



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**Registros Geofísicos y su Utilidad en la
Exploración Geohidrológica**

T E S I S

Que para obtener el título de :

INGENIERO GEOFISICO

p r e s e n t a :

EDUARDO JUAYEK SOTELO

24.
11



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

C O N T E N I D O

	PAGINAS
I N T R O D U C C I O N	1 - 3
C A P I T U L O I	
I.1).- BREVE HISTORIA DE LA GEOFICA DE POZOS.	4 - 9
I.2).- UTILIDAD DE LOS REGISTROS EN LA EXPLORACION DE LOS RECURSOS NATURALES.	10
A).- EXPLORACION PETROLERA	10
B).- EXPLORACION MINERA	11 - 13
C).- EXPLORACION GEOTERMICA	13 - 14
D).- EXPLORACION GEOHIDROLOGICA	14 - 18
C A P I T U L O II	
II).- REGISTROS GEOFISICOS PARA POZOS DE AGUA	
II.1).- FUNDAMENTOS	19 - 26
II.2).- RESISTIVIDAD DE AGUAS NATURALES	26 - 27
II.3).- RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS	27 - 30
II.4).- FACTOR DE FORMACION	30 - 31
II.5).- CLASIFICACION DE FORMACIONES ACUIFERAS	31 - 33

	PAGINAS
11.6).- RELACIONES ENTRE LOS TIPOS DE FORMACIONES Y SUS VALORES DE-RESISTIVIDAD.	33 - 35
11.7).- POROSIDAD	35 - 36
11.8).- VARIACION DE LOS PARAMETROS A y m.	36 - 38
11.9).- VARIACION DE R _t EN ACUIFEROS - COMPLEJOS.	38 - 39
11.10).- ACUIFEROS GRANULARES ARCILLOSOS	39 - 40
11.11).- INDICE DE RESISTIVIDAD	40 - 41
11.12).- INFLUENCIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION	41 - 43

C A P I T U L O I I I

111.1).- REGISTROS ELECTRICOS	44 - 47
111.2).- CURVA DE POTENCIAL NATURAL	47 - 56
111.3).- REGISTRO DE RESISTIVIDADES	56
111.3.1).- HERRAMIENTA MONOELECTRODO	56 - 58
111.3.2).- CURVA DE RESISTENCIA ELECTRICA	58 - 62
111.4).- HERRAMIENTA MULTIELECTRODO	62 - 63
111.4.1).- PRINCIPIO ELECTRICO	63 - 64
111.4.2).- ARREGLO NORMAL	64 - 66
111.4.3).- ARREGLO LATERAL	66 - 67

	PAGINAS
III.4.4).- DEFORMACIONES DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD	67 - 70

C A P I T U L O IV

IV.- REGISTROS RADIATIVOS	71
IV.1).- CURVA DE RAYOS GAMMA	71 - 72
IV.1.1).- PROPIEDADES DE LOS RAYOS GAMMA	72
IV.1.2).- EQUIPO	72 - 73
IV.1.3).- RADIOACTIVIDAD DE LAS ROCAS	73 - 74
IV.1.4).- INTERPRETACION DE LA CURVA DE RAYOS GAMMA	74 - 75
IV.1.5).- INTERPRETACIONES DIFICILES	75
IV.1.6).- USOS PRINCIPALES DE LA CURVA DE RAYOS GAMMA	75 - 76
IV.2).- PERFIL NEUTRONICO	76 - 77
IV.2.1).- FUNDAMENTO DEL METODO	77 - 78
IV.2.2).- EQUIPO	78 - 79
IV.2.3).- APLICACIONES EN POZOS DE AGUA	79

C A P I T U L O V

V.1).- ANALISIS DE REGISTROS EN POZOS DE AGUA	80 - 82
V.2).- INTERPRETACION CUANTITATIVA	83 - 84

	PAGINAS
V.2.1).- DETERMINACION DE LA CALIDAD DEL AGUA. (R_w)	84 - 88
V.2.2).- DETERMINACION DE (R_w) POR MEDIO DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD.	88 - 92
V.3).- DETERMINACION DE LA POROSIDAD	92 - 93
V.4).- ESPESORES PERMEABLES	93 - 94
V.5).- INTERPRETACIONES DIFICILES	94 - 95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96 - 97
B I B L I O G R A F I A	98 - 99

I N T R O D U C C I O N

En la exploración de aguas subterráneas, se aplican métodos indirectos para auxiliarse en la búsqueda y explotación de éste recurso natural.

La geofísica de pozos tiene una parte muy importante en el proceso de investigación de aguas subterráneas, el objetivo de éste trabajo es mostrar las diferentes herramientas que se aplican y se pueden aplicar para obtener la información necesaria de formaciones con posibilidades de ser acuíferos.

Se presenta una breve historia de la geofísica de pozos, de manera cronológica se muestra como fueron apareciendo las herramientas y para que fin se usaron. Teniendo su primera aplicación para la exploración de hidrocarburos; es la razón de porque en la industria petrolera ha tenido su más amplio desarrollo.

Para la exploración geohidrológica su aplicación es más restringida, por el tipo de inversión que se hace para localizar acuíferos, siendo muy pequeña comparada con la que se realiza en la exploración petrolera; por ésta razón también no es posible utilizar todas las herramientas que existen para evaluar un yacimiento petrolero, pero con un pequeño programa de registros podemos cuantificar los acuíferos de una perforación.

De manera breve se menciona la aplicación de la geofísica de pozos en la exploración de recursos naturales, desarrollando de manera más amplia la aplicación en la investiga-

ción de recursos geohidrológicos, por ser el fin de ésta tesis- para lo cual se presentan los fundamentos del método, para re-- registros de resistencia y resistividad eléctrica, así como los - registros radioactivos gamma y neutrón.

La manera del desarrollo de éste trabajo fue partien-- do de los fundamentos teóricos mencionandose las característi-- cas petrofísicas de formaciones acuíferas, porosidad, factor de formación, arcillosidad, límites de las calidades de aguas y sus usos, influencia de los flúidos de perforación y la diferencia- que existe del caso petrolero al geohidrológico.

Con ésta información preliminar se pasa a los regis- tros de resistividades, los que van acompañados de la curva de- potencial espontáneo SP, mencionandose al principio de ésta cur- va, la información que se obtiene de ella y su interpretación.- Los registros de resistividad dependiendo de la herramienta usa- da pueden ser de resistencia eléctrica, para una monoelectrodo- y de resistividad para una multielectrodo.

Las curvas obtenidas con éstos métodos son la de re-- sistencia eléctrica, resistividad normal y resistividad lateral- o inversa; explicandose el principio teórico y la información ob- tenida, así como la interpretación de las mismas.

Las herramientas radioactivas que se tratán en éste - trabajo son la curva de rayos gamma y la neutrón, la más usada - es la curva de rayos gamma, de la cual se menciona su principio- teórico, su aplicación e interpretación; para la curva neutrón - se propone como una herramienta que puede dar información valio- sa para la interpretación de los registros eléctricos, desgracia

damente es costosa y no se aplica para la investigación de --
aguas subterráneas.

Finalmente se presentán dos ejemplos de interpreta---
ción determinandose la calidad de agua de formación por medio -
de la curva de SP y de las curvas de resistividad, espesores --
permeables y cálculos tentativos de porosidad.

El motivo por el cual se escogió éste tema, es por -
la falta de información que existe al respecto, por lo que se -
trató de reunir la información necesaria para tener una manera-
sencilla de interpretar perfiles de pozos de agua.

C A P I T U L O I

1.-1 BREVE HISTORIA DE LA GEOFISICA DE POZOS.

La aplicación de la geofísica a la geohidrología es muy reciente, debido a que su primer uso se aplicó en la industria petrolera, por ser ésta más costosa y la necesidad de tener más información de la corteza terrestre, para dar localizaciones favorables para explotar hidrocarburos, por medio de mediciones en la superficie.

El Ingeniero Conrad Schlumberger, que hacia trabajos de prospección eléctrica, un día platicando con sus compañeros de trabajo de los problemas técnicos que tenían en la perforación de pozos, le surgió la idea de aplicar los métodos eléctricos a dichas perforaciones.

Teniendo la oportunidad de hacer su experimento en un pozo el 5 de septiembre de 1927, en el campo de Pechelbronn, - - Francia, utilizando el equipo más indispensable hizo lo que se considera el primer registro de pozo.

Este registro constó de una sola curva que representaba las resistividades de las paredes del pozo a profundida, haciendo mediciones con un arreglo lateral de 4 electrodos a intervalos de profundidad de un metro, con un espaciamento de medida de un metro y los electrodos de corriente a 3.5 metros, obteniendose de ésta manera la gráfica de resistividad contra profundidad. (Fig. 1.1).

Tiempo después se comercializó éste servicio, pues - era una herramienta con la cual se obtuvo más información de -- los pozos, correlacionandose unos con otros.

En 1928 se ofreció en forma comercial en Francia, Ve nezuela y Estados Unidos de América; en 1929 en Rusia y en 1930 en Medio Oriente.

El equipo se fué perfeccionando con el uso de mejo-- res cables de varios conductores, medición continua de la pro-- fundidad, colector giratorio, etc.; estandarizándose el registro de una sola curva que se le conoció con el nombre de Registro - Eléctrico, constando de una curva lateral de dos metros de espa-- ciamiento, usándose principalmente para correlación y control - de profundidad.

Pierre Bagle, gerente de operaciones de la compañía Schlumberger en Venezuela y Trinidad Tobago, observó que exis-- tían potenciales en las paredes del pozo, pensando que la causa de los mismos podría ser que los electrodos se polarizaran; pa-- ra solucionar éste problema se usó un pulsador en la corriente, no obstante que se mejoró mucho el resultado, seguía existiendo un potencial sin conocer la causa de donde provenía. Los instruy-- mentos que usaron para registra éstas señales eran circuitos po-- tenciométricos provistos de galvanómetros, los cuales vibraban-- en la presencia de arenas empacadas en arcillas y saturadas de-- petróleo o gas.

Los hermanos Schlumberger explicaron que éstas vibra-- ciones se debían a un potencial natural propio de las formacio-- nes geológicas, por lo cual decidieron registrarlo, notando que

no solo se presentaba en las arenas, sino también en las demás formaciones.

Diseñaron un filtro especial para quitar el efecto de potencial natural a las mediciones de resistividad, las cuales se veían afectadas por la presencia de éste; así se sumó -- otra curva al registro eléctrico que fué la del potencial natural que se le designó con las siglas S.P.

En 1938 Conrad Schlumberger obtuvo una patente francesa para el uso del S.P. observando que con esta curva se localizaban estratos permeables, utilizandola en 1931.

Posteriormente se observó que la curva lateral no correlacionaba en profundidad con el muestreo mecánico de la perforación comprobándose ésta situación en una perforación para localizar capas de carbón. Se detectó que un arreglo lateral estándar, en el muestreo de la perforación no correspondían con los cambios en los valores de la curva, por lo que, confundieron a los técnicos y decidieron que los resultados eran incorrectos.

Conrad Schlumberger investigó el problema y reconoció que la interpretación no era verídica pues él conocía las zonas y sabía el lugar donde se localizaban las capas de carbón.

La solución que le dió al problema fué con un arreglo normal de electrodos, con el cual podría localizar dichas capas, por tener los electrodos de corriente y medida un espaciamiento más corto, ya que la curva tiene menos deformaciones y representa las resistividades de la pared del pozo sin desplazamiento.

A finales de 1931 el registro eléctrico se estandarizó con dos curvas, una de potencial natural y una normal corta; en sustitución de la lateral que se empleo en los inicios de esta ciencia. Los equipos usados en ésta época todavía se operaban manualmente.

Así fue como el uso del registro se incrementó mucho en 1932, dando comercialmente este servicio varias compañías, - obteniéndose gran información en capas consolidadas y semiconsolidadas para la evaluación de las mismas; pero en otras condiciones tenía sus limitaciones, unas conocidas y otras no, como el caso de estratos con resistividades excesivamente altas, en pozos que tenían lodos muy salados o preparados a base de aceites, el grado de invasión en la formación, por lo que las mediciones de resistividad se consideraban aparentes y otras que se debían al diámetro del agujero.

Esto ocasionó que se experimentara más, para encontrar nuevas herramientas que solucionaran estos problemas. Apareciendo la curva normal larga, la cual tenía un espaciamiento más grande y nos representaba la resistividad de la zona invadida, pudiendo hacerse así la interpretación con otra curva simétrica que se le adicionó en 1934 al registro convencional, encontrando en la mayoría de los casos que la invasión era muy grande. Esta curva nos daba la resistividad de la zona invadida.

También era necesario conocer la resistividad de la formación libre de fluidos extraños a ella, introduciéndose en 1936 la curva lateral de 4 electrodos, conociéndose la resistividad verdadera de la formación saturada de sus propios fluidos.

Por lo tanto en 1936 el registro convencional constaba de las siguientes curvas: potencial natural (S.P.), normal - corta, normal larga y lateral. Teniendo más posibilidades de conocer zonas permeables por la manifestación del S.P. y con la - interpretación cuantitativa de las tres curvas de resistividad, se conocía la invasión del filtrado de lodo, el enjarre y la zona no alterada.

Así fué como el registro eléctrico se usó durante mucho tiempo realizándose grandes avances en lo que a la operación se refiere; el uso de nuevo equipo que era menos susceptible al registro humano, apareciendo en 1953 registradores automáticos con cámara fotográfica. Fué de este modo como desaparecieron los equipos manuales. Las técnicas y espaciamientos de medición no cambiaron, hasta que con el tiempo fueron obsoletas con la aparición de nuevas herramientas.

En 1940 apareció el registro de rayos gama que medía la radioactividad natural de las formaciones, teniendo la ventaja de no importar el tipo de fluido de perforación o si el pozo estaba o no entubado, por lo que es una herramienta con menos limitaciones.

En 1941 surge el registro neutrón-gama, también radioactivo, con la variación de que las formaciones eran bombardeadas con una fuente de neutrones, midiendo la radioactividad remanente con un contador Geiger.

En 1947 se aplica por primera vez el registro de inducción, el cual nos permitía conocer la resistividad de la formación en pozos entubados o con lodos de perforación preparados a base de aceite o agua dulce.

En 1948 el Microlog es introducido por Schlumberger-
obteniéndose la resistividad de la zona invadida con un espacia-
miento de 1.5", apareciendo los patines en las sondas, los cua-
les permitian un contacto directo con el enjarre del pozo.

En 1951 se incluyó el Microlaterolog que medía la re-
sistividad de la zona de transición, en 1954 aparece también el
registro sísmico introducido por Seismograph Service Corporation,
después de lo cual la geofísica progresa grandemente, aparecien-
do nuevas herramientas como registro de densidad de formación, -
de emisión de echados, tiempo de degradación termal, caliper, -
desviación de pozos, temperatura, etc.

En la industria petrolera el uso de todas estas he-
rramientas es justificado por el gran costo de estas obras.

En lo que a la geohidrología se refiere su uso es --
más limitado y en algunos casos no lo usan, por tratarse de o-
bras menos costosas. Pero en la actualidad la explotación de a-
guas subterráneas se hace cada vez más difícil, por lo que se -
aplican algunos de éstos registros como el eléctrico de dos cur-
vas y en algunas ocasiones el de tres.

1.-2 UTILIDAD DE LOS REGISTROS EN LA EXPLORACION DE LOS RECUR-- SOS NATURALES.

En la actualidad la crisis de energéticos es un problema a nivel mundial, siendo necesario buscar nuevas fuentes de energía. La geofísica tiene un papel muy importante para la localización y explotación de éstos recursos, ya que todos ellos deben ser obtenidos de la corteza terrestre. Haciéndose necesario el buen aprovechamiento de ellos por ser recursos no renovables, y vitales para el desarrollo de los grupos humanos. Se presenta en forma global y breve la utilidad de los registros geofísicos en la exploración de éstos recursos.

A).- Exploración Petrolera: Es en ésta rama donde la geofísica se ha desarrollado más por ser la industria petrolera muy costosa y sus inversiones muy elevadas, además es importante tener la seguridad de la presencia de hidrocarburos explotables para lo cual la geofísica, geología, geoquímica, etc., son necesarias en la localización de yacimientos petrolíferos.

La geofísica en la exploración petrolera, realiza trabajos en superficie como gravimetría, sismología y geoelectrónica; uniéndose toda la información se realiza la interpretación de un área dada, en la cual se señalan los puntos que tienen más posibilidades, en los que se hacen pozos exploratorios a profundidades recomendadas por lo estudios antes mencionados.

Es en este momento cuando los registros geofísicos van a dar la última palabra de la presencia o ausencia de hidrocarburos, para lo que existen una infinidad de herramientas pa-

ra corroborar lo anterior.

Por ésto los registros de pozos son indispensables - en la industria petrolera y en la que han tenido su más amplio desarrollo. Apareciendo nuevas técnicas de medición de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las formaciones, para que con la mayor información se pueda evaluar el yacimiento.

Se presenta una tabla para programar registros y análisis en pozos petroleros, indica las condiciones que debe tener el pozo, la información obtenida y tipo de formación. (fig. 1.2.)

Cuando se conocen los datos necesarios se puede evaluar el potencial de hidrocarburos de una exploración positiva, de esta manera los registros geofísicos son indispensables en la industria petrolera.

B).- Exploración minera: La minería se ha realizado desde tiempos muy remotos, explorándose yacimientos que se encontraron a flor de tierra, pero en la actualidad dichos yacimientos se están agotando. La geología ha cooperado encontrando nuevos depósitos minerales, pero cada vez se hace más difícil, pues los afloramientos minerales filones o manifestaciones en superficie de minerales es cada vez menos frecuente; es por esta razón que la geofísica viene a dar a la prospección minera - un giro con la cual se pueden localizar zonas con probabilidades, aunque en superficie no existen manifestaciones minerales ya que se pueden desechar zonas estériles, de zonas con posibilidades; por estarse midiendo propiedades físicas propias de estos depósitos, a diferencia de la prospección petrolera, en la cual se buscan estructuras con características propias para al-

macenar hidrocarburos.

La interpretación de este tipo de prospección, se basa en principios físicos que nos relacionan los minerales ferromagnesianos, con sus propiedades físicas como son su susceptibilidad magnética, conductibilidad eléctrica, densidad, etc., en contraste con las rocas encajonantes o materiales diseminados.- Cuando se ha localizado una zona con posibilidades de minerales se pasa a la etapa de la exploración directa por medio de perforaciones, comprobándose dicho estudio.

En este momento cuando la geofísica de pozos, viene a colaborar para situar a profundidad las mineralizaciones, - - cuantificar el yacimiento, correlacionar, mapear, etc., hasta tener toda la información necesaria para explotar el yacimiento.

El tipo de herramientas que se usan en registros para sondeos mineros, es más reducida que en la industria petrolera, por las propiedades que se quieren conocer; para esto se -- realizan registros como el eléctrico o el de inducción, los cuales localizan los espesores de baja resistividad; dicho de otra manera de alta conductibilidad, los dos son buenos, aún cuando el de inducción tiene más resolución por medir conductibilidad eléctrica, ya que los minerales tienen la propiedad de ser buenos conductores eléctricos. Estos dos registros son indispensables, si se quiere conocer la mineralogía es necesario realizar una serie de registros como el de densidad, compensado con un neutrón epitermal, con un sónico de porosidad, o el neutrón epitermal con el sónico de porosidad; los que al hacerles la interpretación cuantitativa nos darán la personalidad total, la porog

alidad aparente y la identificación mineralógica, así como su concentración. Estos registros se recomiendan en mineralizaciones - que están diseminadas.

