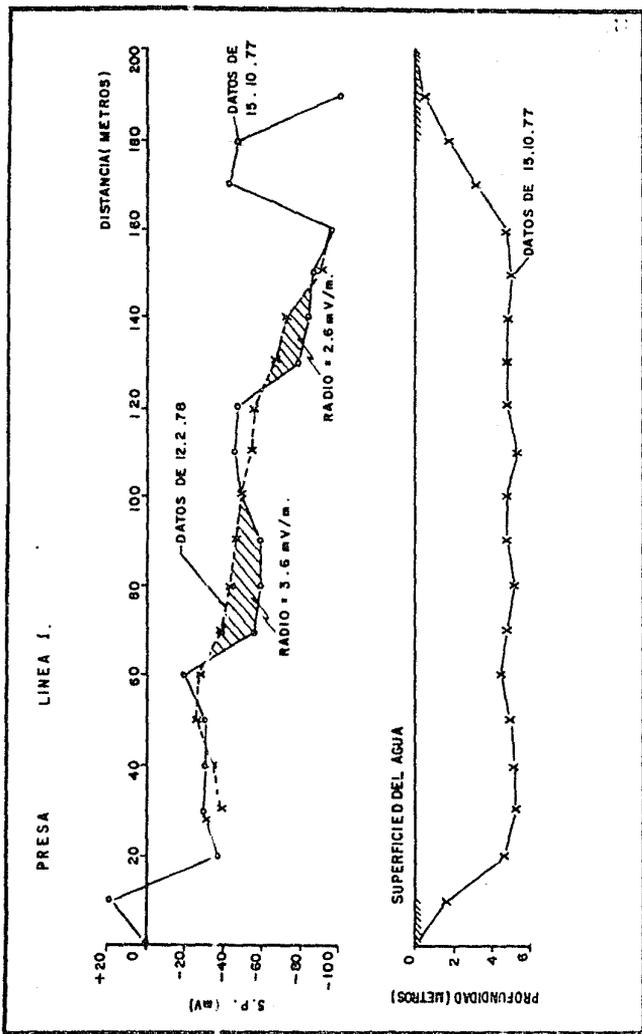


Fig. 5.-Perfiles de SP, correspondientes a la línea 1 de la Fig. 1, los datos de 12.2.78 fueron tomados con un nivel de agua inferior al que existía el 15.10.77.

(Haines, B.M., 1978)

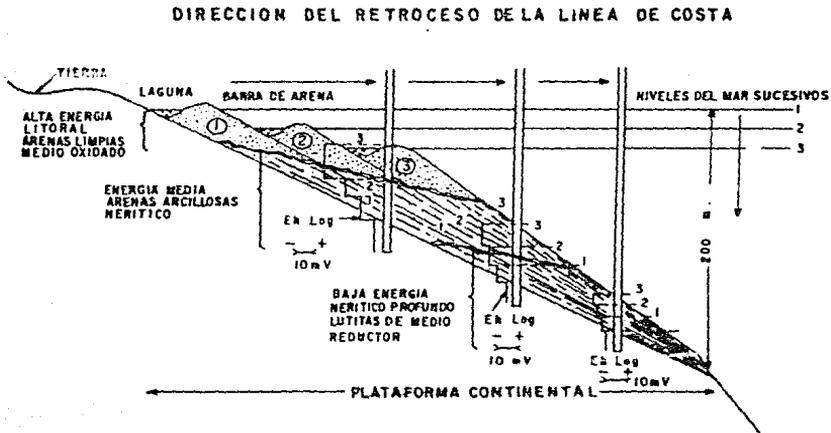


Fig. 6.a.-Representación esquemática de los medios ambientes de sedimentación asociados con una regresión y la respuesta típica asociada del registro Redox.

(Pirson, S.J., 1970).