C).- Exploración geotérmica: Siendo la geotermia una de las fuentes de energía que últimamente se está aprovechando - en México por estar situado geográficamente en una zona altamente volcánica tiene grandes perspectivas de desarrollo, prueba de ello es la planta geotérmica de Cerro Prieto B.C., utilizada para la producción de corriente eléctrica. La exploración de este tipo de zonas se basa principalmente en manifestaciones en superficie, como son la presencia de manantiales termales, geysers, - cráteres volcánicos, etc.. La geofísica también auxilia en este tipo de estudios para la localización de éstas zonas realizándose estudios en superficie como: sismología, gravimetría, geoelectrica y geomagnetismo, los cuales nos dan la información de la - presencia de cuerpos calientes, factibles de ser productores de vapor.

Posteriormente se prosigue a la perforación de pozos-exploratorios, es en éste momento donde interviene la geofísica de pozos, corriéndose principalmente los registros de temperatura, resistividad, inducción, sónico, T.V. de agujero, etc., los cuales nos dan la información necesaria del reservorio tales como la presencia de vapor, zonas calientes, tipo de litología, -- etc., con esta información se evalúa la exploración si es o no - positiva.

Si el pozo es productor de vapor caliente a alta presión, se utilizará para el movimiento de turbinas las que generen energía eléctrica o para otros tipos de usos como calefacción,

con el tratamiento de aguas residuales se pueden usar para riego o uso industrial.

A grandes rasgos ésta es la utilidad de la geofísica en la exploración de recursos geohidrológicos que es el tema que se tratará de desarrollar en los capítulos siguientes.

D).- Exploración geohidrológica: El agua es un elemento vital para la existencia de cualquier ser vivo, siendo indispensable para el desarrollo de las actividades humanas. Las fuentes que proveen de éste líquido son cada vez más escasas o están contaminándose a tal grado que no sirven para las actividades antes mencionadas; el causante de estos desequilibrios es principalmente el hombre, por el mal aprovechamiento que ha hecho de este recurso. En México, el problema también se deja sentir, ya que nuestro País es semidesértico en su mayoría, contando con recursos hidráulicos muy mal distribuidos, ya que el 60% de ellos están concentrados en el sureste del país, donde se encuentran los ríos más caudalosos; otro problema que tenemos es la mala distribución de los asentamientos humanos, por lo que es muy difícil o muy caro dotarlos de agua, prueba de ello es la Ciudad de México, que a 2 300 mts. de altitud, con una población de 13 millones de habitantes en la zona metropolitana, con un índice de natalidad del 5.7% anual en ésta zona; tiene un suministro de agua de 43 metros cúbicos por segundo el que proviene de fuentes como el río Lerma, pozos en el Valle de Toluca; pozos de la Comisión de Aguas del Valle de México en Tizayuca, periferico, etc., son las que provocan ésta gasto.

Este panorama no es alentador, primero por la situación geográfica de la ciudad y por la explosión demográfica, que

junto con las necesidades crecen en forma exponencial y para el año 2000 se requerirá un gasto muy grande aproximadamente de 100 metros cúbicos por segundo si no se hace algo por controlar este crecimiento. El problema se está dejando sentir en ciudades que están teniendo grandes concentraciones de asentamientos humanos, como son Monterrey, N.L., que para su dotación de agua se tuvieron que hacer pozos de 1000 m. a 1500 m., que son de los más profundos en el mundo para éste fin; Guadalajara, Jalisco, ciudad de más de tres millones de habitantes y otras que están creciendo desmesuradamente por su desarrollo industrial, comercial y agrícola.

De la misma manera que el agua es necesaria para el consumo humano, es indispensable para la agricultura y la industria. Lo que respecta a la agricultura, el país consta con presas y pozos para riego, no obstante la mayor parte de la agricultura se realiza con agua de temporal, siendo una manera que no garantiza las inversiones de los agricultores, limitándolos a un solo cultivo anual. Por ésta razón es necesario abrir nuevas áreas de riego, por medio de presas y pozos.

En la industria su uso es necesario, por ejemplo la industria siderúrgica, que para producir un kilo de fierro se necesitan tres metros cúbicos de agua. Para recuperación secundaria de hidrocarburos, plantas termoeléctricas, y en casi todos los procesos industriales se requiere de su uso.

La geofísica tiene mucha importancia en la búsqueda de éste recurso, especialmente en la localización de mantos acuíferos subterráneos para lo cual se tienen que realizar los pasos siguientes:

- 1). Exploración superficial.
- 2). Exploración directa.
- 3). Explotación.

1). Exploración superficial: El conjunto de estudios que se realizan en superficie como son los de la geología, drenaje, precipitación fluvial, áreas de captación, geofísica, etc., nos proporcionan el estudio geohidrológico preliminar.

Lo que respecta a la geofísica de superficie en este tipo de estudios, generalmente se utiliza el método geoelectrico, por ser el más costeable en éste tipo de estudios y el que nos proporciona la información más adecuada de las propiedades físicas de la estructura en estudio, como son: el tipo probable de rellenos, espesores de las capas, calidad de el agua de saturación, forma aproximada de la estructura del subsuelo, etc.. Se pueden usar otros tipos de prospección como la sísmológica y la gravimétrica, solo en casos complicados donde las características del terreno lo hacen necesario, como en terrenos formados de rocas densas como son: basaltos, calizas, etc., en las cuales se buscan zonas fracturadas y saturadas, en las que el método eléctrico no tiene gran resolución.

Ya que se realizaron los estudios necesarios en la etapa de interpretación se concluye con las localizaciones para perforar pozos exploratorios, los que nos corroboran dichos estudios preliminares.

2). Exploración directa: Se realiza haciendo pozos exploratorios a la profundidad recomendada por los estudios prelimi

nares, a los que se les corren uno o dos tipos de registros; éstos se tratarán con detalle en los capítulos siguientes por ser el objetivo de ésta tesis.

Correlacionando la información obtenida de los registros geofísicos con las muestras obtenidas en la perforación se dictamine si la exploración es positiva o no, en caso afirmativo el registro nos da la pauta para el proyecto de terminación al hacerse la interpretación del mismo.

3). Explotación: Contando con el proyecto de terminación se procede a ampliar el pozo, profundizar o terminar a una profundidad menor dependiendo de la interpretación del registro o registros corridos en el pozo.

Dependiendo de las necesidades y de la potencialidad de los acuíferos, se determina el diámetro de la tubería de producción y de los intervalos que llevará tubería ciega y tubería ranurada. Terminando el entubado del pozo, se procede al engravado, el cual es muy importante por actuar como un filtro, ya que un pozo mal engravado tendrá arrastres de arenas que perjudican al equipo de bombeo. Es necesario que la granulometría de la grava sea homogénea y con cierto grado de redondez, con un tamaño de 1 a 1.5 mm. para pozos en arenas, variando este tamaño dependiendo del tipo de rellenos en que se encuentra el pozo.

Posteriormente se hace la prueba de aforo, con la cual se obtiene el gasto óptimo que puede rendir el pozo. Conociendo datos de varios pozos, si se trata de una zona en la que se van a perforar más pozos, podemos predecir la profundidad y el número de ellos para satisfacer las necesidades requeridas.

En los capítulos siguientes se expondrá algunos ejemplos completos de estos trabajos.

C A P I T U L O I I

REGISTROS GEOFISICOS PARA POZOS DE AGUA.

Los registros geofísicos en pozos, son el método por medio del cual se obtiene información de las formaciones que se presentan en una perforación como: profundidad, espesores de capas, salinidad de agua de formación, así como características físico - químicas de las mismas.

Existen muchos tipos de registros geofísicos, pero en el desarrollo de la exploración de aguas subterráneas, no se puede absorber el costo de todos ellos, como los que se usan en la industria petrolera.

En la mayoría de los casos se satisface con un pequeño programa de registros, constituido principalmente por: el registro eléctrico de resistividad, y en algunas ocasiones el de rayos gamma. Para esto es indispensable tener conocimiento del área en estudio, así como un registro de la perforación, corte litológico, geología local y experiencia. Por lo que se presenta a continuación los principios teóricos, equipo e interpretación de las curvas obtenidas.

II.1.- FUNDAMENTOS.

El principio básico eléctrico es la ley de Ohm, que se define de la manera siguiente: "El flujo de una corriente eléctrica (I), en un conductor es proporcional a la diferencia de potencial (ΔE), causada por ese flujo". La constante de proporcionalidad se llama resistencia (R).

En forma de ecuación se expresa de la manera siguiente:

$$\Delta E = IR$$

Donde la diferencia de potencial se define como el -- trabajo, necesario de llevar una carga de un punto al otro, donde se está aplicando dicho potencial. La corriente eléctrica se define como el campo electromagnético producido en el conductor-- por flujo de cargas.

La unidad de resistencia es el ohm, y tiene como unidades volts/ampere.

De lo anterior concluimos que la resistencia es una -- propiedad intrínseca, que no sólo depende del material que conduce la corriente, sino también de las dimensiones del material. -- Por lo que se considera un conductor de resistencia (R), para obtener la resistencia específica de ese conductor, basta multiplicar por el área y dividir por la longitud. El resultado obtenido será una propiedad que caracterizará a dicho material, ya -- no dependerá de sus dimensiones, a esta propiedad se le conoce -- con el nombre de Resistividad. Expresándolo en forma de ecuación y haciendo un análisis dimensional tenemos lo siguiente:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Ohm} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad \text{Ohm} \cdot \text{m}$$

Donde A es el área de la sección transversal, L es la longitud del conductor, R es la resistencia eléctrica y ρ la resistividad.

La unidad de resistividad se define como la resistencia de un Ohm, que nos da un metro cúbico de material al medirla

entre caras opuestas, llamandose Ohm-m.

Al recíproco de la resistencia se le conoce con el -- nombre de conductancia, y se define como la facilidad que tienen los materiales de conducir una corriente eléctrica. La conductancia específica, se denomina conductibilidad, siendo esta la recíproca de la resistividad.

Entonces podemos decir que la resistencia eléctrica - de un material es la oposición que presentan los materiales al - paso de una corriente.

CLASIFICACION DE CONDUCTORES.

Existen tres tipos de conductores que podemos clasificar de acuerdo a la manera de transmitir la corriente los cuales son:

Conductores electrónicos

Conductores electrolitos

Conductores aisladores

Conductores electrónicos.- Se caracterizan porque al aplicarseles una diferencia de potencial en sus extremos los - - electrones de sus átomos se excitan, moviendose de unos a otros, originandose la conducción de la corriente. Los materiales que - presentan este tipo de conducción son los metales, siendo sus resistividades del orden de 10^{-8} Ohms-m, en la práctica de registros es poco usual encontrar este tipo de resistividades, sólo - en ocasiones muy especiales cuando se encuentran formaciones mineralizadas, o en aplicaciones como localización de tuberías aberiadas.

Conductores Electrolíticos.- Se basa en soluciones de sales, que se disocian eléctricamente, en iones (+) cationes y iones (-) aniones.

Al aplicar un campo eléctrico, unos y otros se ponen en marcha según el signo hacia los respectivos electrodos; la solución podría cambiar a través del tiempo, por depositarse en los electrodos los iones; para evitar éste fenómeno se utiliza un campo alterno, el cual evita la polarización de los electrodos.

Las soluciones electrolíticas hechas por adición de sales inorgánicas, su resistividad varía de 0.02 ohms-m a varios cientos de ohms-m, dependiendo de la concentración de sales del electrolito. Ya que una agua libre de sales se considera como un aislador teniendo resistividades del orden de 200,000 ohms-m.

Los conductores electrolíticos son muy importantes en la práctica de los registros eléctricos, ya que las formaciones se encuentran saturadas de agua que contiene algún tipo de sal, predominando los cloruros de sodio.

Dependiendo del tipo de concentración y de la temperatura del electrolito tendrá una resistividad que depende de los factores antes mencionados, la cual está íntimamente ligada con la concentración de sales. Siendo la razón por la cual conociendo la resistividad y la temperatura de un electrolito, podemos conocer de una manera rápida y sencilla la concentración de sólidos totales disueltos en él, sin llegar a tener un análisis químico extenso, pero es una manera rápida y sencilla de conocer la salinidad de aguas y por tanto su potabilidad, teniendo los si-

guientes límites de calidad de agua según el uso que se le va a dar:

Para procesos de alimentos y bebidas hasta	1000 ppm.
Para usos domésticos hasta	1500 ppm.
Para irrigación hasta	2500 ppm.

Este es un criterio general práctico, pero existen -- otros más detallados, de las características físicas y químicas del agua potable que son importantes mencionar para el control de la calidad del agua para usos humanos.

Características físicas	Límite superior.
Turbiedad	10 ppm
Color	20 ppm
Sabor	Cualquier admisible
Olor	Cualquier admisible
Características químicas	Límite superior en ppm.
Constituyentes.	
Plomo (Pb)	0.1 ppm.
Fluoruros (F)	1.5 ppm.
Arsénico (As)	0.05 ppm.
Selenio (Se)	0.05 ppm.
Cromo hexavalente	0.05 ppm.

Los límites de estas cinco sustancias son obligatorias, los siguientes son recomendables:

Cobre (Cu)	3.0 ppm.
Hierro (Fe) y manganeso (Mn)	0.3 ppm.
Magnesio (Mg)	125 ppm.

Zinc (Zn)	15 ppm.
Cloruros (Cl)	250 ppm.
Sulfatos (So)	250 ppm.
Fenoles	0.001 ppm.
Sólidos totales deseables	500 ppm.
Sólidos totales permitidos	1000 ppm.

Esto es importante porque puede darse el caso que el agua tenga el límite superior de concentración, la que en cierto momento la podríamos considerar potable, pero al realizarle un análisis químico, puede darse la posibilidad que exceda los límites de las cinco primeras substancias, que son obligatorios, o en un grado mucho mayor de las restantes recomendables. Por lo que ese líquido no podrá ser utilizado para el consumo humano.

Este tipo de análisis es muy importante que se realice con cierta regularidad, a los caudales que abastecen de este líquido a la población. Ya que pueden presentarse casos de contaminación, como consecuencia de una sobre-explotación de un acuífero se rompe el equilibrio hidrológico entre el agua dulce y salada, invadiendo el agua salada la zona de agua dulce, otro tipo de contaminación se puede presentar cuando en la zona de carga del acuífero se presentan elementos contaminantes como desechos industriales, aguas negras, etc.

La electroquímica nos ayuda en éste tipo de estudios de una manera sencilla y rápida, dándonos una idea de la calidad del agua conociendo su resistividad y temperatura.

Podemos conocer la concentración de sólidos totales disueltos de la solución, de la manera siguiente:

a).- Es necesario conocer la resistividad y la temperatura del líquido; ésta última debe de ser la que tenga el fluído en el momento que se le midió la resistividad.

b).- Corrección por temperatura: Es indispensable ya que la movilidad de los iones varía con la temperatura y por consiguiente su resistividad. Para esto se usa un monograma (Fig. - 11.1), el que nos da el factor de corrección de la resistividad a una temperatura constante que por lo general es 25°C, aunque - también se usan 20°C y 18°C; entonces en la gráfica en las absi-sas tenemos la temperatura y en las ordenadas el factor de corrección para obtener la resistividad a 25°C, bastará encontrar la - intersección de la temperatura con la función de variación de -- temperatura, y el valor obtenido en las ordenadas será el factor por el cual se multiplica la resistividad del fluido, para obtener otro valor de resistividad que es el que tendría ese líquido a 25°C.

Esta gráfica se obtiene de la fórmula siguiente:

$$\rho_T = \frac{\rho_o}{1 + 0.022 (T - T_o)}$$

Donde (ρ_T) es la resistividad a la temperatura (T), - (ρ_o) la resistividad a la temperatura de origen o de referencia, (T_o) que es 25°C; ésta fórmula aunque no es rigurosamente - exacta es válida dentro de las temperaturas normales, y nos indica que la resistividad de los electrolitos disminuye, con el incremento de la temperatura.

c).- Teniendo el valor de resistividad corregido por temperatura, pasamos a otro monograma (Fig. 11.2) que nos da la-

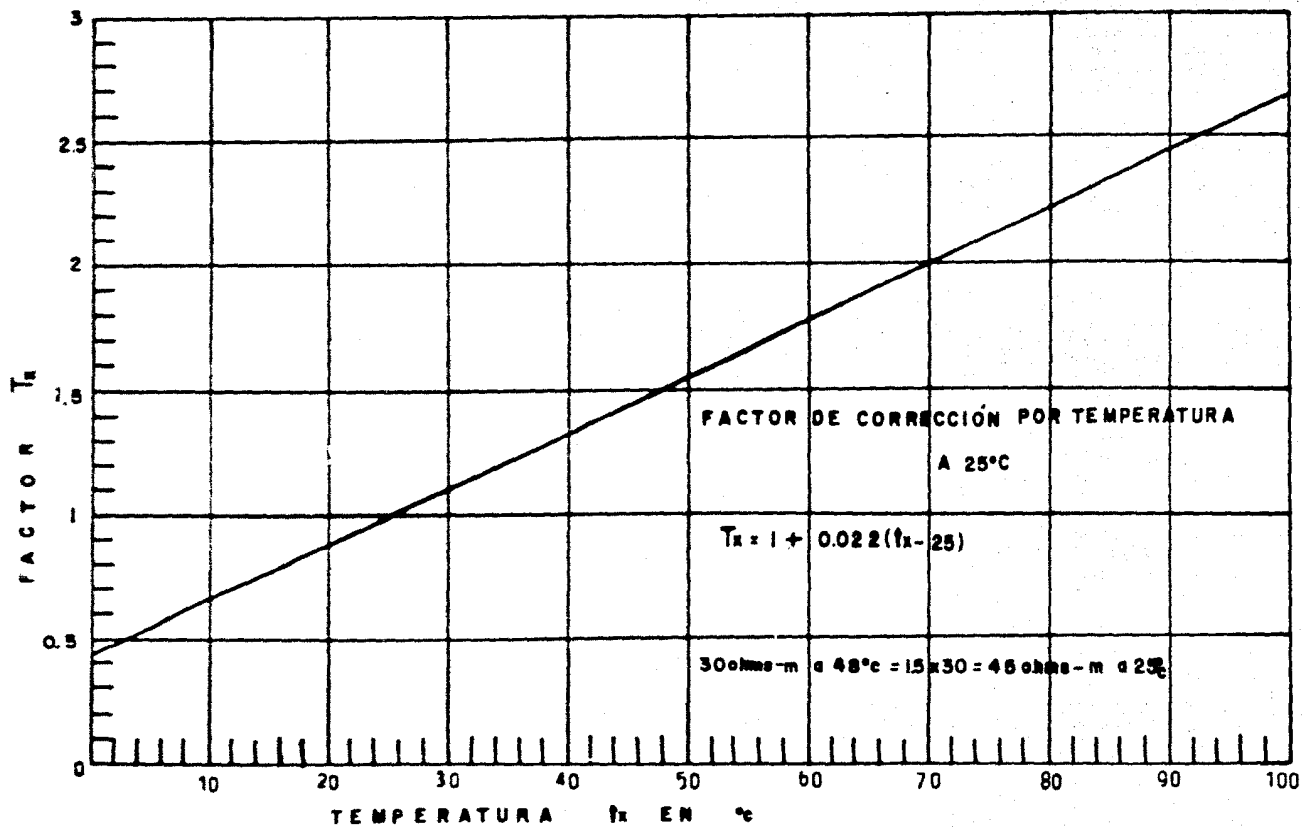
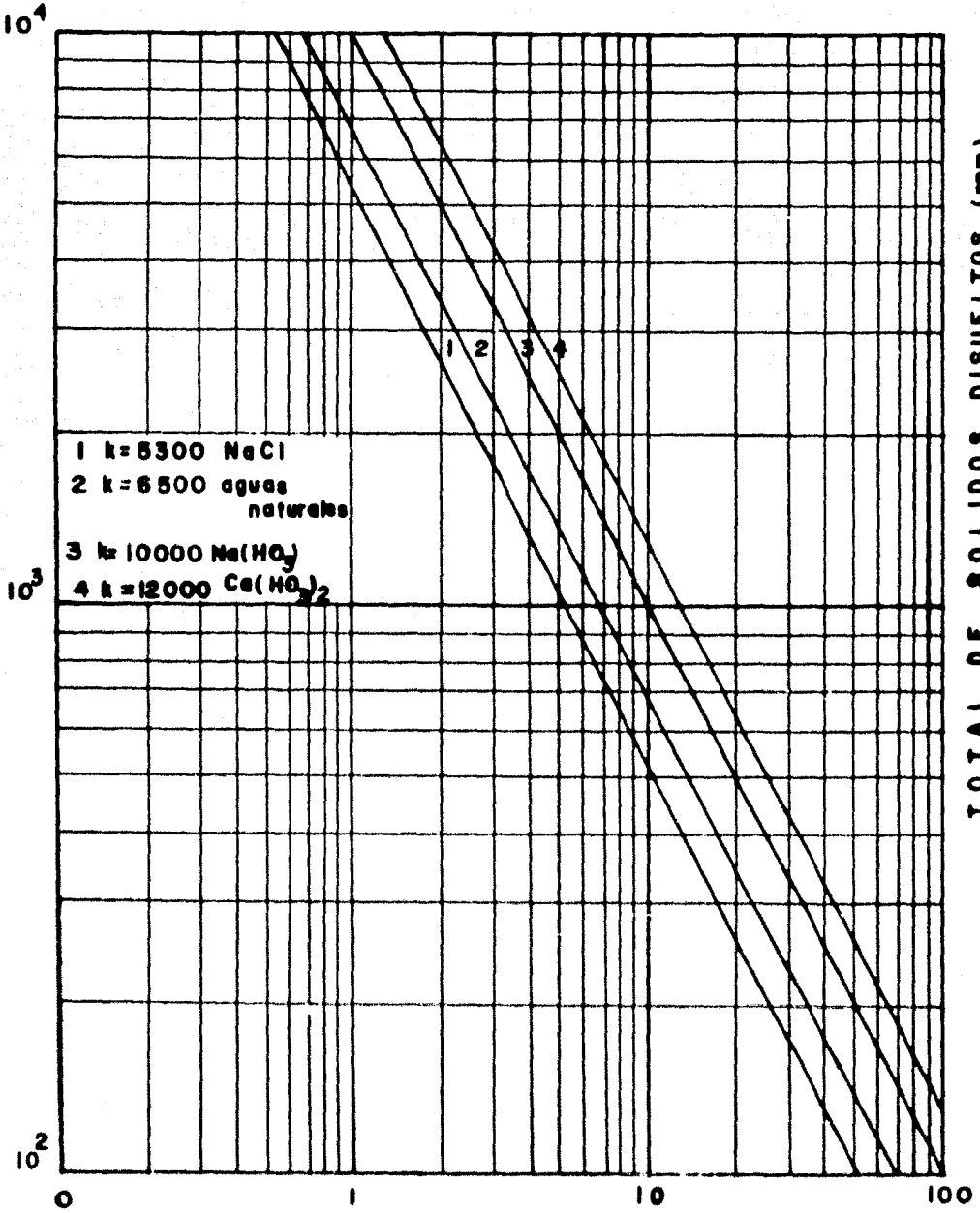