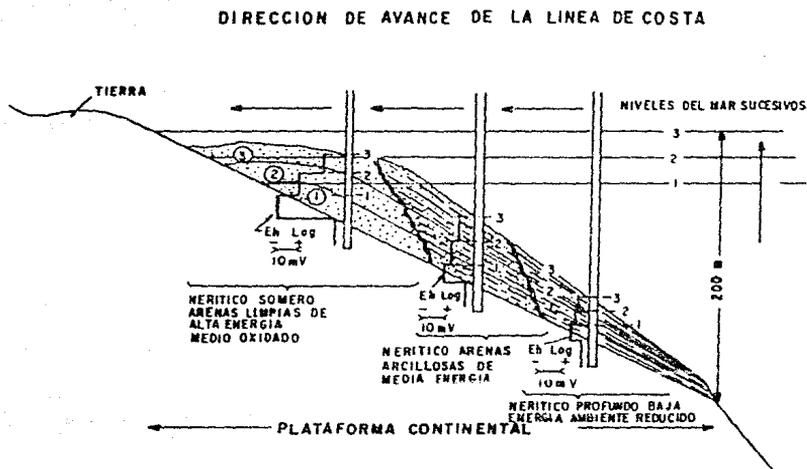


Fig. 6.b.-Representación esquemática de los medios ambientes de sedimentación asociados con una transgresión y la respuesta típica asociada del registro Redox.

(Pirson, S. J., 1970).

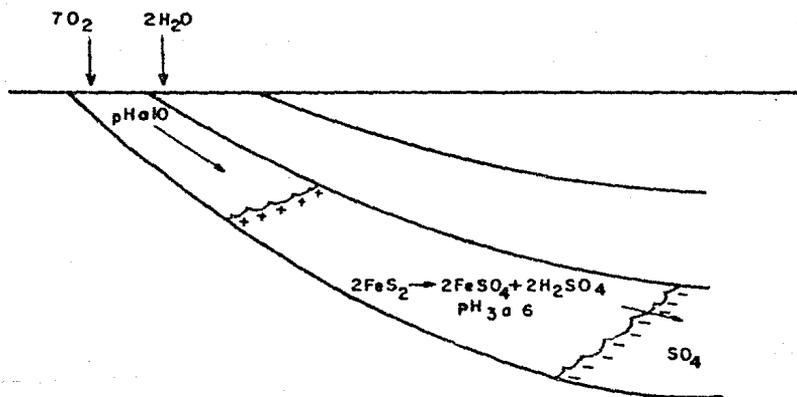


Fig. 7.-Oxígeno más agua, percolando a través de una capa de pirita, oxidan la pirita. Los iones sulfato permanecen en el agua, dando como resultado una carga negativa. Los iones de hierro adsorbido por la pirita, dan como resultado una carga positiva.

(Hallenburg, J.K., 1971).

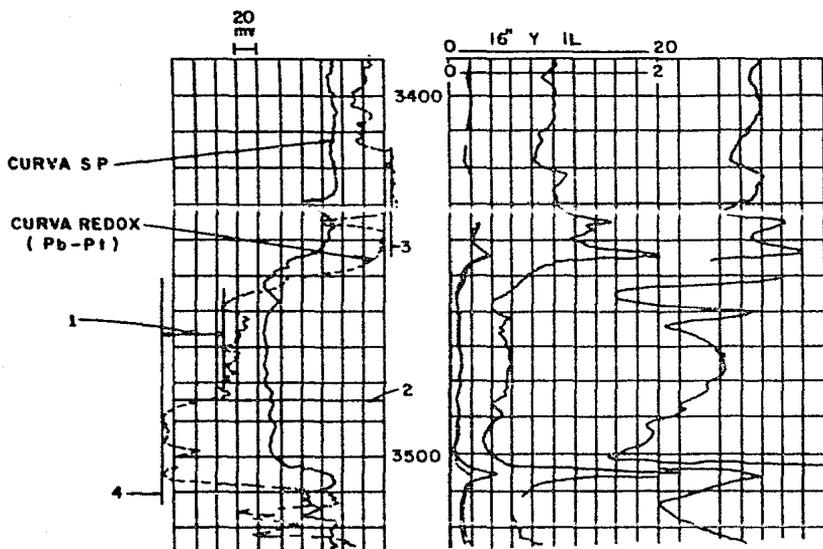


Fig. 8.-Sección de un registro Redox

- 1.-Efecto de la saturación residual de aceite
- 2.-Contacto agua-aceite
- 3.-Sedimentos nerítico profundo
- 4.-Sedimentos de alta energía, cercanos a la costa

Nótese el desplazamiento hacia abajo de la curva,-
Redox con respecto al registro SP.