FIG. II-1

$$R_w = k / \text{ppm}$$



TOTAL DE SOLIDOS DISUELTOS (PPM)

R_w a 25°c

FIG. 11-2

concentración de sólidos totales disueltos en partes por millón. Para esto se busca el valor de resistividad ya corregido en las absisas, encontrando la intersección con la recta de aguas naturales, la de solución de cloruro de sodio o la de bicarbonato de sodio y en las ordenadas obtenemos la concentración del líquido en ppm.

Aisladores son aquellos materiales que para poder conducir una corriente eléctrica es necesario aplicarles una diferencia de potencial muy grande, para nuestro caso no son de interés por tener resistividad infinita y en una perforación no encontramos materiales de éste tipo; excepto el aire en pozos secos.

11.2.- RESISTIVIDAD DE AGUAS NATURALES.

Es importante conocer la variación de la resistividad de las aguas en el campo y saber que tipo de sales predominan; para esto tendremos en cuenta que la cantidad y tipo de sales depende de la naturaleza de las rocas con las que el agua haya entrado en contacto en su marcha por la superficie del terreno o subterránea. La cantidad de sales en las aguas puede oscilar entre 100 ppm y 35000 ppm, esta última corresponde a las aguas marinas, y es superada por algunas aguas de mina y por lagos salados, y mucho más por las que se encuentran en yacimientos petrolíferos.

La siguiente tabla nos da una orientación de la variación de la resistividad de las aguas naturales a 25°C:

TIPO	resistividad en ohms-m.
Agua de lagos y arroyos de alta montaña	10^3 a 3×10^3
Aguas dulces superficiales	10 a 10^3
Aguas salobres superficiales	2 a 10
Aguas subterráneas	1 a 10^2
Aguas de lagos salados	0.1 a 1
Aguas de mar	0.2
Aguas de impregnación de roca	0.03 a 10

Por lo general el tipo de sales predominante son los cloruros de sodio, no por esto es una regla general ya que se -- dan casos de pozos en calizas donde las sales que predominan son los carbonatos, como anteriormente se mencionó, dependen del tipo de roca y del viaje que tuvo el agua.

11.3.- RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS.

Si la resistividad de las rocas dependiera únicamente de los minerales que las constituyen, se considerarían como aislantes en la mayoría de los casos, ya que el silice, cuarzo, la calcita, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de rocas -- que estuvieran mineralizadas no se comportarían de esta manera.-

Afortunadamente no es así, todas las rocas tienen poros los cuales pueden estar ocupados total o parcialmente por -- electrolitos, por lo cual las rocas se comportan en conjunto como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los -- casos. Por lo que es necesario hablar de la resistividad de medios heterogéneos, los que en su caso más sencillo se comportan-

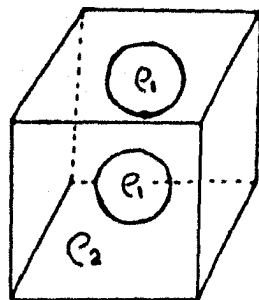
como dos materiales con resistividades (ρ_2) y (ρ_1), el primero es la matriz y el segundo se encuentra disperso en el interior - del primero.

El primero en afrontar éste problema fue J.C.Maxwell- (1891), para lo que demostró que la resistividad de esferas pequeñas distribuidas aleatoriamente en un medio de otra resistividad; obteniendo la ecuación siguiente:

$$\rho_{12} = \frac{2\rho_1 + \rho_2 + P(\rho_1 - \rho_2)}{2\rho_1 + \rho_2 - 2P(\rho_1 - \rho_2)} \rho_2$$

Donde (P) es la porosidad y (ρ_{12}) es la resistividad- del medio heterogéneo. Si denominamos $\rho' = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ la ecuación se reduce en lo siguiente:

$$\rho_{12} = \frac{2\rho' + 1 + P(\rho' - 1)}{2\rho' + 1 - 2P(\rho' - 1)} \rho_2$$

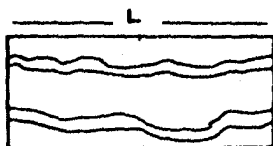


De la expresión anterior deducimos que el efecto del- valor de la resistividad de la matriz es predominante. Este modelo nos representa físicamente un acuífero granular, presentándo- se casos de acuíferos salobres en los cuales el valor de resistividad de la matriz será el que más se aproxime al del acuífero, - en su conjunto.

Ahora consideraremos un medio en el cual los poros -- están comunicados entre sí, entonces la resistividad de un acuí-

fero con estas características, disminuirá notablemente, siendo un fenómeno de gran importancia en rocas con conductos llenos de electrolitos, por lo que se considera de interés. Para esto se considera un medio de matriz aislante, en el que existe una red de conductos irregulares y tortuosos llenos de un electrolito, a los cuales se debe el valor de resistividad del conjunto.

Si tomamos un trozo de roca la cual tiene una longitud (L) y sección transversal (S) su resistencia eléctrica es: -



$$R = \rho_r \frac{L}{S}$$

Donde (ρ_r) es la resistividad media de la roca, pero la conducción se efectúa sólo a través de los poros, llenos de electrolito de resistividad (ρ_a), la ecuación anterior se transforma en:

$$R = \rho_a \frac{L_e}{S_e}$$

Donde (L_e) es la longitud efectiva media de los conductos y (S_e) la sección total de los mismos, que es el área efectiva desde el punto de vista eléctrico. Igualando las expresiones anteriores tenemos:

$$\rho_r = \rho_a \frac{L_e}{L} \frac{S}{S_e}$$

La relación $T=Le / L$ se llama tortuosidad que nos relaciona la longitud de la muestra. (PIRSON 1958) a la relación S / Se se le denomina coeficiente de disminución.

Como $S L$ es el volúmen total de la roca (V_r) y ($Se - Le$) es el volúmen ocupado por los poros (V_e) se define de entonces el concepto de porosidad P como la siguiente relación:

$$P = \frac{Se - Le}{S L} = \frac{V_e}{V_r}$$

Sustituyendo estos conceptos en la expresión para encontrar la resistividad de la roca tenemos:

$$\rho_r = \frac{T^2}{P} \rho_a = F \rho_a$$

Donde el coeficiente $F = T^2 / P$ se le conoce como factor de Formación (ARCHIE 1942), ésta relación muestra el efecto de resistividad aparente al obtener mediciones en formaciones acuíferas, es muy importante porque conociendo el factor de formación y la resistividad de la roca podemos calcular la resistividad del agua de formación.

11.4.- FACTOR DE FORMACION

De la deducción anterior podemos concluir que cuando en una formación sus espacios porosos están saturados con agua--

de resistividad R_w y la formación tiene una resistividad R_t se relacionan por la siguiente expresión:

$$R_t = F R_w \quad (1)$$

Donde la constante F es el factor de formación el cual depende como ya se mencionó de la tortuosidad y la porosidad.

El factor de formación se obtiene por mediciones de laboratorio y tiene la expresión siguiente:

$$F = \frac{A}{\phi^m} \quad (2)$$

Donde ϕ es la porosidad efectiva, A y m son constantes dimensionales que varían de roca a roca, dependiendo de la tortuosidad y la cementación de la misma. Por lo que es necesario tomar en cuenta como se presentan los acuíferos en las perforaciones para lo cual se presenta la clasificación de formaciones acuíferas.

11.5.- CLASIFICACION DE FORMACIONES ACUIFERAS

Los problemas que encontramos en la exploración de aguas subterráneas son muchos y los registros geofísicos nos ayudan a resolver buena parte de ellos, pero para interpretarlos correctamente es necesario conocer las formaciones, que se clasifican en la forma siguiente:

a).- Acuíferos granulares limpios.

Comprende las gravas, arenas, areniscas y rocas que-

tengan porosidad de tipo granular, con la condición de que no contengan minerales arcillosos en sus espacios porosos.

b).- Acuíferos granulares arcillosos.

Comprende a los acuíferos granulares, los cuales están formados parte por partículas granulares y parte por minerales arcillosos, que ocupan los espacios porosos.

c).- Acuíferos en fracturas.

Son aquellos que se encuentran en rocas fracturadas - no tienen porosidad de tipo granular y en las juntas no contienen material arcilloso, pero tienen porosidad secundaria.

d).- Acuíferos complejos.

Son aquellos que no tienen porosidad granular, secundaria y no tenemos una manera de cuantificar un ejemplo de este tipo de acuíferos, son: lavas fracturadas de manera irregular, - cavernas, disolución de calizas.

e).- Formaciones densas.

Son rocas que tienen muy poca o nada de porosidad efectiva, de las cuales no podemos obtener agua, ejemplo de estas formaciones:

Rocas carbonatadas, anidrita, yeso y margas.

Rocas ígneas como basaltos, riolitas y andesitas densas o rocas metamórficas.

f).- Arcilla.

Este grupo comprende las arcillas, lutitas y formaciones constituidas por partículas de grano muy fino. Ya que tienen

propiedades similares respecto a su comportamiento en los registros eléctricos y radioactivos.

Este tipo de formaciones tienen alta porosidad de tipo granular, pero poca permeabilidad que para nuestro objetivo - es lo más importante.

Para nuestras consideraciones las formaciones a, b, c, d, y f están totalmente saturadas de agua.

11.6.- RELACIONES ENTRE LOS TIPOS DE FORMACION Y SUS VALORES DE RESISTIVIDAD.

Un acuífero limpio se compone por fragmentos de roca no conductora, que forman un esqueleto, el cual está saturado de agua; la resistividad del conjunto dependerá de los siguientes factores:

1. La resistividad del agua de saturación
2. De la porosidad
3. La resistividad de las partículas que forman el acuífero.
4. La distribución y continuidad del agua contenida en los espacios porosos.

Estas condiciones están ligadas por las expresiones - (1) y (2) antes mencionadas.

Haciendo las siguientes consideraciones:

a).- La resistividad del agua de formación R_w , decrece cuando la salinidad se incrementa.

b).- A una temperatura dada, la resistividad del agua, se relaciona con el contenido de sólidos totales disueltos en ella en ppm. con la siguiente expresión:

$$R_w = \frac{K}{\text{ppm.}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

Donde K es un factor de proporcionalidad para una sal dada, para nuestro caso tendremos salinidades (menos de 3000 ppm) en la mayoría de los casos baja.

La K que se usa para aguas dulces es de 6500 a 25°C - como se muestra en la figura 11.2.

c).- La resistividad del agua decrece cuando la temperatura aumenta. Pero éste efecto es pequeño del orden del 2% por grado después de los 25°C.

11.6.1.- ACUIFEROS GRANULARES LIMPIOS.

Para formaciones granulares limpias que tienen buena porosidad, expresada en (%), de la ecuación (2) A y m. tienen valores según el tipo de formación; para formaciones poco o no cementadas $A = 0.62$ y $m = 2.15$, para formaciones cementadas - - - $A = 1$ y $m = 2$.

Si relacionamos las expresiones (1), (2) y (3) tenemos:

$$R_t = \frac{A}{\rho^m} \frac{K}{\text{ppm}} \quad \text{-----} \quad (4)$$

Obtenemos la gráfica para valores de $A = 0.62$ y - - - $m = 2.15$ para distintos valores de R_t y con distintas concentra-

ciones; variando ϕ en (%), para $K = 6500$ constante. (Fig. 11.4)

La gráfica (Fig. 11.3) nos relaciona el factor de formación para formaciones consolidadas y poco cementadas (HUMBLE).

11.7.- POROSIDAD.

La porosidad de un material se define como la relación que existe entre el volúmen de vacíos, entre el volúmen total de la muestra.

Es necesario tener conocimiento de como varia éste parámetro, en las formaciones acíferas para poder conocer el factor de formación de una manera más eficaz.

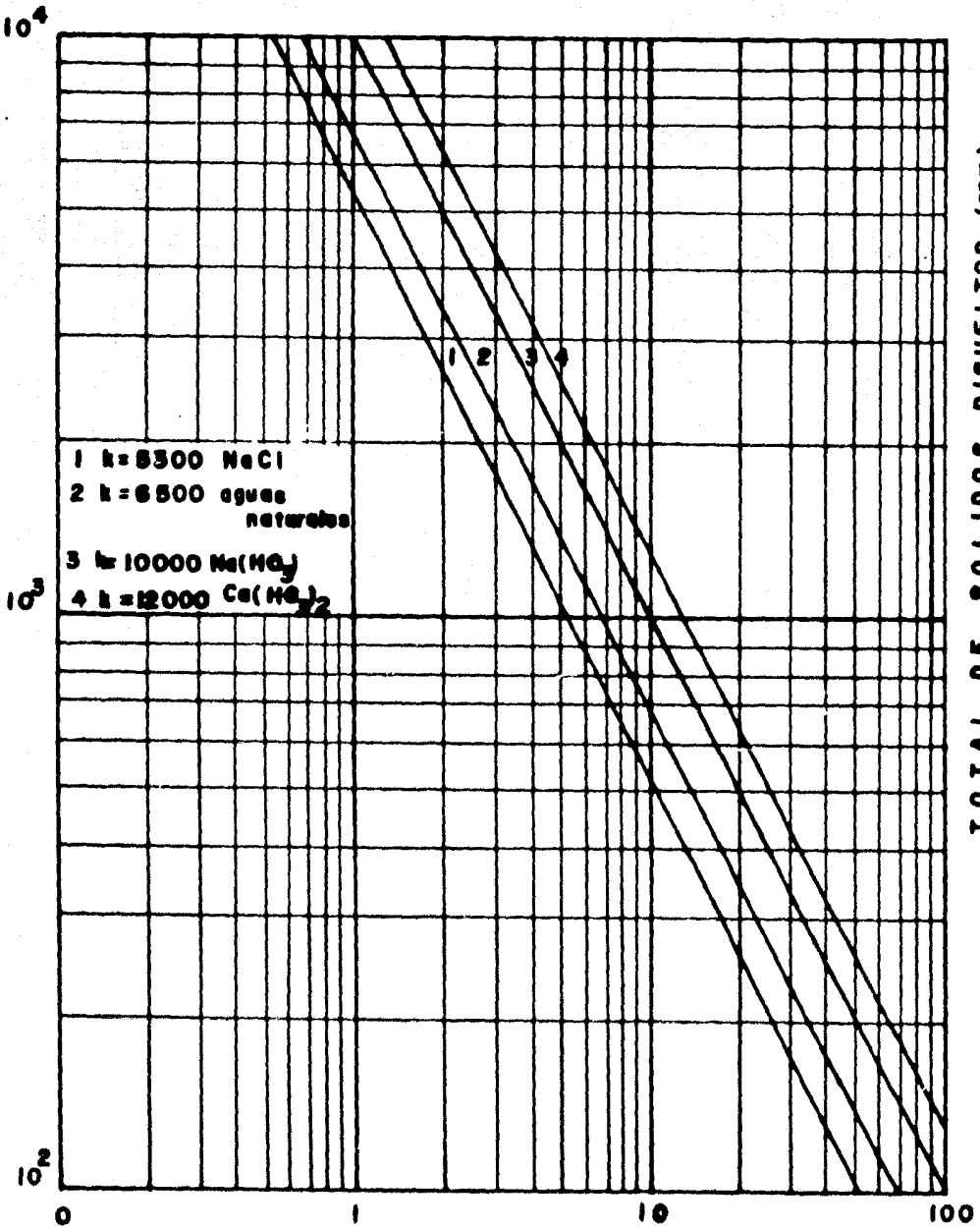
Como se ha mencionado la resistividad de una formación del electrolito o arcilla que ocupen los espacios vacíos; por lo que el conocimiento de la porosidad en los cálculos es indispensable.

Existen otros tipos de porosidad debida a las fisuras o diaclasas, la cual no excede el volúmen total en un 2%. A éste tipo de porosidad se le conoce como porosidad secundaria de las rocas.

Las rocas que tienen porosidad de tipo granular predomina en rocas de origen clástico y la de tipo secundario predomina en rocas ígneas y de origen químico.