(Pirson, S.J., 1969)

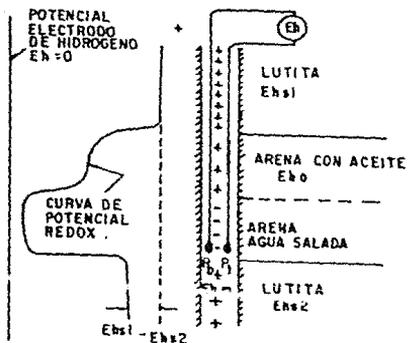


Fig. 9.-Distribución de las cargas eléctricas netas en un pozo, y la curva Redox resultante (Pirson, S.J., 1970).

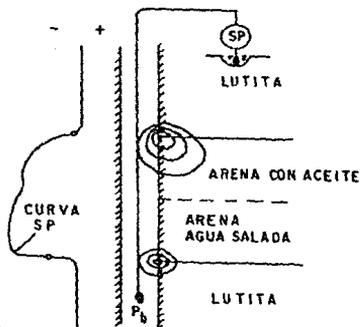


Fig. 10.-Curva SP. para la misma secuencia litológica de la Fig. 9. Nótese que la curva SP está más suavizada que la curva Redox. (Pirson, S.J., 1970).

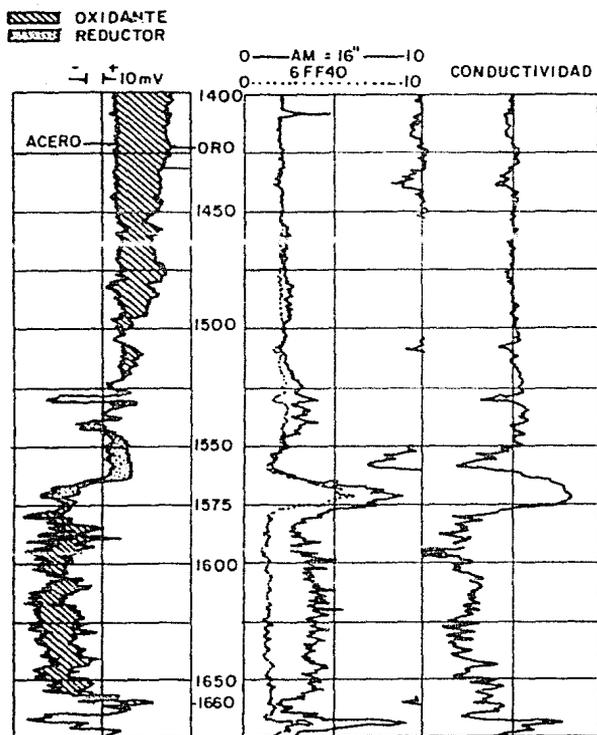


Fig. 11.—SP diferencial, obtenida a partir de dos curvas SP; una con un electrodo de acero y la otra con un electrodo de oro.

(Pirson, S.J., 1970).

CONCLUSIONES

- 1.-El análisis teórico de los fenómenos que gobiernan el fenómeno del potencial natural, lleva a una mejor comprensión del mismo, y por lo tanto, abre las expectativas de nuevas aplicaciones, sobre todo utilizando fenómenos como los de electrofiltración y redox, que por la falta de estudio habían permanecido casi en el olvido.
- 2.-Al establecer el modelo para generar un registro de potencial natural, se da una base teórica a una serie de conceptos empíricos acerca del comportamiento de la curva SP.
- 3.-Expresando la respuesta del registro SP como una convolución, se logró:
 - a) Separar la contribución individual de la herramienta y de la formación.
 - b) Situar al registro SP dentro del contexto matemático del análisis de señales.
- 4.-La técnica de interpretación del registro SP, presentada aquí, para la determinación de R_w , es un gran avance, ya que además de ser congruente con la teoría expuesta, no precisa de hacer suposiciones que no siempre concuerdan con la realidad.
- 5.-Las perspectivas de la utilización de las mediciones de potencial natural son amplias:
 - a) El empleo del potencial de electrofiltración para -

la detección de filtraciones en presas, además de haber probado su efectividad, es un método sumamente barato, lo que lo hace idóneo para su empleo en nuestro país.

- b) El registro Redox, además de salvar las limitaciones del registro SP convencional, sería de gran ayuda en el análisis de facies sedimentarias, estableciendo la secuencia redoxomórfica y la gradación de los sedimentos, así como también en el mapeo de zonas propicias desde el punto de vista geoquímico para la depositación de minerales y petróleo.