Keller y Prischknech (1966) definen la porosidad vugular, que está constituida por cavidades grandes y irregulares, como las que encontramos en la disolución de calizas, clasificando los poros de dos clases:

$$R_w = k / \text{ppm}$$



R_w e 25°C

FIG. 11-2

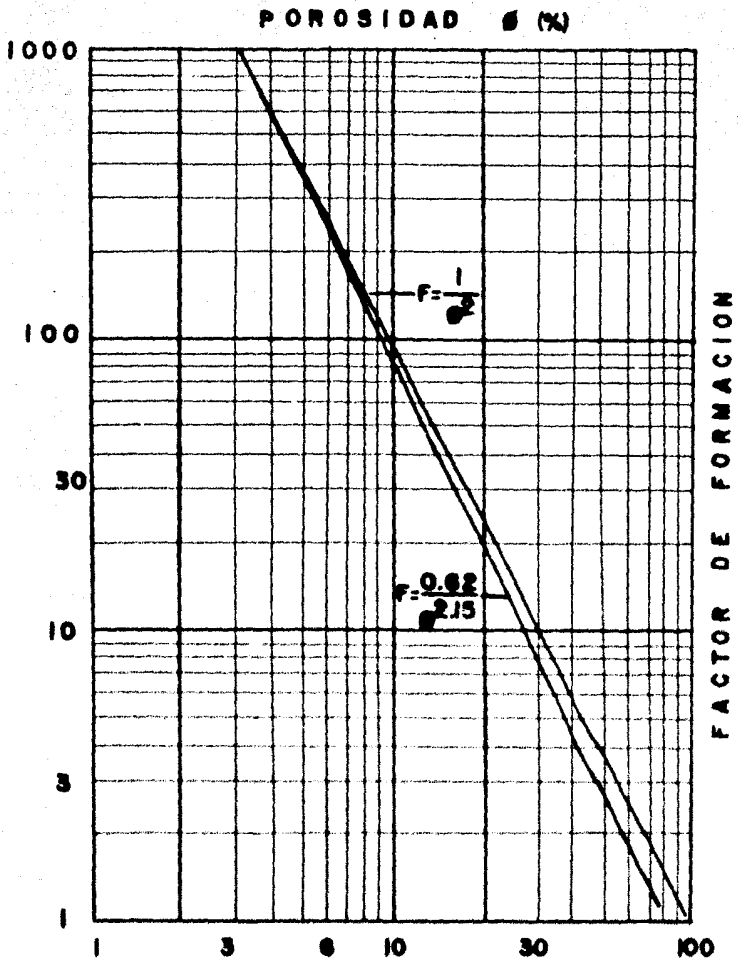


FIG. 11.3

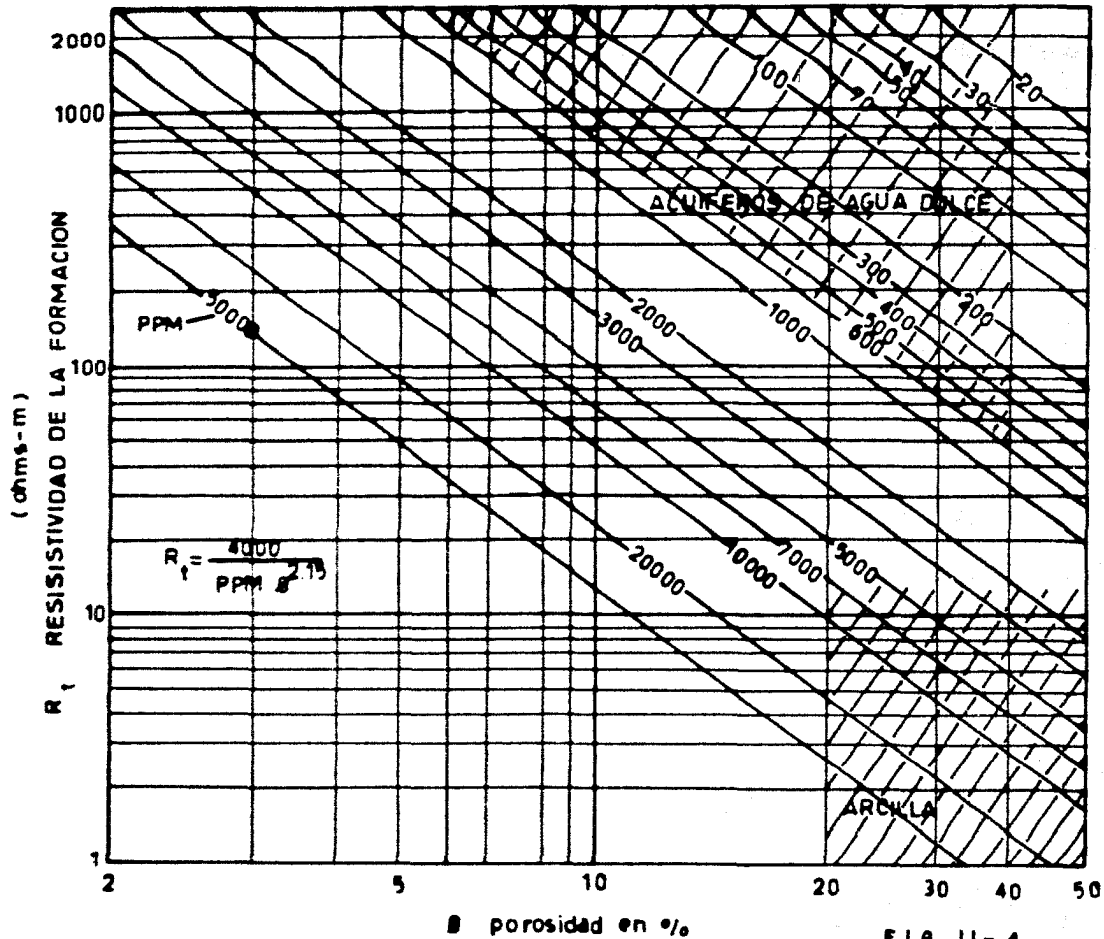


FIG. 11-4

Poros de almacenamiento.- Son grandes pero no están comunicados entre si, o lo están por medio de poros pequeños.

Poros de conexión.- Más pequeños y se comunican entre si y pueden comunicar a poros de almacenamiento.

Se presenta la tabla siguiente de variación de la porosidad intergranular de las formaciones más comunes:

Arcillas	20 a 50 %
Arenas gruesas	25 a 60 %
Arenas finas	30 a 60 %
Arenas de medanos	40 %
Arenas de playa	80 a 85 %
Arenisca	20 a 35 %
Caliza	1.5 a 35 %
Dolomias	3 a 20 %
Grava	20 a 40 %
Lavas	20 a 80 %
Margas	4 a 60 %
Rocas ígneas	0.3 a 5 %
Piroclásticos	5 a 60 %

Teniendo en cuenta que la porosidad de una roca disminuye con la edad y al grado de metamorfismo; una buena estimación de la porosidad de manera cualitativa depende de la experiencia personal y del conocimiento de la geología del área. Existiendo en la actualidad herramientas geofísicas para conocer éste parámetro como son el registro de neutróns y el de porosidad neutrón compensado.

11.8.- VARIACION DE LOS PARAMETROS A Y m.

Es importante saber como varia A y m en cada formación. Por lo que respecta a A es un coeficiente que depende de la textura de la roca y varia de 0.5 a 1.5, aunque Keller cita rocas volcánicas muy porosas con $A = 3.5$, como valores típicos se consideran como ya se mencionó a 0.62 para rocas poco o no cementadas y de 1.0 a 2.0 para rocas cementadas.

El parámetro m varia de la manera siguiente:

- m = 1.3 Para rocas detríticas débilmente cementadas.
- m = 1.4 Para areniscas poco cementadas, y lavas.
- m = 1.6 Para rocas poco porosas (menos del 5 %)
- m = 2.0 Para calizas y dolomías.
- m = 2.3 Para calizas y dolomías de grano fino.

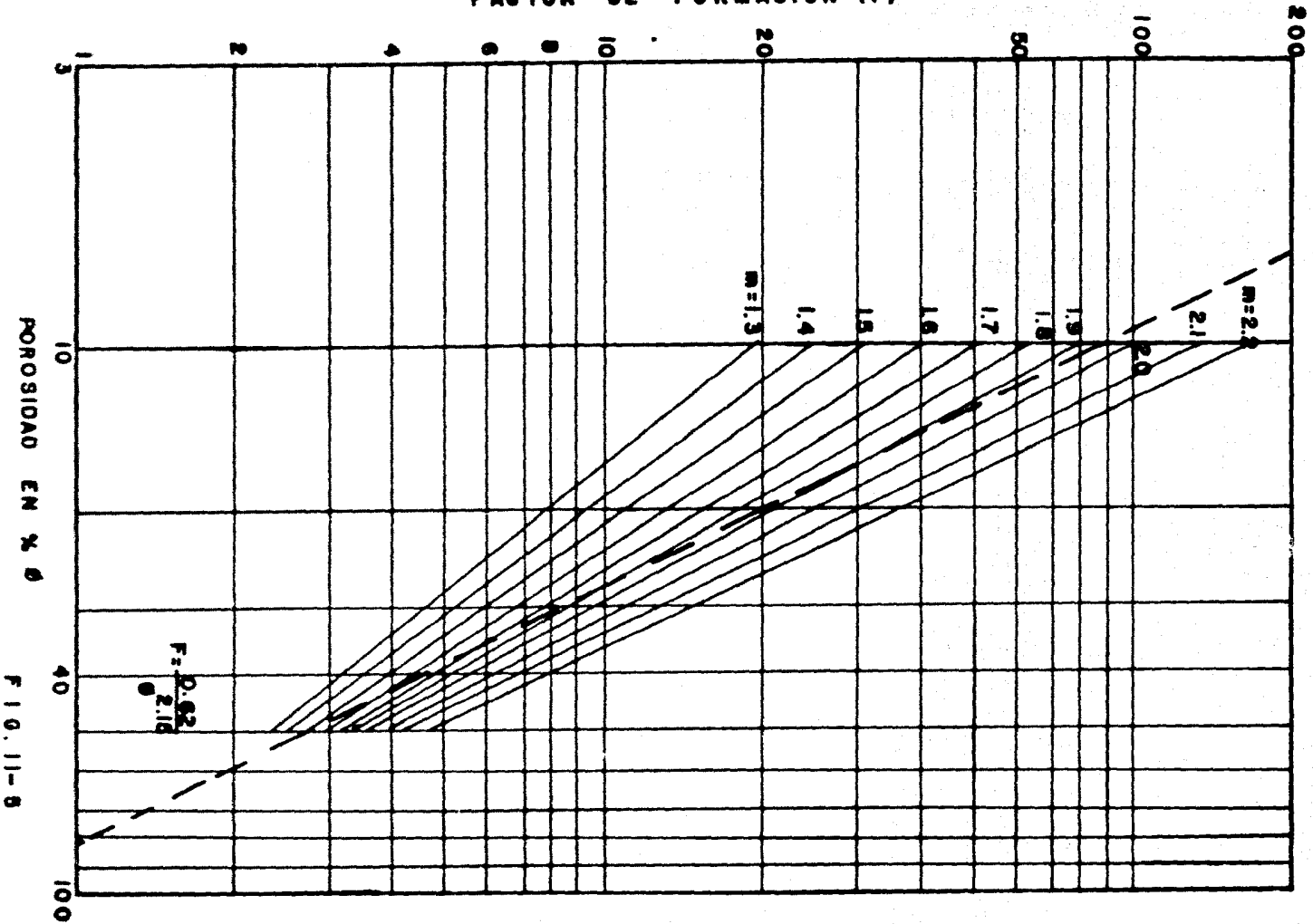
Como vemos los parametros A y m varian de una roca a otra ya que se obtienen por laboratorio, si se quiere tener más precisión la gráfica (FIG. 11-5) nos da el factor de formación para distintos valores de A y m.

Aún cuando la más usada es la gráfica de la Fig. 11-3

La Fig. 11-4 se obtuvo de la ecuación (4), usando $K = 6500$, $A = 0.62$ y $m = 2.5$; de la que obtenemos la resistividad R_t de acuíferos granulares limpios en función de su porosidad en % y la resistividad del agua de formación R_w expresada en ppm; o sea ésta en función de la salinidad del agua. La gráfica es sólo una aproximación cuando se aplica a un acuífero en particular ya que los parámetros A, m y K son diferentes para cada formación, no obstante es una buena aproximación para acuíferos que tienen una porosidad del 10 al 50 %.

Cuando tenemos acuíferos de baja porosidad granular-

FACTOR DE FORMACION (F)



F 10.11-8

no es fácil asignarles los parámetros A y m por lo que la ecuación (4) y la Fig.11-4 se aplican de manera semi-cuantitativa.-

De la Fig.11-4 se observa lo siguiente:

- 1.- Para porosidades altas, tenemos resistividades bajas de acuífero.
- 2.- Para salinidades bajas de agua de formación, tenemos altas resistividades de formación (Rt).
- 3.- La parte superior derecha corresponde a acuíferos limpios saturados de agua dulce teniendo resistividades del orden de 50 a 1000 ohms. m.
- 4.- Acuíferos limpios saturados de agua salada o salobre tienen buena porosidad y valores de Rt menores de 50 ohms. m.

11.9.- VARIACION DE Rt EN ACUIFEROS COMPLEJOS.

El espacio poral en acuíferos no granulares es muy variable y distribuido de manera irregular que no se puede encontrar una expresión que nos de una relación entre la resistividad y la porosidad; lo que se puede mencionar es que la resistividad disminuye cuando se incrementan la porosidad y la salinidad.

En formaciones densas, no se encuentran espacios porales normalmente distribuidos, en consecuencia no hay porosidad efectiva, teniendo resistividades muy elevadas del orden de 10000 ohms.m o más.

Las arcillas se pueden considerar como un medio granular, por su geometría particular; la ecuación (2) es aplicable, pero los parámetros A y m son diferentes para este caso, -

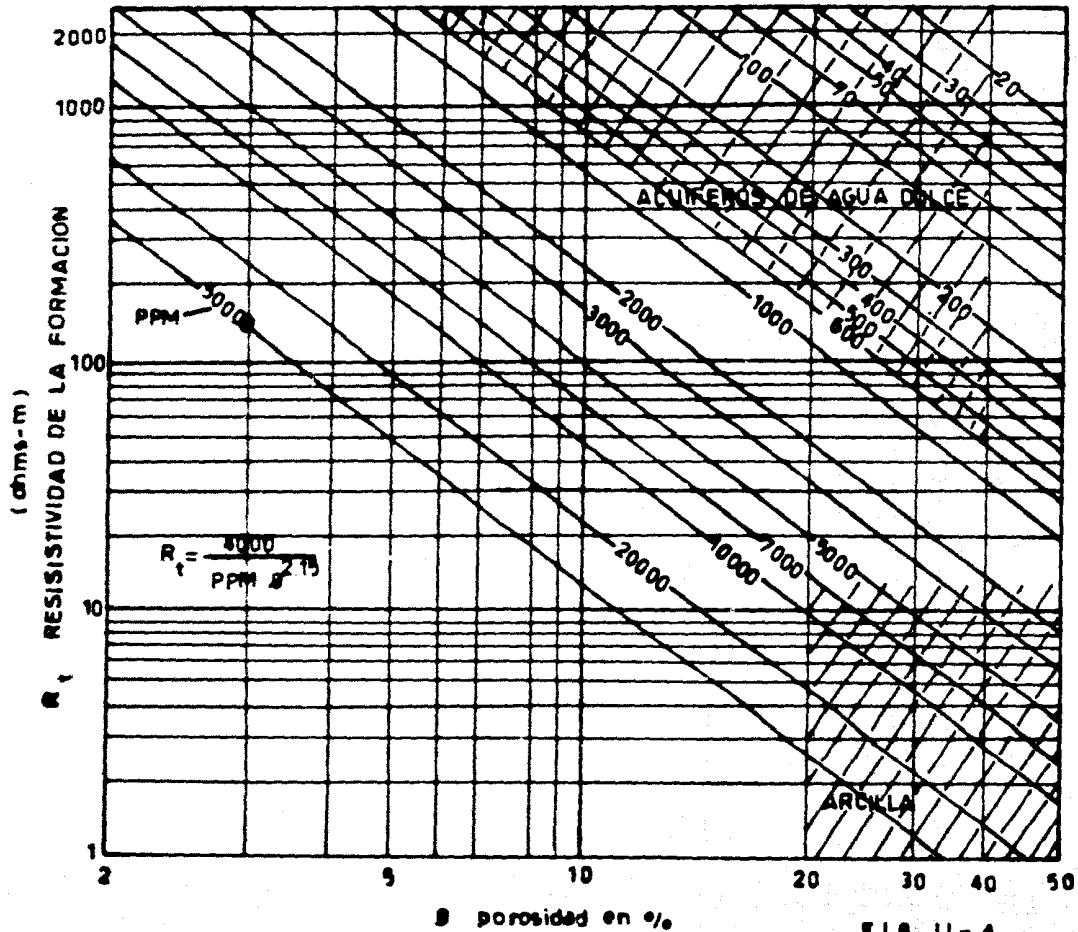


FIG. 11-4

aunque se pueden obtener valores de Rt.

Las arcillas se caracterizan por tener baja resistividad del orden de 2 a 10 ohms. m y alta porosidad, como se puede observar en el extremo inferior de la Fig. 11.4.

11.10.- ACUIFEROS GRANULARES ARCILLOSOS.

Cuando se presenta arcilla desiminada en los espacios porosos del acuífero, se reduce la resistividad de éste debido - que la arcilla se comporta eléctricamente como un conductor cuando está saturada, es importante éste concepto ya que la presencia de arcilla en un acuífero nos puede conducir a ambigüedades en la inspección de las muestras del pozo; el recorte se lava -- con los fluidos de perforación, obteniéndose muestras que en -- cierto momento se pueden considerar como buenas para un acuífero, pero en realidad no lo son; ya que el material arcilloso reduce de manera considerable la permeabilidad y podemos confundir los valores obtenidos de un registro, comparados con el muestreo; -- pensando en cierto momento que la disminución de los valores de resistividad se deba a presencia de agua salobre.

La curva de S.P. nos ayuda en éste problema, lo mismo que la curva de rayos gamma; lo que se tratará más adelante.

La manera en que se encuentra distribuida la arcilla en un acuífero granular puede ser:

- a. Las partículas del acuífero se encuentran rodeadas de arcilla.
- b. Las partículas de arcilla no están en contacto -- con los granos del acuífero.

c. No presentan ninguna de las distribuciones anteriores.

Winsaver y Mc. Cardell (1953) construyeron una gráfica empírica, la cual presenta el efecto de disminución de la resistividad R_t en %, ocasionada por el % de arcilla desiminada en el acuífero; considerando que la resistividad de la arcilla es un decimo de la resistividad del agua de formación. (Fig. 11.6).

La Fig. 11.6, consta de tres curvas, la (a) para el caso de que la arcilla rodea a las partículas del acuífero; la curva (b) cuando la arcilla no está en contacto con los granos del acuífero y la (c) para cuando no existe una distribución como las anteriores. Es bueno observar éste efecto, ya que si tenemos un 10% de arcilla desiminada en un acuífero granular, le disminuye en un 60% el valor de resistividad; que tendría si estuviera limpio.

11.11.- INDICE DE RESISTIVIDAD.

Es importante mencionar éste parámetro por usarse bastante en la interpretación de registros para hidrocarburos, y nos puede llevar a confusiones.

Archie propuso la relación:

$$R_o = F R_w$$

Donde R_o se considera la resistividad de la formación saturada al 100% de agua; en los yacimientos petroleros el aceite viene asociado con agua, por lo que conociendo F y R_w la resistividad del agua que satura parcialmente al yacimiento; conocemos R_o .