Un punto importante es que estas aplicaciones pueden llevarse a cabo sin gran tecnología que tuviera que adquirirse en el extranjero. Solamente es necesario un firme y profundo conocimiento de los fenómenos involucrados.

6.-La perspectiva de utilizar el potencial de electrofiltración para cuantificar la permeabilidad es promisoría, pero es necesario un mayor estudio y experimentación. De hecho, ya hay algunos resultados prometedores.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, M. U., 1964.-A Laboratory Study of Streaming - - - Potentials. Geophysical Prospecting, V.12,- pp.49-64.
- Arroyo Carrasco, F.A., 1981.-Teoría de Señales y su Aplicación en el Análisis de Registros Geofísicos de Pozos. tesis Lic. UNAM.
- Barlai, Z., 1972.-A New Theory of the Well Logging - - - Characteristics of Hydrocarbon-Bearing Sandstones. SPWLA 13th Annual Logging Symposium Trans. May 7-10.
- Bernstein, F.; Scala, C., 1959.-Some aspects of the - - - Streaming Potential and the Electrochemical SP in Shales. Petroleum Trans. AIME, V.216, pp.465-468.
- Bogoslovsky, V.A.; Ogilvy, A.A., 1972.-The Study of - - - Streaming Potentials on Fissured Media Models. Geophysical Prospecting. V.20, pp.109-117.
- Branisa, F., 1974.-Filtering of Well-Log Curves. Geophysics, V.39, No.4.
- Coca Prados, J.; Bueno de las Heras, J.L.; Sastre Andrés-H. 1978.-Dinámica de partículas en suspensiones Sólido-Líquido; II Fenómenos de SU-perficie y Floculación de Partículas. Ingeniería Química.
- Chandler, R.N., 1984.-System for permeability Logging by Measuring Streaming Potentials. United - - - States Patent No.4,427,944.

- Coppinger, W.W.; Schultz A.L., .-.Using the Self Potential--
Log To Define Depositional Trends in Lower--
Wilcox Sands, Mc Mullen County, Texas.
- Dakhnov, V.N., 1962.-Geophysical Well Logging. Quarterly--
of the Colorado School of Mines, V.57, N2.--
Golden, Colorado.
- Dickey, P.A., 1944.-Natural Potentials in Sedimentary - --
Rocks. AIME. TRANS. V.155.
- Doll, H.G., 1948.-The S.P. Log: Theoretical Analysis and--
Principles of Interpretation. AIME Trans., -
V. 179.
- Doll, H.G., 1950.-The SP log in Shaly Sands. Petroleum - -
Transactions, AIME, V.189, pp.205-214.
- Doll, H.G., 1950.-Selective SP Logging Petroleum Transactions,
AIME, V. 189, pp.129-142.
- Dresser Atlas, 1979.-Log Interpretation Charts. Houston.
- Fertl, W.H., King, E.E., 1978.-Important SP and Gamma Ray-
Log. The Oil and Gas Journal, Aug. 21, pp.70
75.
- Giles, R.V., 1969.-Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Mc --
Graw-Hill, México.
- Glasstone, S., 1969.-Textbook of Physical Chemistry. Mc --
Millan, Londres.
- Haines, B.M., 1978.-The Detection of Water Leakage from --
Dams Using Streaming Potentials. SPWLA 19th -
Annual Logging Symposium Trans.

- Hallenburg, J.K., 1971.-A resume of Spontaneous Potential Measurements. SPWLA 12th Annual Logging - - Symposium, May 2-5, pp 1-15.
- Hallenburg, J.K., 1978.-Use of the Spontaneous Potential-Curve in a Mineral Mapping Technique. SPWLA-19th Annual Logging Symposium Trans., June - 13-16.
- Hallenburg, J.K., 1984.-Geophysical Logging for Mineral -- and Engineering Applications. Penn Well, - - Tulsa, Oklahoma.
- Helander, D.P., 1983.-Fundamentals of Formation Evaluation. OGCI. Tulsa, Oklahoma.
- Hilchie, D.W., 1984.-A New Water Resistivity versus - - - Temperature Equation. Log Analyst, July- - - August, pp. 20-22.
- Hill, H.J., Milburn, J.D., 1956.-Effect of Clay and Water Salinity on Electrochemical Behavior of - - - Reservoir Rocks. AIME Trans., V. 207, pp.65-72.
- Hill, H.J.; Anderson, A.E., 1959.-Streaming Potential- -- Phenomena in SP Log Interpretation. AIME - - Trans., V.216.
- Hill, H.J.; Shirley, O.J.; Klein, G.E., 1979.-Bound Water in Shaly Sands its Relation to Qv and other-Formation Properties. The Log Analyst, May--June.
- Johnson, A.L.; Norton, F.H., 1941.-Fundamental Study of - Clay: II, Mechanism of Deflocculation in the Clay-Water System. Journal of the American - Ceramic Society, V. 24, No.6.

- Jones, B., 1962.-Log-Derived data factors aid oil Hunting.
The Oil and Gas Journal, May 14. pp. 167-195.
- Jones, B., 1968.-The use of R_w and S_h Log-Derived Values-
in Oil and Gas Exploration Programs. - - -
Wyoming Geological Assoc. Guide Book, 20th-
Annual Field Conference, pp.101-105.
- Koerperich, E. A. 1970.-A Double-electrode Method of - -
Spontaneous Potential Logging. Jour of - -
Petroleum Technology, Nov.
- Koithara, J., Gill, T.S.; Raju, D.L.P., 1974.-Problems -
in Interpretation of SP Log Against Tipams-
in Upper Assam Valley. SPWLA 15th Annual --
Logging Symposium, June 2-5, pp. 1-12.
- Ladd, C.C.-Mechanisms of Swelling by Compacted Clay.
- Levine, S.; Neale, G.H., 1973.-The Prediction of Electro-
kinetic Phenomena within Multiparticle - --
Systems; I. Electrophoresis. Jour. of Colloid
and Interface Science, V.47, N.2. pp.520-529.
- Lindseth, R.O., 1966.-Application of Signal Theory to --
Well Log Interpretation. SPWLA 7th Annual -
Logging Symposium Trans.
- Littleton, R.T.; Burnett, E.E., 1975.-The Salinity - - -
Profile of the East Mesa Field as Determined
from Dual Induction Resistivity and SP -- -
Logs. U.S. Bureau of Reclamation Boulder - -
City, Nevada, Oct. pp'114-125.
- Lynch, E.J., 1962.-Formation Evaluation. Harper and Row,
New York.

- Mc Call, Ch.; Gonten, W.D. Von; Osoba, J.S., 1971.-The -
Effect of Hydrocarbons on the SP Opposite -
Sands. SPWLA 12th Annual Logging Symposium, -
May 2-5, pp.1-19.
- Mc Cardell, W.M.; Winsaver, W.D.; Williams, M., 1953.- -
Origin of the Electric Potential Observed -
in Wells. AIME Trans., V. 198.
- Mathews, D.M.; Bassiouni, Z. 1984.-Resistivity-Spontaneous
Potential Crossplot for Enhanced Interpretation
of Well Logs. The Log Analyst, July-August,
pp. 14-19.
- Mitchell-Tapping, H.J., 1986.-Depositional Environment -
Determination using a SSP-Resistivity - - -
Method. The Log Analyst, V. , No.2.
- Mounce, W.D.; Rust, W.M., 1944.-Natural Potentials in --
Well Logging. AIME Trans. V. 155.
- Nosal, E.A., 1982.-Spontaneous Potential Log Respose - -
Expressed as Convolution. Geophysics, V.47,
No.9, pp. 1335-1337.
- Oduolowa, O.A., 1977.-A case Study of the Determination-
of Connate Water Resistivity, R_w by Repeat-
Logging, in the Power River Basin, Wyoming.
The Log Analyst. Nov-Dec., pp. 27-31.
- Ogilvy, A.A.; Ayed, M. A.; Bogoslovsky, V.A. 1969.- - --
Geophysical Studie of Water Leakages from -
Reservoirs. Geophysical Prospecting, V. 17.
- Ortiz, O.; Gonten, W.D. Von; Osoba, J.S., 1973.-Relation
Ship of the Electrochemical Potential of --
Porous Media with Hydrocarbon Saturation. -
The Log Analyst. V. XIV, N.2. March-April, -
pp.25-32.