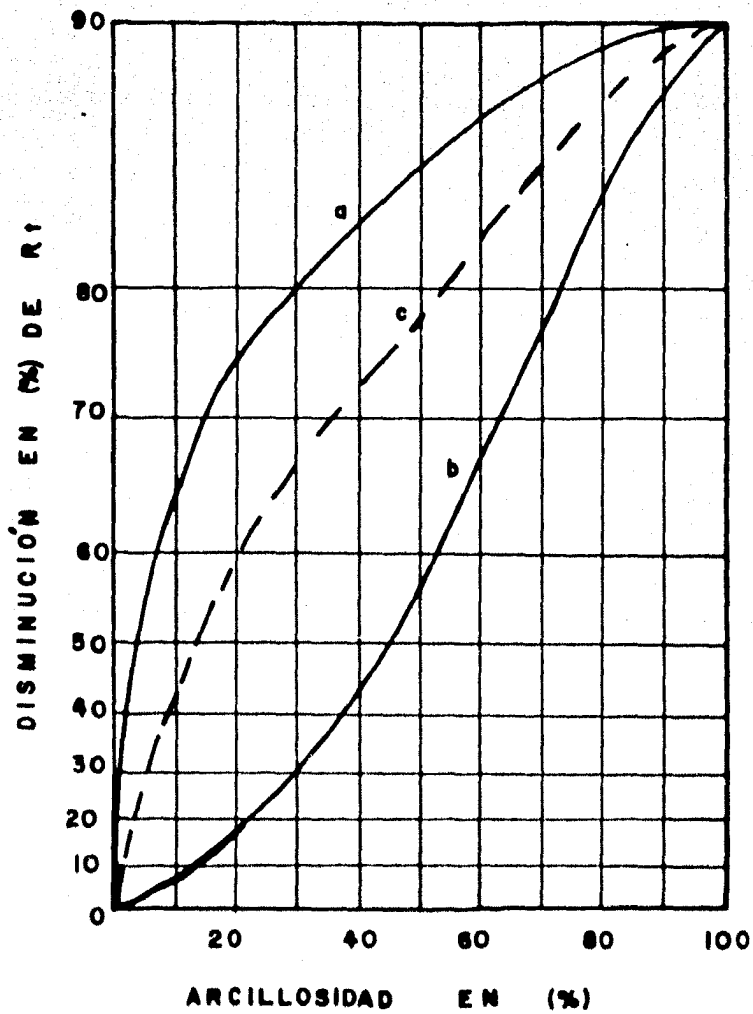


FIG. 11-6

Con un registro eléctrico conocemos el valor de R_t -- que es la resistividad de la formación con todos los fluidos que contiene. La relación entre R_t y R_o se le denomina como índice de resistividad y se aplica para conocer la saturación de hidrocarburos en un yacimiento; entonces:

$$I = \frac{R_t}{R_o} = S_w^{-h}$$

Donde S_w es la saturación de agua y se usa experimentalmente $h = 2$; para obtener la S_w tenemos:

$$S_w = \sqrt{R_o / R_t}$$

Conociendo S_w se puede conocer la saturación de hidrocarburos por $S_h = (1 - S_w)$; como se observa para el caso petrolero el índice de resistividad es muy importante conocerlo.

En el caso de acuífero como ya se mencionó las formaciones están 100% saturadas de agua entonces $R_o = R_t$ puesto que R_t es la resistividad de la formación y R_o es la resistividad de la formación saturada de agua; como sólo estudiaremos formaciones saturadas de agua, el índice de resistividad para nuestro caso será siempre igual a uno.

11.12.- INFLUENCIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION.

Los fluidos de perforación tienen gran importancia en la práctica de registros geofísicos en pozos, por ser el medio con el cual se hace contacto con las formaciones.

En perforaciones para pozos de agua los lodos usados-

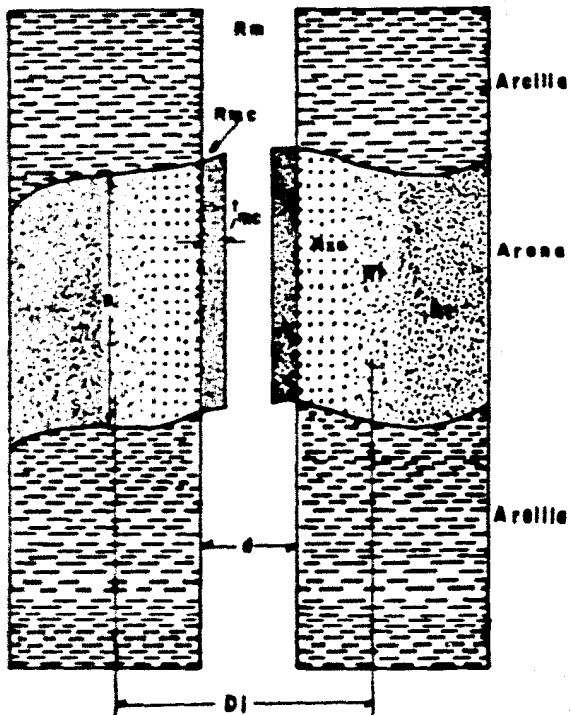
son generalmente preparados a base de bentonita, aunque en algunas ocasiones por los problemas que se presentan en la perforación se llega a usar barita, yeso, dispensor de arcillas o arcilla natural.

En el pozo la presión hidrostática que ejerce el fluido de perforación, en los estratos permeables hace que se desplacen los fluidos de la formación, (para nosotros agua) por lo que en estas zonas se forma un reboque o enjarre que sirve para detener las paredes del pozo, el agua que se drena en la formación - proviene del lodo por lo que es un filtrado del lodo y tiene una resistividad R_{mf} , el reboque tiene una resistividad R_{mc} y un espesor T_{mc} .

Al desplazar el filtrado del lodo de la formación, -- queda una zona de invasión de resistividad R_i ; existiendo entre éstas dos una zona de transición de resistividad R_{xo} , la zona más lejana del eje del pozo que se encuentra libre de fluidos que no son propios de ella es la zona no contaminada de resistividad -- R_t .

En pozos de agua éste efecto es mínimo ya que las presiones del lodo son pequeñas, por ser perforaciones a profundidades someras. La Fig. 11.7 muestra éste efecto en una capa permeable.

En el estrato permeable se muestra las variaciones de los valores de resistividad en forma radial, teniendo primero la resistividad del lodo R_m , posteriormente la de la zona de transición R_{xo} , la de la zona invadida R_i y la de la zona no contaminada R_t .



Efecto del fluido de perforación en un estrecho permeable.

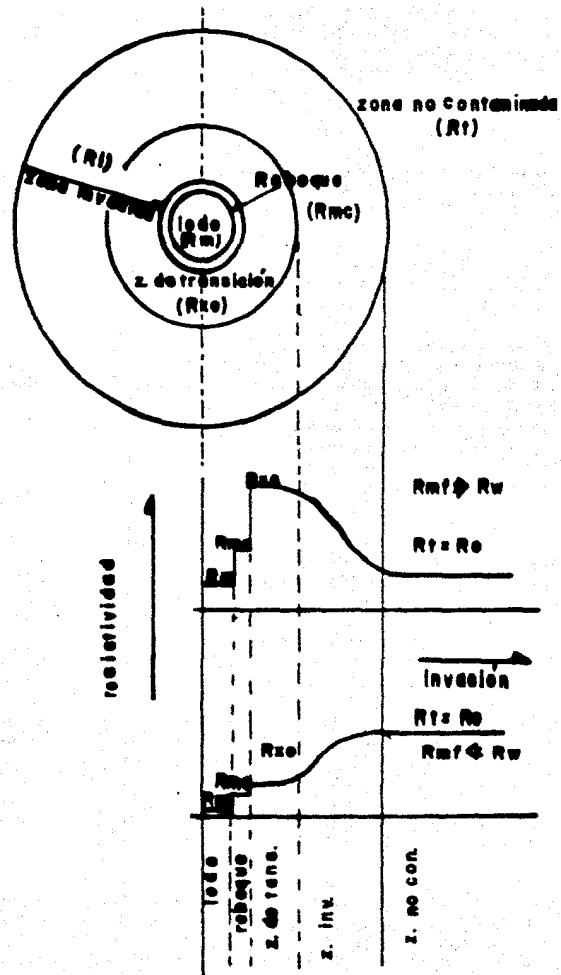


FIG. II-7

El conocimiento de estos valores de resistividad es el objetivo de los registros eléctricos, en la industria petrolera se usan herramientas con espaciamentos muy pequeños que permiten conocer R_{mc} , R_{xo} y R_i y con espaciamentos mayores que nos permiten conocer R_t .

En el caso de pozos de agua no es posible obtenerlos por razones económicas como ya se ha mencionado, pero podemos tener buenas interpretaciones conociendo R_i y R_t lo que trataremos en capítulos posteriores.

Entonces el lodo es fundamental para poder correr un registro eléctrico; por ser éste el medio con el cual se hace contacto eléctricamente con las formaciones y sirve para controlar la perforación; en pozos de agua es importante que el lodo tenga una resistividad de 5 a 10 ohms.m, dependiendo del tipo de agua de formación, es recomendable estos valores; cuando el agua de formación es salobre o salada se recomienda que el lodo sea de buena calidad para que exista contraste de resistividades.

En perforaciones hechas con equipos rotarios es necesario que la columna del lodo esté homogénea, que su viscosidad sea del orden de 30 a 40 seg. con la cual se asegura que la sonda baje y no se derrumbe el pozo.

C A P I T U L O I I I

III.1.- REGISTROS ELECTRICOS.

En la práctica de los registros eléctricos, es importante mencionar antes de tratar los tipos de herramientas usadas para éste fin, los aspectos que debemos tomar en cuenta para correr cualquier tipo de registro en un pozo, con lo cual, obtendremos mejores curvas que se acercarán más a nuestros objetivos.

A.- GEOLOGIA DEL AREA.

La información que obtenemos de un registro nos da las características físico-químicas de las formaciones, las cuales tienen una relación directa con la litología de las mismas, es por esta razón que cuando conocemos el tipo de formaciones que se pueden presentar en una perforación, tenemos la oportunidad de elegir las escalas adecuadas para correr nuestro registro, en el caso de desconocer esta información es recomendable inspeccionar el muestreo del pozo para tener una idea de la clase de materiales que se encuentran en la zona.

Teniendo esta información elegimos la escala apropiada para correr nuestro registro, por ejemplo si nos encontramos en una planicie costera en la cual tenemos depósitos finos de arena, arcillas y arcillas arenosas; tendremos valores de resistividad aproximadamente entre 5 y 100 ohms-m, aunque podemos encontrar agua salobre o salada, estos valores serán del orden de unos cuantos ohms-m a 10 ohms-m máximo, entonces nuestro registro tendría que ser tomado en una escala de 0 a 25 ohms-m, con -

la cual podemos distinguir claramente esta situación, a la que - podríamos tener si lo tomáramos en una escala mayor, la cual nos daría dificultad para distinguir entre una arcilla y una arena.

Por eso es importante conocer la geología de la zona, ya que con ésta información se obtienen registros más adecuados - a los que muchas veces se realizan sin tomar en cuenta esta si- tuación. Tanto para registros eléctricos y radioactivos en su in- terpretación es necesario tomar en cuenta el corte geológico de- la zona, con el cual se obtendrán perfiles que nos representan - de una manera más objetiva las formaciones perforadas.

B.- GEOHIDROLOGIA.

Los datos geohidrológicos son importantes porque con - ellos se puede predecir de manera cuantitativa el potencial de -- nuestros acuíferos y algunos datos que se necesitan para su inter- pretación cuantitativa como son R_w , calidad de agua etc., de - -- áreas donde el número de perforaciones, y comportamiento de acuí- feros es conocido, como en distritos de riego o sistemas de fuen- tes de abastecimiento.

Cuando se está en una zona virgen se puede recurrir a - información de pozos indios, si es que existen para tener una - - idea del valor de R_w y por lo tanto de la salinidad de las aguas - de la zona, identificar el tipo de recarga que tienen los acuíffe- ros, drenaje, permeabilidad del terreno, niveles freáticos y toda - la información adicional que se pueda obtener.

En una situación importante para una buena explotación - de acuíferos ya que el agua subterránea es un recurso renovable.-

Siempre y cuando se cumpla con el ciclo hidrológico, se tendrá el agua que se pueda explotar, cuando se sobreexplotan los acuíferos suceden fenómenos irreversibles, como son: abatimientos - de niveles freáticos y en consecuencia de los niveles dinámicos, reducción de la porosidad y por lo tanto de la permeabilidad.

A tal grado ha preocupado ese problema que se formó el Congreso Mundial del Aprovechamiento de Aguas Subterráneas - dependiente de la ONU, de no cuidar este equilibrio en el futuro el agua subterránea podrá ser un recurso no renovable. Un -- ejemplo del descuido de estos factores es el caso de la comarca lagunera que hace aproximadamente 50 años los niveles freáticos se encontraban antes de los 20 metros, en la actualidad están - en el orden de 150 metros debido a la explotación que se realizó en los acuíferos de esa zona.

C.- DATOS DE PERFORACION.

La bitácora de perforación en un pozo exploratorio, -- nos da información valiosa para poder realizar de manera más -- adecuada nuestros cálculos.

Un buen registro de los avances que se presentan en la exploración nos ayuda a correlacionar las propiedades mecánicas de las formaciones con la información obtenida de los registros.

El muestreo es indispensable que se haga con la mayor veracidad, recomendando tener una muestra lavada y seca, y otra en las condiciones que salió del pozo; esto permite estimar la granulometría, litología, contenido de arcilla y poder aproximar un valor de factor de formación si es posible, para esto, -

es muy importante la experiencia que se tenga en este trabajo.

Llevar un control de pérdidas de circulación si es -- que se presentan totales y parciales, así como la viscosidad del fluido de perforación, químicos y agua que se usa para su preparación.

En caso de que sea posible obtener esta información -- se realiza una interpretación más adecuada de los registros.

D.- CONDICIONES DEL POZO.

Para poder correr un registro en cualquier pozo, éste debe tener ciertas características dependiendo del tipo de registro que se va a correr.

En un registro eléctrico, el pozo no puede estar adomado, ya que el metal es conductor y sólo estaríamos midiendo la resistividad de éste, el lodo es la parte con la cual se hace -- contacto en las formaciones, en consecuencia no es posible hacer registros en pozos secos, y el registro empezará cuando la sonda esté dentro del fluido de perforación o del agua en caso de pozos hechos con máquinas de percusión.

Es importante que el lodo esté homogéneo y no esté -- preparado a base de aceite, ya que es aislante y no permite correr un registro eléctrico.

Los registros radioactivos se pueden correr en pozos adomados y secos ya que se miden radiaciones atómicas de la formación.

III.2.- CURVA DE POTENCIAL NATURAL O ESPONTANEA.

Se hablará primero de esta curva, ya que en la presentación convencional de los registros viene acompañando tanto a los eléctricos como a los radiactivos.

A.- CAUSAS DEL POTENCIAL NATURAL.

La existencia de éste potencial en los pozos se debe a dos causas: la electroquímica y la electrocinética.

Cuando tenemos dos substancias que tienen una concentración de sales diferentes y entre ellas una membrana se genera un potencial electroquímico por el desequilibrio iónico existente entre ellas. En los pozos la membrana se forma por la presencia de arcillas que no permiten el paso de aniones creando un potencial de membrana y en cuerpos granulares permeables en contacto con ellos, como en el caso de los acuíferos limpios.

El potencial electrocinético es el que se origina -- por el movimiento de los iones, que secede cuando dos soluciones se encuentran a diferente presión hidrostática, como sucede en las zonas de invasión y por la diferencia de resistividades entre R_m y R_w .

La teoría que explica estos fenómenos es muy complicada partiendo del principio termodinámico de la energía libre o función potencial de Gibbs, la cual no se desarrollará y solamente se usaran las conclusiones prácticas para la interpretación de la curva de S.P.

En un pozo cuando se tiene estrato permeable empacado en dos impermeables, por ejemplo la sucesión de arcilla arena arcilla (Fig. III.1), se genera un potencial electroquímico-

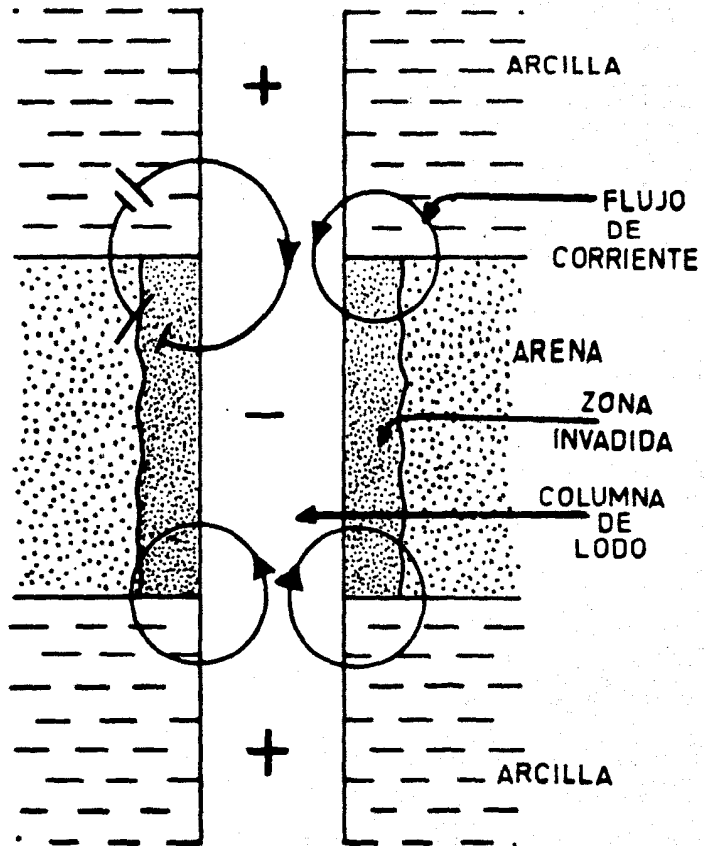
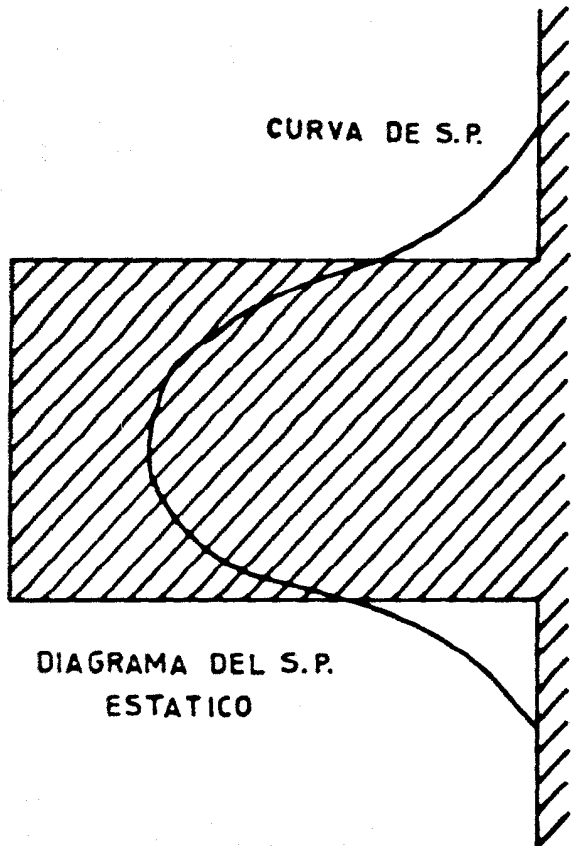


FIG III 1

por la diferencia de salinidades entre el agua de formación y el lodo de perforación, teniendo una caída de potencial en el contacto arcilla-arena por las diferencias de salinidades entre el agua de formación y el lodo de perforación, y una membrana formada por la arcilla.

Otro potencial se suma a éste por el efecto de invasión en el estrato permeable, por tener 2 soluciones de concentraciones diferentes en contacto se genera un potencial electrocinético y electroquímico.

En la figura III.1, se muestra la forma de la curva de S.P., en un estrato permeable intercalado en arcillas, así como la forma que tendría el S.P. estático en la forma achureada.

B.- APLICACION DE LA CURVA DE S.P.

Cuando el agua de los acuíferos es más salina que el lodo de perforación, el S.P. es más negativo que en las arcillas adyacentes; estos son los casos extremos que se pueden encontrar.

El S.P._c es el potencial electroquímico expresado en milivolts y está dado aproximadamente por la fórmula siguiente:

$$S.P._c = -K \text{ Log } \frac{R_{mf}}{R_w}$$

(III.-1), Donde R_w es la resistividad del agua de formación, R_{mf} es la resistividad del filtrado del lodo y K es una constante que generalmente es 71.