- Osoba, J.S.; Gonten, D.Von, 1970.-Measurement of the SP -
in nonconducting mud. The Log Analyst, May -
June, pp. 3-7.
- Perkins F.M.; Brannon, H.R.; Winsaver, W. O., 1954.- - -
Interrelation of Resistivity and Potential -
of Shaly Reservoir Rock. AIME Trans., V.201,
pp.176-181.
- Pied, B.; Poupon, A., 1966.-SP Base Line Shifts in Algeria.
SPWLA 7th Annual Logging Symposium Trans.
- Pirson, S.J.; 1947.-A Study of the Self-Potential Curve. -
The Oil and Gas Journal. October 4, pp.72-88.
- Pirson, S.J.; Wong, K.Y., F.S., 1972.- The Neglected SP -
Curve. SPWLA 13th Annual Logging Symposium,-
May 7-10, pp.1-16.
- Pirson, S.J., 1969.-Environmental Logging and Mapping in -
the Search for Minerals. SPWLA 10th Annual -
Logging Symposium, May 25-28, pp.1-44.
- Pirson, S.J., 1970.-Geologic Well Log Analysis. Gulf - -
Publishing Co., Houston.
- Reynolds, W.C.; Perkins, H.C., 1980.-Ingenierfa Termodinám
ica. Mc Graw-Hill, México, D. F.
- Robertson, J.O., 1975.-Hydration of Clays: Effect of - -
Various Organic and Inorganic Ions and - -
Electrochemical Treatment on the Swelling of
Various Clays. Tesis Doctoral, USC Los Ange
les, Cal.
- Russell, W., 1961.-Reservoir Water Resistivities and - - -
Possible Hydrodynamic flow in Denver Basin.-
Bull. of the American Assoc. of Petrol. - -
Geol., V.45, No.12, pp. 1925-1940.

- Schoonover, L.G.; Fertl, W.H., 1979.-How to Find - - -
Temperature, R_w , and Salinity with hand - -
calculators. The Oil and Gas Journal. July-
2, pp. 109-111.
- Schlumberger Ltd., 1972.-Log Interpretation, V.I, - - -
Principles. New York.
- Sears, F.W., 1976.-Fundamentos de Física, V.II Electrici-
dad y Magnetismo. Aguilar, Madrid.
- Segesman, F.; Tixier, M.P., 1959.-Some Effects of Invation
of the SP curve. Petroleum Transactions, --
AIME, V. 216, pp. 133-146.
- Segesman, F., 1962.-New SP Correction Charts. Geophysics,
V. XXVII, N. 8, Part I, pp. 815-828.
- Serra, O., 1984.-Fundamentals of Well-Log Interpretation,
V. I. Elsevier, Amsterdam.
- Silva, P.; Bassiouni, Z., 1981.-A New Approach to the - -
Determination of Formation Water Resistivity
from the SP Log. SPWLA 22th Annual Logging-
Symposium, June 23-26, pp. 1-16.
- Silva, P.L.; Bassiouni, Z., 1983.-Applications of New SP
Interpretation Charts of the Gulf Coast - -
Louisiana Fields. The Log Analyst, March --
April, pp. 12-15.
- Smits, L.J.M., 1968.-SP Log Interpretation in Shaly - -
Sands. Society of Petroleum Engineers Jour.
June, pp.123-136.
- Veneziani, I.; Colombo, V.; Pirson, S. J.; Broome, M.B.,
1972.-The Redox Log. SPWLA 13th Annual - -
Logging Symposium Trans. May 7-10.

- Winsaver, W.O.; Mc Cardell, W.M., 1953.-Ionic Double - -
Layer Conductivity in Reservoir Rock. AIME-
Trans., V. 198.
- Worthington, A.E.; Meldau, R.F., 1958.-Departure Curves-
for the Self-Potential Log. Petroleum - - -
Transactions, AIME, V.213, pp. 11-16.
- Wyllie, M.R.J., 1949.-Statistical Study of Accuracy of -
some Connate-Water Resistivity Determinations
Made from Self-Potential Log-Data. Bull. of
the American Assoc. of Petrol. Geol., V.33,
N.11, pp. 1892-1900.
- Wyllie, M.R.J., 1951.-An Investigation of the Electro - -
kinetic Component of the Self Potential - -
Curve. AIME Trans., V. 192.