De esta fórmula se puede obtener el valor de R_w , - -
siendo su aplicación muy usada.

La fórmula III.-1 se aplica solamente cuando la dife-
rencia de salinidades entre el agua de formación y el lodo son -
considerables. Para pozos de agua se aplica cuando el agua de --
formación es salada o salobre.

Para aguas de formación con menos de 15 000 p.p.m. se
usa la expresión que depende de las actividades químicas del - -
agua de formación y el filtrado del lodo, es un tanto complicada
(propuesta por Willie en 1949 y corregida por Parten y Benett en
1963), por lo que para salinidades bajas compuestas por: sodio,-
calcio y magnesio la expresión se reduce a la fórmula siguiente:

$$S.P._c = -K \text{ Log } \frac{(A_{Na^{++}} \sqrt{A_{Ca^{++}} + A_{Mg^{++}}})_W}{(A_{Na^{++}} \sqrt{A_{Ca^{++}} + A_{Mg^{++}}})_{Mf}} \quad (III.-2)$$

En la parte logarítmica el numerador se refiere a el-
agua de formación y el denominador al filtrado del lodo, las (A)
nos denotan las actividades de los iones denotados con los subí-
ndices.

La porción de actividad verdadera de un ión es aproxi-
madamente proporcional a la concentración de ese ión, pero el --
coeficiente de proporcionalidad puede variar grandemente. Como -
en el campo solamente se podría conocer la calidad del agua por-
la concentración de sólidos totales se hace necesario un análi-
sis químico formal y con las gráficas de la fig. III.-2 y Fig. -
III.-3, se puede obtener las actividades del Na^+ y la - - - - -

CONCENTRACION DE Na^+ (p.p.m.)

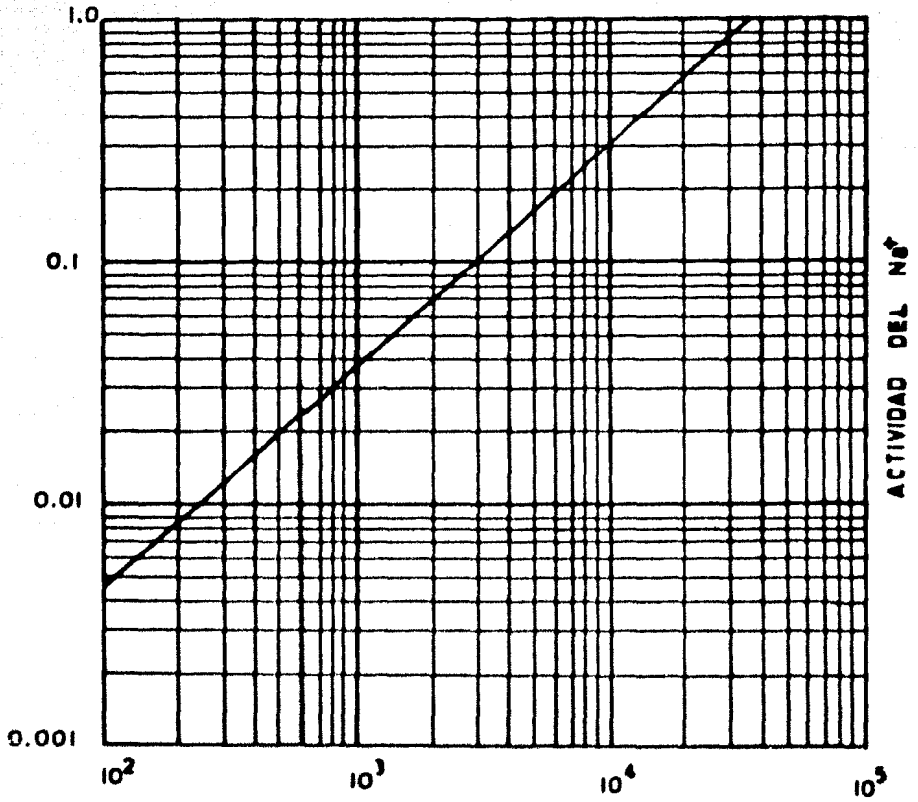
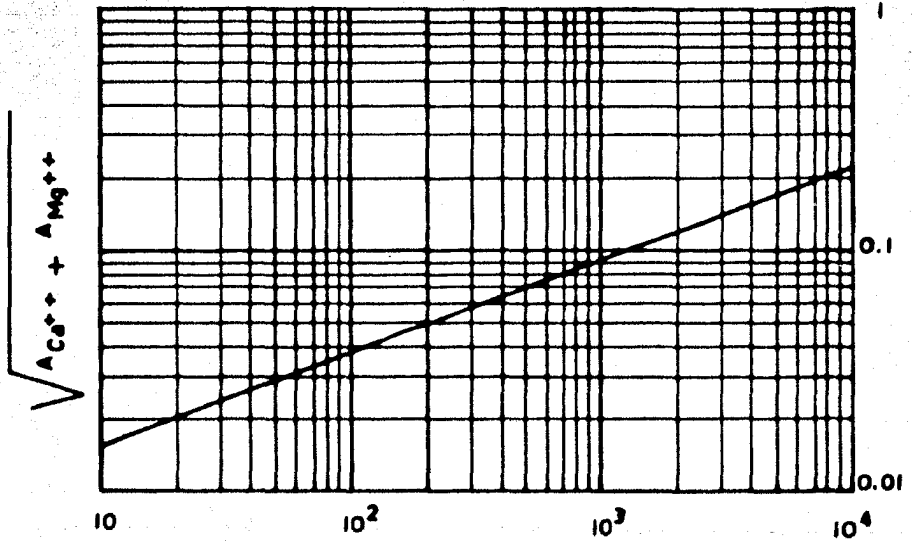


FIG III 2



CONCENTRACION DE Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ (p.p.m)

FIG III 3

$$\sqrt{A_{Ca^{++}} + A_{Mg^{++}}}$$

con la cual podemos aplicar-

la fórmula III.-2.

La interpretación cuantitativa del S.P. no es muy usada ya que presentan varios problemas de corrección como son: por espesor de capa, diámetro de agujero y la relación de resistividades entre la zona invadida y la zona no contaminada o sea R_i / R_t para lo cual es necesario hacer registros microeléctricos, los cuales por su costo no son posibles realizarse en pozos de agua.

Si es posible poder usar el S.P. para determinaciones cuantitativas de la salinidad del agua de formación, estableciendo de antemano datos empíricos de las calidades de agua de la zona y aplicar la fórmula y las gráficas mencionadas. Aún cuando no sea una manera óptima para determinar la calidad del agua de un acuífero, si nos da información relativa muy importante del comportamiento de los mismos.

Para el análisis de la curva de S.P. en un pozo tenemos que considerar lo siguiente:

1.- Línea de las Arcillas.- Como las arcillas son impermeables a los cationes, no existe un intercambio iónico con el fluido de perforación por lo que toman un valor respecto al electrodo de tierra y por lo general es el mismo en todo el pozo por esta razón para correr la curva de S.P. es necesario localizar arcillas para centrar la curva en el papel de registro y la línea que forman las arcillas se toman como referencia para calcular los cambios de valor del S.P. Ya sea positivo o negativo. Es por lo que ésta línea se le llama base de las arcillas.

En la práctica se presentan corrimientos o inclinaciones de ella, pero se debe a que las arcillas cambian su composición mineralógica y por lo tanto tienen valores de K diferentes. Otra causa de este corrimiento es la variación de la salinidad del agua de formación.

2.- S.P. En formaciones acuíferas.- En acuíferos granulares limpios el S.P. es positivo cuando la calidad del agua de formación es mejor que la calidad del fluido de perforación presentando un desplazamiento hacia la derecha de la línea base de las arcillas.

Cuando el S.P. está a la izquierda de la línea de las arcillas es un acuífero limpio y permeable. Dependiendo de la amplitud del S.P. y los valores de las curvas de resistividad, podrá ser agua dulce, salobre o salada el agua de formación.

Para esto es importante conocer la resistividad del fluido de perforación para tener una idea del contraste de resistividades con el agua de formación.

3.- S.P. Estático.- La Figura III.-1, indica esquemáticamente las líneas de corriente del S.P. para el caso en que la salinidad del lodo de perforación es menor que la salinidad del agua de formación.

Por lo que el potencial existente en esas condiciones es negativo frente a capas permeables, respecto del que existe en una capa impermeable.

Para el caso en el que la actividad del filtrado del lodo sea mayor, que la del agua de formación, tenemos que la co

riente fluirá en dirección opuesta, o sea, de la formación hacia el lodo de perforación lo que ocasionará en nuestra curva - una desviación hacia la izquierda, lo cual es muy frecuente en pozos de agua, no requiriendo decir con esto que cuando se nos presentan desviaciones negativas el agua de formación es salada o salobre, ya que por lo general los lodos usados para perforación de pozos de agua son dulces.

En la Figura III.-1 observamos también que las corrientes del S.P. fluyen en cuatro medios diferentes que son: - el hueco del pozo, la zona invadida, la zona no contaminada de la formación permeable y las arcillas adyacentes. Debido a la corriente creada de origen electroquímico, al fluir en medios de resistencias diferentes en cada uno tendremos una caída de potencial a lo largo de una línea de corriente, la caída total es igual a la fuerza electromotriz total creada en esos medios.

Entonces las desviaciones que encontramos en la curva de potencial se deben a la caída de potencial ocasionada -- por las corrientes del S.P. Estas caídas que registramos son s lo una parte de las que realmente existen en una capa permeable ya que tenemos caídas en las formaciones adyacentes.

Si frente a una formación permeable en un pozo pudiéramos aislar la parte superior e inferior, para impedir el flujo de corrientes de S.P., lo que registraramos sería la fuerza electromotriz total teniendo la forma que se presenta en la zona achureada de la figura III.-1.

Al diagrama en condiciones ideales se le llama S.S.P. potencial espontánea esttico, el cual sería más adecuado para el uso de las fórmulas III.-1 y III.2, para calcular R_w .

4.- Forma de la curva de S.P.- La pendiente de la -- curva de S.P. es proporcional a la intensidad de corriente del S.P. en el lodo a ese mismo nivel, por lo que es máxima en el -- borde de una formación permeable y mínima en una impermeable -- (arcilla) por lo que tenemos puntos de inflexión los que nos se ñalan el contacto de esas formaciones.

La forma de la curva de S.P. depende de los factores siguientes: a).- Espesor H , y la resistividad verdadera R_t de -- la capa permeable; b).- La resistividad R_s de las formaciones-adyacentes; c).- La resistividad R_m de lodo y el diámetro de H del pozo; d).- La resistividad R_{xo} y el diámetro d_i , en la zona invadida por el lodo.

En formaciones con resistividades altas como rocas -- ígneas y sedimentarias calcáreas, la distribución de la corrien- te S.P. se distorciona y en consecuencia la forma de la curva, -- teniendo la forma de una recta con cierta inclinación y pocas -- variaciones, por lo que es difícil definir los espesores y cam- bios en ellas por la falta de contacto con arcillas.

5.- Curvas peculiares de S.P.- Cuando el S.P. en -- acuíferos permeables se va haciendo más negativo con la profun- didad y los valores de resistividad también disminuyen con la -- profundidad lo que sucede es que la salinidad del agua de forma- ción también aumenta con la profundidad.

Cuando se tiene un cambio errático en la polaridad -- del S.P. se debe a cambios en la salinidad del agua y pueden -- ser del orden de 25 Mv o más.

La reducción de la amplitud de S.P. en cuerpos per--

meables se debe a la presencia de material arcilloso en sus espacios porales.

Los corrimientos en la línea de las arcillas, ya que generalmente es vertical, en ocasiones se presentan desplazamientos debido a cambios mineralógicos en las arcillas, por lo que esta línea es inclinada.

Cuando se presentan desviaciones más fuertes en ella, se debe a cambios en la salinidad del agua.

Se presentan vibraciones en la curva de S.P., cuando se tiene artesianismo natural en el pozo por lo que el electrodo de medida no se encuentra estable, por el flujo de agua.

También se presentan en pozos que tienen el nivel -- del lodo o agua profundo, existiendo en la parte superior lloraderos los que hacen un contacto momentáneo con el electrodo y -- en consecuencia con la formación.

En perforaciones inclinadas, al chocar el electrodo con las paredes del pozo, se presentan variaciones bruscas, el mismo fenómeno se presenta cuando se encuentran tapones de arcilla en la columna del lodo.

Vibraciones en forma constante, se deben a corrientes parásitas o al efecto de inducción por líneas de alta tensión, éste efecto se puede mejorar escogiendo un buen lugar para el electrodo de tierra.

Las variaciones en forma de impulso se presentan -- cuando hay tormentas eléctricas, debiéndose al efecto de descarga de los rayos en el terreno.

6.- Principales usos del S.P. en pozos de agua.- La curva de S.P. nos da buena información en arcillas y cuerpos -- granulares limpios, que junto con la información de registros -- eléctricos y radioactivos, podemos determinar profundidades y -- espesores de capas, correlación, identificación y variación en -- la calidad del agua.

También se tiene una idea de la porosidad y la permeabilidad de acuíferos, así como de su contenido de arcilla; -- por lo que es indispensable en la exploración de aguas subterráneas.

III.3.- REGISTRO DE RESISTIVIDADES.

La medición de la resistividad de una formación en -- un pozo se puede realizar de varias maneras. La más simple de -- las usadas, es la medición de la variación de la resistencia -- eléctrica con la profundidad, con una herramienta monoelectrodo.

Existiendo herramientas específicas para obtener datos de resistividades, a diferentes diámetros del eje del pozo, como son las curvas normales, laterales y las obtenidas con herramientas micro-resistivas.

Para éste problema solamente se tratará las herramientas monoelectrodo y multielectrodo, que obtienen las curvas de resistencia eléctrica; normal y lateral de resistividad eléctrica. Por razones económicas son las que más se aplican en investigaciones de acuíferos.

III.-3.1.- HERRAMIENTA MONOELECTRODO.

Los registros obtenidos con esta herramienta son muy

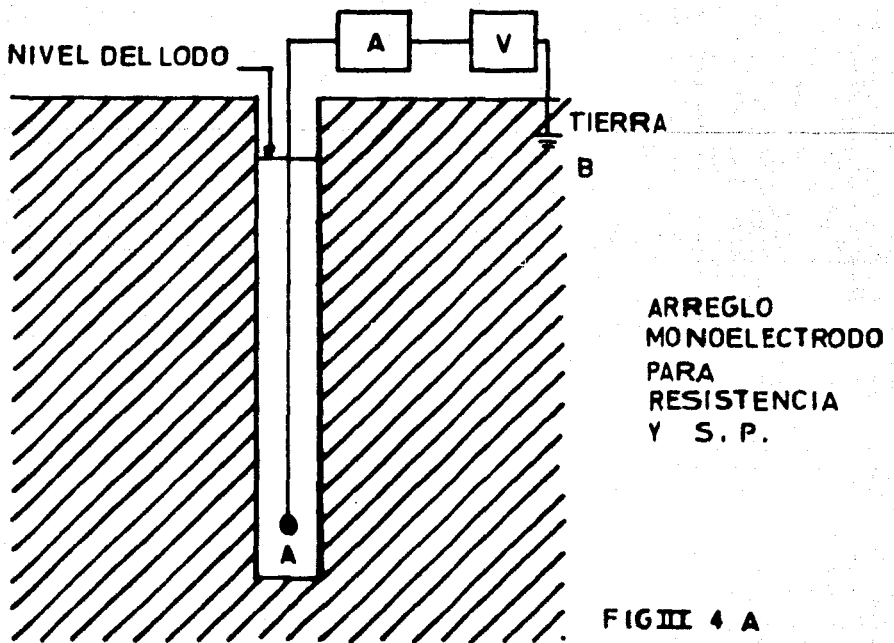
usados en la exploración de aguas subterráneas, por su bajo costo y fácil operación; la información obtenida por este medio, no se puede usar en interpretaciones cuantitativas, pero nos da una idea de los cambios y características de las formaciones en un pozo.

El principio físico para obtener esta curva, se basa en la medición y registro continuo de las caídas de potencial entre dos electrodos, al estar circulando una corriente constante entre ellos. Obteniendo la variación de la resistencia eléctrica entre éstos dos electrodos, ocasionada por los cambios físico-químicos de las formaciones, en las que va pasando la sonda.

En la figura III-4a se presenta esquemáticamente esta situación. Tenemos dos electrodos que realizan una doble función, la de excitar el terreno con corriente y la de medir voltaje, realizándose simultáneamente. Un electrodo B de tierra en la superficie, y un electrodo A que se mueve en el pozo, para cerrar el circuito, es necesario que esté dentro del fluido o agua del pozo; existiendo entre ellos una resistencia que está constituida por las formaciones que están entre A y B.

La Fig. III-4b muestra la forma del campo eléctrico creado por dos electrodos, estando uno en el infinito; por lo que en la cercanía de uno de ellos se considera esférico, teniendo líneas de corriente que salen radialmente del electrodo, y superficies esféricas equipotenciales concéntricas a él.

Esto sucedería en un medio isótropo y homogéneo, lo que no es posible encontrar en un pozo; pero teóricamente se --



CAMPO ELECTRICO ESFERICO

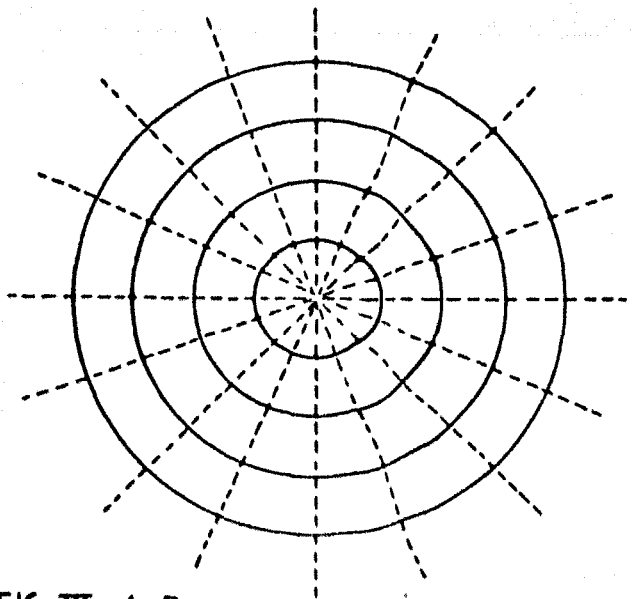


FIG III . 4 . B

aproxima a él.

Como lo que se está midiendo son caídas de potencial, la ecuación que relaciona este fenómeno es la Ley de Ohm por lo que tenemos que la resistencia es:

$$R = \frac{V}{I}$$

La resistencia es igual a la relación entre el voltaje y la corriente; en el pozo es esta relación la que se mide, - haciendo pasar una corriente constante en el medio y registrando las variaciones de voltaje ocasionadas por las diferentes resistencias que se van oponiendo al paso de la corriente.

La información relativa que se obtiene nos relaciona los valores de resistencia, con los tipos de formación que se en encuentran en la perforación.

Esta curva de resistencia viene acompañada por una -- curva de S.P. constituyéndose de ésta manera el registro eléctrico más elemental para una perforación.

III.3-2.- CURVA DE RESISTENCIA ELECTRICA.

La interpretación de esta curva, se hace de manera -- cualitativa, ya que no se obtienen valores de resistividad de -- formación, siendo solamente valores de resistencia para lo cual se presenta una guía de interpretación de esta curva la que nos da una idea de la relación existente entre los valores de ésta, - con los tipos de formación y los fluidos que las saturan.

La siguiente tabla, nos relaciona los valores de re--

sistencia, con formaciones acuíferas:

FORMACION	VALORES DE RESISTENCIA ELECTRICA.
1.- Arcillas y lutitas	De 5 a 10 ohms
2.- Arenas y gravas (arcillosas saturadas con agua dulce).	De 5 a 15 ohms
3.- Arenas y gravas limpias (saturadas con agua dulce).	De 10 a 100 ohms
4.- Rocas densas	De 100 a 500 ó más ohms.
5.- Arenas y gravas (saturadas con agua salobre).	De 2 a 15 ohms
6.- Agua dulce	De 30 a 100 ohms
7.- Agua salobre o salada	De 0 a 10 ohms

Esta es una manera relativa de las variaciones de resistencia eléctrica en las formaciones, que para una mejor interpretación, es necesario correlacionar con los valores de S.-P. rayos gamma y las características que se presentarán durante la exploración, para lo cual hay que considerar las siguientes situaciones:

A.- Agua Dulce y Formaciones Densas.- Presentan alta resistencia. Acuíferos en arenas y gravas con agua de buena calidad tienen resistencias elevadas y presentan un avance en la perforación rápida manifestándose la permeabilidad en el S.P., -

con desviaciones positivas por la buena calidad del agua de saturación.

B.- La presencia de acuíferos de baja porosidad con agua de buena calidad.- Se manifiestan como rocas densas. En la práctica la podemos diferenciar por la información del avance - en la perforación, inspección de las muestras y en algunos casos con la curva de S.P.

C.- Acuíferos que contienen arcilla o agua salobre.- Se caracterizan por una resistencia media teniendo valores entre una arcilla y una arena, ésta baja en el valor de resistencia se debe a la presencia de arcilla ó agua salobre la cual se puede identificar con la curva de S.P. o con la curva de rayos-gamma.

En la Figura III-5 a manera de esquema se tratará de representar las situaciones que podemos encontrar en registros de resistencia, aunque en realidad por lo general lo único que se puede obtener con estas gráficas son espesores de formación y una idea de la calidad del agua del acuífero. En el ambiente de la perforación de pozos para agua, la mayoría de las personas confunden esta curva de resistencia con la curva normal de resistividad, parte de ello son culpables los fabricantes del equipo de registro por manifestar que la curva obtenida con un solo electrodo es de resistividad, hacen esto por razones comerciales, aunque en la actualidad ya están fabricando registros de resistividad para este fin, y están aceptando que la curva que ofrecieron primeramente como de resistividad es realmente de resistencia eléctrica.

Se hace esta aclaración por considerarla importante, pues muchas veces se interpretan los valores de resistencia como si fueran de resistividad, lo cual conduce a resultados erróneos. Para demostrar esto, presentamos dos registros de un mismo pozo; uno con curva de resistencia y otro con curva de resistividad, ambos en un mismo intervalo de profundidad (Figs. - - - III.6.A. y III.6.B).

Las escalas usadas en ellos son: En el de resistencia se usó 50 y 100 óhms y para el S.P. 40 Mv, en cambio para el de resistividad normal se usaron escala de 100, 500 y 2500 ohms y potencia natural de 40 Mv. Concluimos que existe una diferencia enorme entre ellos respecto a sus valores, aún cuando existe una correlación en la variación de estos valores, los valores de resistencia son relativos por estar afectados por las capas que existen entre el electrodo y el móvil en el pozo, por esta razón al correr un registro de resistencia se realiza una corrida fantasma para calibrar el equipo y conocer sobre que valores varía el pozo, con esto se escoje la escala con la cual se correrá el registro, en el caso de resistividad no es necesario por tener un volúmen controlado de medición.

El uso de esta herramienta es delicado por ser necesario tener experiencia tanto en el área de exploración, como en el uso de estos equipos para poder dar resultados más veraces.

La manera relativa de interpretar estos perfiles es basándose en los criterios siguientes:

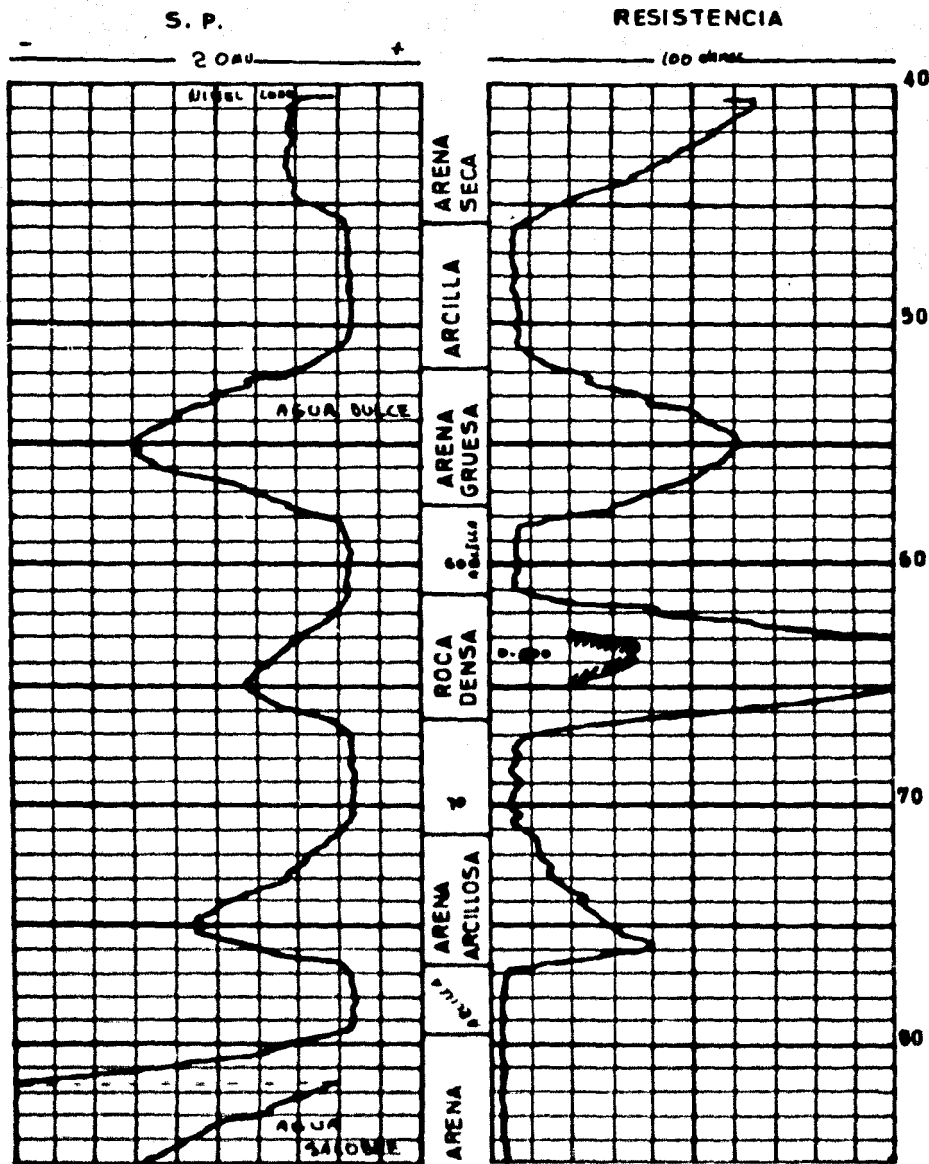


FIG III 5

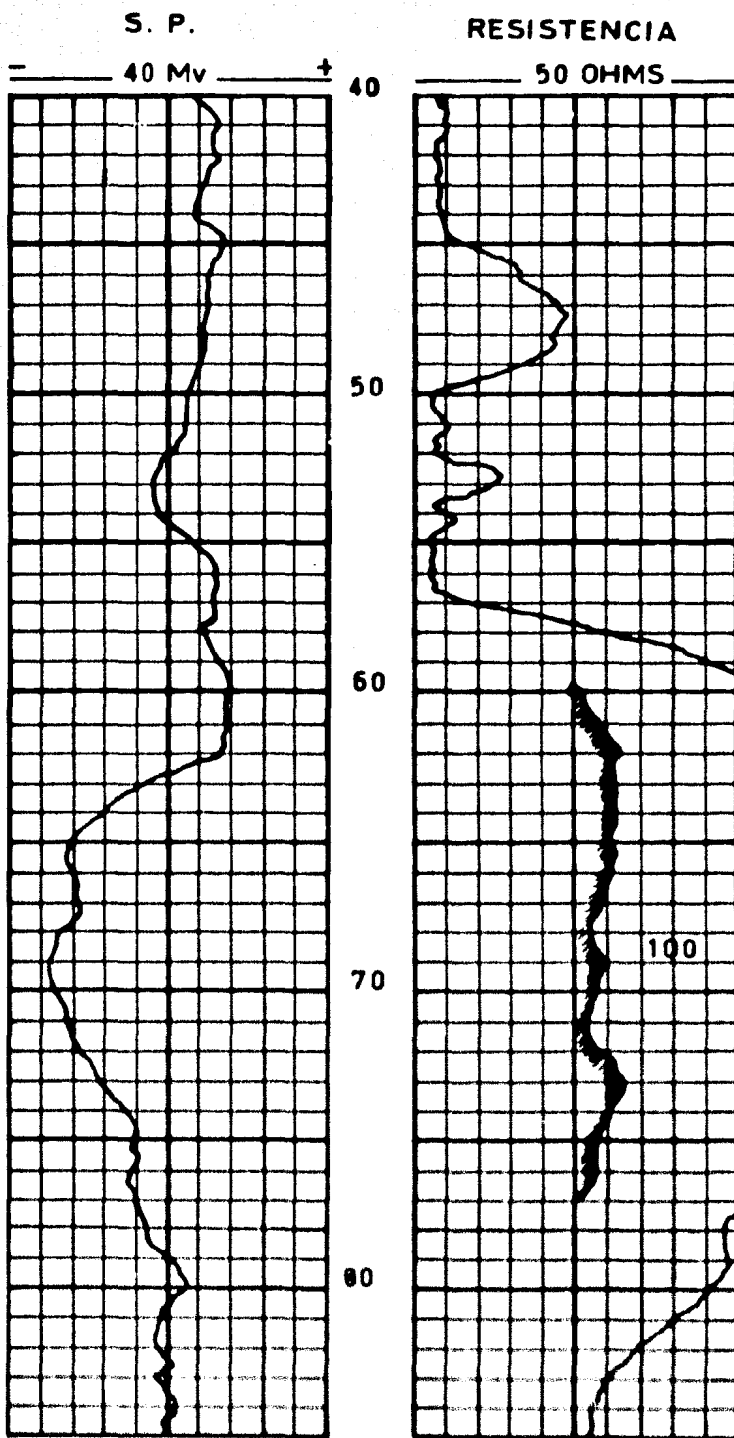


FIG III. G. A.

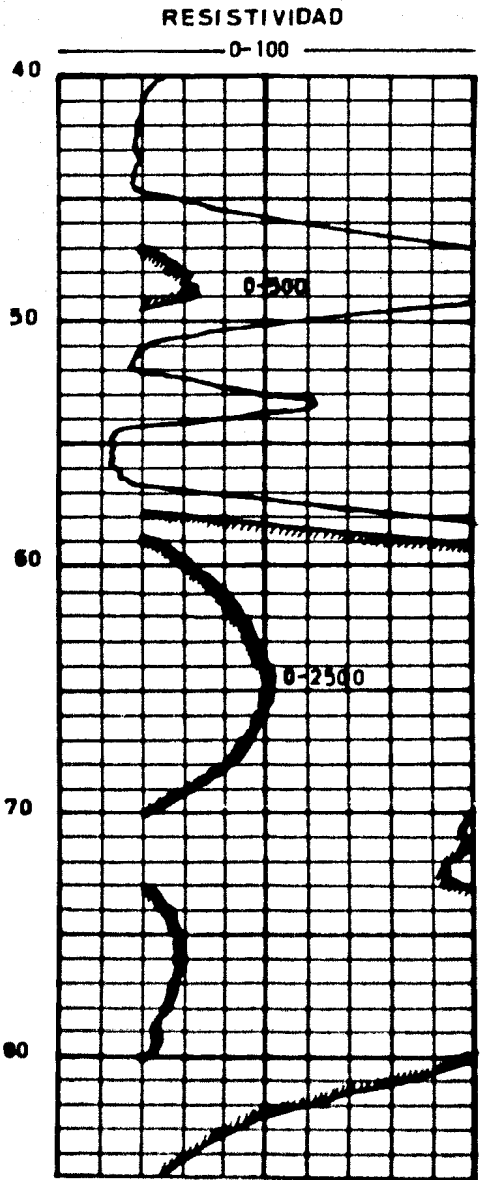
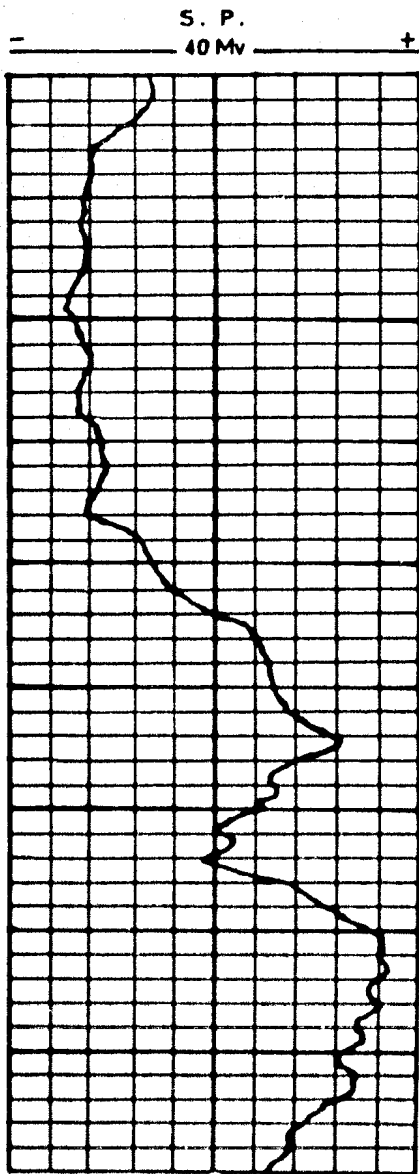


FIG. III. 6.B.

TIPO DE FORMACION	S.P.COMPARADO CON EL DE LA ARCILLA	RESISTENCIA	TIEMPO DE -- PERFORACION
Arena saturada con agua dulce.	pequeña	Alta	Rápido
Arena con agua salobre.	Intermedia a la izquierda.	Intermedia	Rápido
Arena con agua salada.	Grande a la izquierda.	Baja	Rápido
Arcilla	-----	Baja	Rápido
Roca con agua dulce.	No significativo.	Alta	Lento
Roca densa	" " "	Muy alta	Muy lento
Roca con agua salobre.	" " "	Intermedia	Lento
Roca con agua salada.	" " "	Baja	Lento

Basandonos en estos criterios es la forma de interpretar estos perfiles, los cuales por el tipo de inversión se usan con bastante frecuencia en el trabajo de investigación de acuíferos.

III.4.- HERRAMIENTA MULTIELECTRODO.

Esta herramienta se denomina multielectrodo por el principio que se usa para hacer las mediciones de resistividad en formaciones. Cabe aclarar que éste método mide la resistividad eléctrica y la no resistencia eléctrica, como en el caso de la herramienta monoeléctrodo, puesto que en este caso depende de la geometría del arreglo de electrodos y dependiendo de los esp

clamientos y las formas de medición se obtienen los distintos tipos de curvas de resistividad en los registros eléctricos convencionales.

Se tratan los arreglos normal y lateral, por ser los más usados en perforaciones para agua; aunque existen muchos más pero sólo se emplean en la industria petrolera.

Con estos dos arreglos podemos conocer de manera más precisa las resistividades de la zona invadida y la zona no contaminada, con las cuales se realizan las interpretaciones de los perfiles de manera cuantitativa, y no como en el caso de un solo electrodo que ahí se hacen de manera cualitativa.

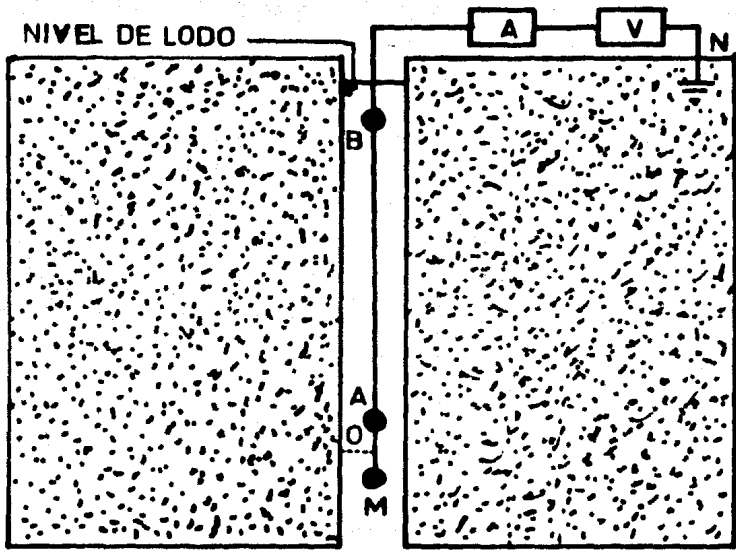
III.4.1.- PRINCIPIO ELECTRICO.

Para realizar estas mediciones se necesitan cuatro -- electrodos, los electrodos A y B son de corriente, con los cuales excitamos el terreno, los electrodos M y N son de medida y nos sirven para registrar las caídas de potencial. Considerando teóricamente que los colocamos en un medio isotropo y homogéneo donde el electrodo B está muy lejos de A (Teóricamente en el infinito), en este último punto se considera que el campo eléctrico -- creado es esférico como se muestra en la Fig. III.7.

La ecuación del potencial eléctrico esférico creado -- por este sistema de electrodos tiene la expresión siguiente:

$$V_{mn} = \frac{IR}{4 \pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Como para poder considerar que el campo eléctrico en-



ARREGLO
NORMAL DE
ELECTRODOS

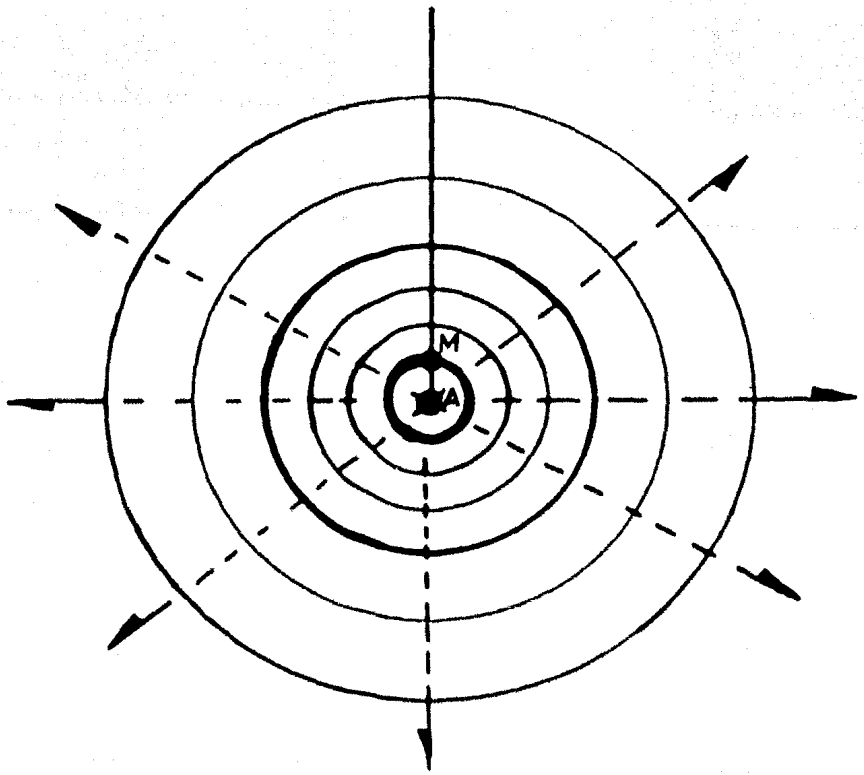


FIG III . 7

A es esférico, fué necesario que B estuviera en el infinito (teórico), tenemos que las distancias BM y BN son muy grandes y sus recíprocos por lo tanto muy insignificantes por lo que se desprecian.

Haciendo un cambio de variable en la ecuación anterior tenemos:

$$\text{Si } K = 4\pi \frac{AM}{AM} \times \frac{AN}{AN}$$

Llamando a K constante geométrica del arreglo, podemos hacer la ecuación de la forma siguiente:

$$V_{mn} = \frac{IR}{K}$$

De esta expresión despejamos la resistividad de R teniendo la expresión siguiente:

$$R = \frac{K}{I} V_{mn} \quad \text{ecuación III.4}$$

La ecuación III.4 nos da la resistividad para arreglos multielectrodos, con un electrodo al infinito; se usa con la observación de que sólo varía K dependiendo del arreglo usado.

III.4.2.- ARREGLO NORMAL.

Con este tipo de arreglo se obtienen las curvas normales corta y larga, dependiendo del espaciamiento entre A y M. Para obtener por este sistema la curva normal, es necesario una sonda de dos electrodos, los otros dos van a tierra para cerrar

el circuito siendo uno de medida y otro de corriente como se muestra en la figura III.7.

Los equipos para registro constan de un cable de 3 ó 4 conductores, por lo que un electrodo de corriente está a una distancia considerable en la misma sonda que se mueve en el pozo, por estar el electrodo de medida muy cerca del electrodo de corriente, se considera el campo esférico en este punto.

El espaciamento utilizado para esta curva normal es generalmente el propuesto por la compañía Schlumberger que es de 40 cm entre A y M, por lo que al tener en A un campo eléctrico esférico, tenemos superficies equipotenciales esféricas alrededor de él, al medir una de estas esferas, la que pasa por el electrodo M, la caída que obtenemos es ocasionada por la resistencia de una esfera de radio $AM = a$ 40 cm, que al involucrar el factor geométrico K en la ecuación III.4, obtendremos la resistividad de dicha esfera.

Para nuestro caso el electrodo B es ya a 4 mts. de M por lo que K estará dado por la expresión siguiente:

$$K = \frac{(AM) \cdot (BM)}{(BM) - (AM)} \quad 4\pi$$

Donde $AM = 40$ cm. y $BM = 4.00$ mts. Entonces $K = 5.69$

Por esta razón para un arreglo normal la resistividad dependerá de los valores de I y V, por lo que la resistividad tiene la expresión siguiente: $R = 5.69 \frac{V}{I}$

Los equipos mandan una corriente constante y sólo se registran las variaciones del voltaje que se relacionan directamente con los valores de resistividad.

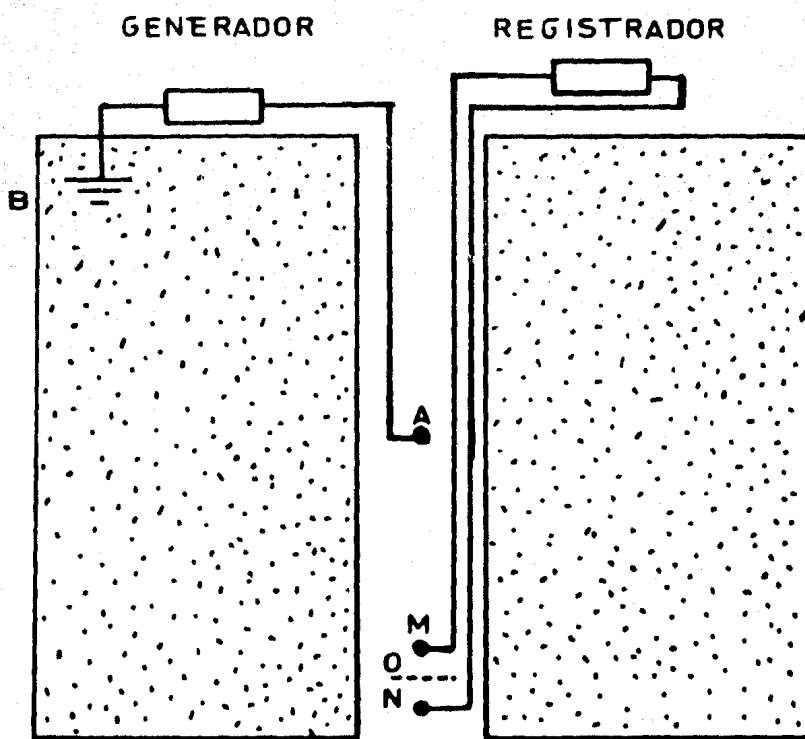
La figura III.7, presenta un campo eléctrico creado y la forma de la distribución de las líneas radiales de corriente y las superficies esféricas equipotenciales. Por lo que la resistividad medida con un arreglo normal corresponde a una esfera de material que tiene un radio de 40 cm; a ésta resistividad se le da el nombre de resistividad aparente por estar dentro de éste volúmen un cilindro de fluido de perforación, otro que corresponde a la zona de invasión y a la de la zona no contaminada. Por lo que esta curva está afectada por el diámetro del pozo y la resistividad del fluido de perforación R_m .

El punto de referencia de profundidad está en el punto medio entre A y M al que se le llama O con el cual se ajusta la profundidad en el papel de nuestro registro y en el pozo.

III.4.3.- ARREGLO LATERAL.

Consta de 2 electrodos de medida M, N y 2 electrodos de corriente: A y B, como se muestra en la figura III.8. La disposición de electrodos para la sonda lateral, se caracteriza -- por tener 2 electrodos de medida y un electrodo de corriente a una distancia de estos dos, que varía según el fabricante, en nuestro caso la distancia O A es igual a 4 mts., el punto O se localiza a la mitad de M N siendo O A el espaciamiento del arreglo.

Como el electrodo B de corriente está en la superfi-



ARREGLO LATERAL DE ELECTRODOS

FIG III. 6.

cie se considera en el infinito por existir una distancia considerable entre éste y A, el campo eléctrico en la cercanía del electrodo A se considera esférico, midiendo la diferencia de potencial entre las superficies potenciales que pasan por M y N - en el punto O se considera el gradiente de potencial entre M y N resultando la expresión siguiente:

$$V_{mn} = \frac{I R}{4 \pi} \left(\frac{1}{A M} - \frac{1}{A N} \right)$$

Por lo que R es:
$$R = \frac{4 \pi (A M) (A N)}{AN - AM} \frac{V_{mn}}{I}$$

El factor geométrico K será igual a: 553 para AM = a 4 mts. y AN = 4.40 mts. de esta manera los valores de resistividad serán proporcionales a las variaciones del voltaje V_{mn} para una corriente constante, por lo que R es entonces:

$$R = 553 \frac{V_{mn}}{I}$$

La resistividad medida por este arreglo corresponde al volumen de una esfera de formación con radio $O A = a 4.20$ mts., los valores obtenidos nos representan una mayor penetración en las paredes del pozo y en consecuencia obtenemos una resistividad aparente más aproximada al valor de R_t que es la resistividad de la zona no contaminada.

III.4.4.- DEFORMACION DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD.

Como ya se dijo, esto basa en medios homogéneos, isotropos e infinitos, pero en la realidad no es así por lo que nuestras curvas tendrán deformaciones y hay que considerarlas -

para nuestros cálculos ya que estas mediciones están afectadas por las resistividades y las dimensiones geométricas de todos los medios que rodean a la sonda como son: el pozo, zona invadida, zona no contaminada y zonas adyacentes.

Para interpretar correctamente las curvas de resistividad es necesario conocer curvas típicas que encontramos en -- los registros, para esto presentamos los casos más frecuentes.

La fig. III.9 A. Es una curva obtenida con un dispositivo normal, donde la capa intermedia es más resistiva que -- las formaciones adyacentes.

En la parte superior tenemos una capa gruesa de espesor $h = 10 \text{ AM}$. Podemos observar que la curva es simétrica, teniendo un máximo en el centro de la capa donde la lectura se -- aproxima a R_t , para el caso de no invasión, ó a R_{xo} para el caso de invasión.

El espesor aparente de la capa en la curva normal es menor que el espesor real, en una cantidad igual al espaciamento $A M$.

En la parte inferior tenemos una capa más delgada -- que el espaciamento $A M$. La curva es todavía simétrica observándose un mínimo menor que la resistividad de la formación adyacente frente a la capa. Dos picos aparecen encima y abajo de la capa, la distancia entre estos dos picos es el ancho de la -- capa más el espaciamento AM por lo que el espesor de la capa -- es igual a la distancia entre picos menos el espaciamento.

La fig. III.9 B.- Tiene también un dispositivo nor--

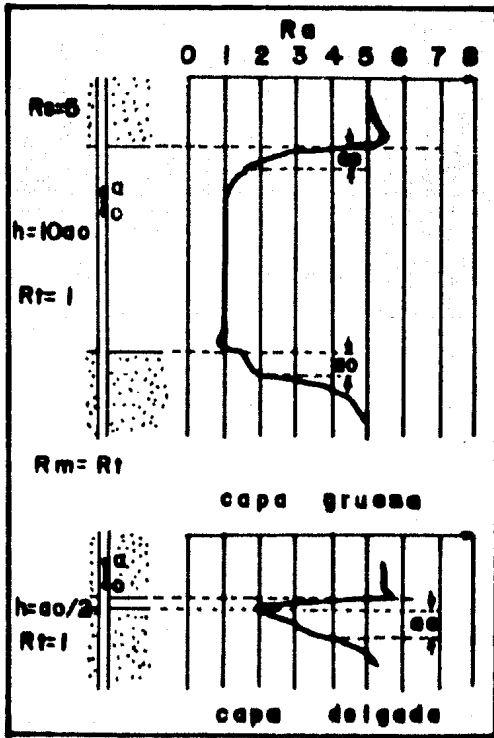
mal las capas intermedias son de resistividad menor que las formaciones adyacentes, las curvas son simétricas y el espesor - - aparente de las capas es mayor que el real.

Para el caso que la capa intermedia tenga un espesor mayor que el espaciamiento, tenemos que la distancia entre los puntos de inflexión son iguales a $AM + h$, la misma situación se presenta para el caso cuando el espesor de la formación es menor que el espaciamiento.

En la fig. III.10.A. Se tiene un dispositivo lateral donde las capas intermedias tienen mayor resistividad que las adyacentes. Se observa que las curvas no son simétricas, las dos primeras tienen un espesor mayor que el espaciamiento $0 A$, se ve que los valores de resistividad en la parte superior son considerablemente menores que los que toma en el contacto inferior. En la primera figura vemos que la capa toma valores de resistividad constante en un tramo, éste valor es el que se aproxima más a R_t . En la segunda tenemos un pico agudo frente a la capa para obtener el valor de R_t se toman $3/4$ partes del valor máximo.

Para el caso de una capa delgada, tenemos un pico -- frente a la capa, seguido de lecturas bajas en la zona ciega, luego un pico de reflexión, la relación $\frac{R_a \text{ max}}{R_a \text{ min}} \leq \frac{R_t}{R_s}$ es importante aún cuando no hay mucha precisión en el cálculo de R_t .

La fig. III.9.B. representa el caso de una curva lateral donde las capas intermedias son de resistividad menor que las capas adyacentes., las curvas no son simétricas, en éste ca



CURVAS LATERALES
TIPICAS

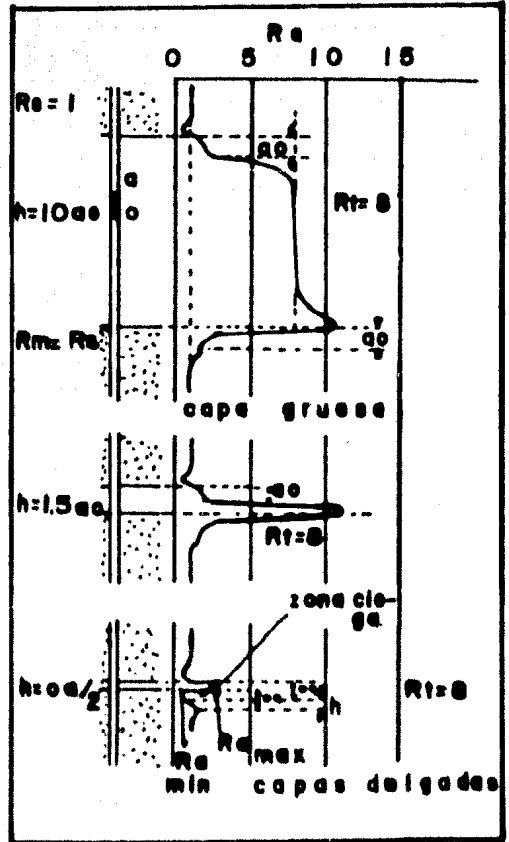


FIG. III. 10A

CURVAS NORMALES TIPICAS

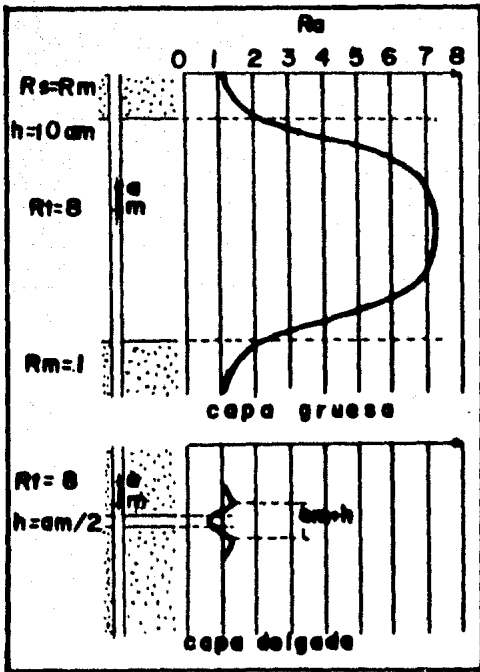


FIG. III. 9 A

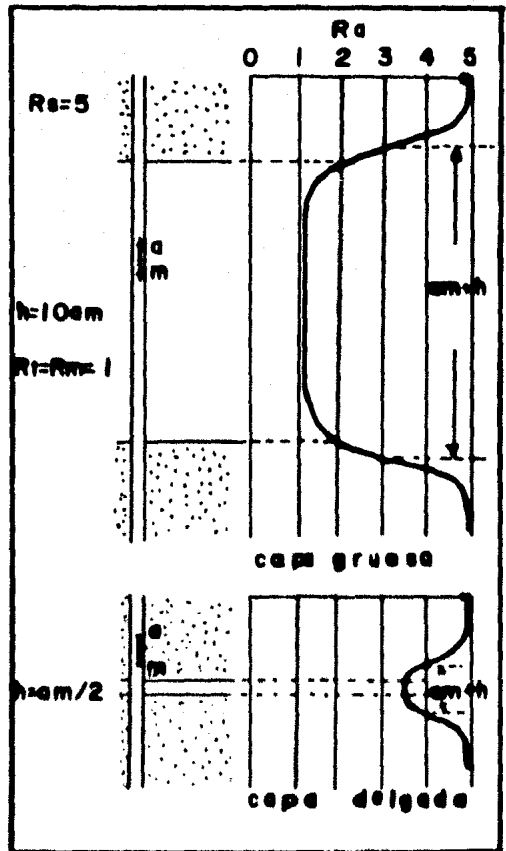


FIG. III. 9 B

so el desplazamiento se presenta abajo de la capa, notándose ésta en una porción de la curva igual al espaciamiento OA.

Los valores de R_t tanto a la curva normal como a lateral hay que hacerles la corrección por el efecto de diámetro de pozo y capas adyacentes, en las gráficas III.11 y III.12 están las correcciones para capas gruesas, con los valores corregidos se puede realizar ya la interpretación cuantitativa del acuífero, como se tratará más adelante.

Se presentan estas correcciones por ser las más importantes en una perforación para obtener agua.

**CORRECCION PARA CAPAS GRUESAS
POR DIAMETRO DE POZO DE LA
NORMAL DE 16"**

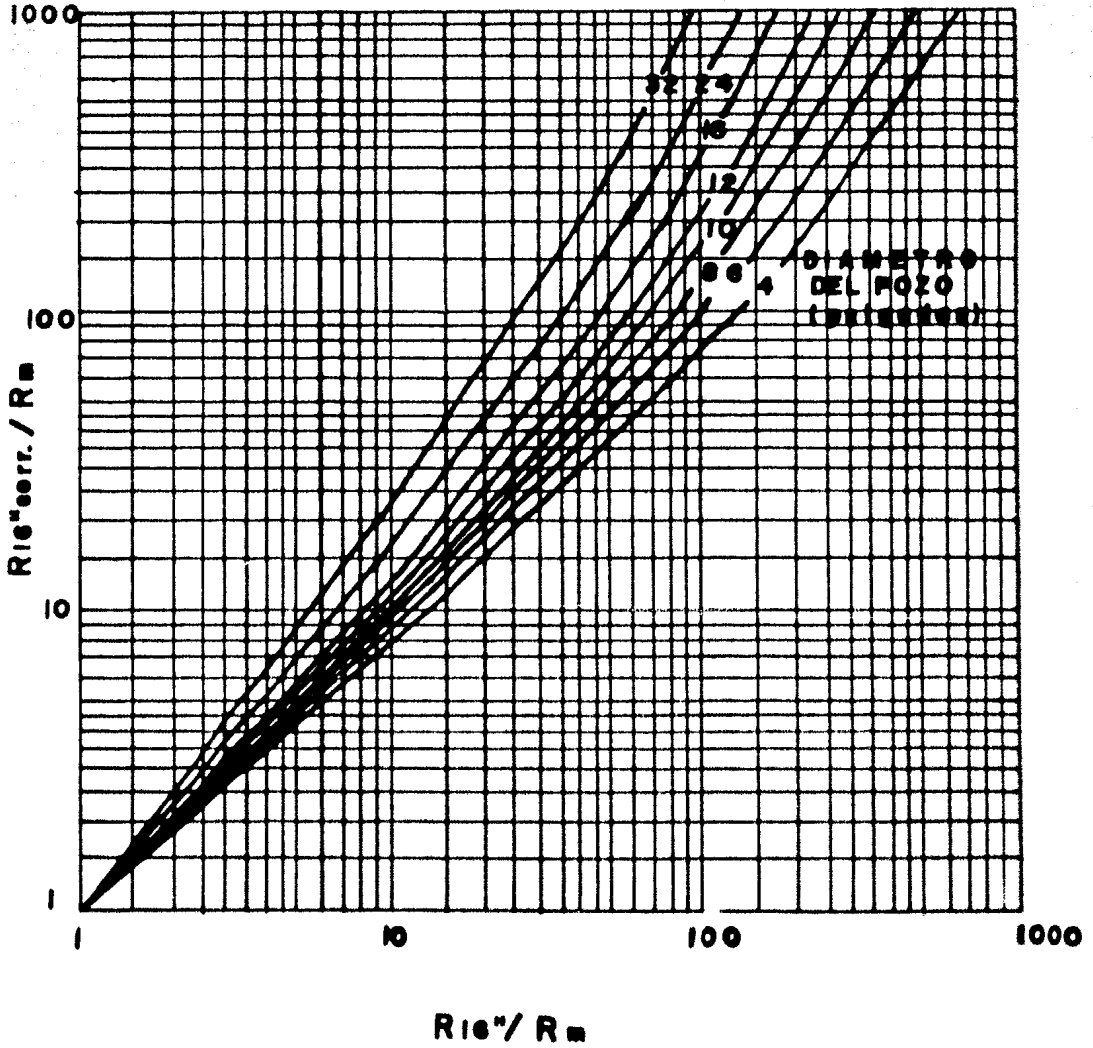


FIG. III - II

**CORRECCION PARA LATERAL DE 18'8" EN
CAPAS GRUESAS**

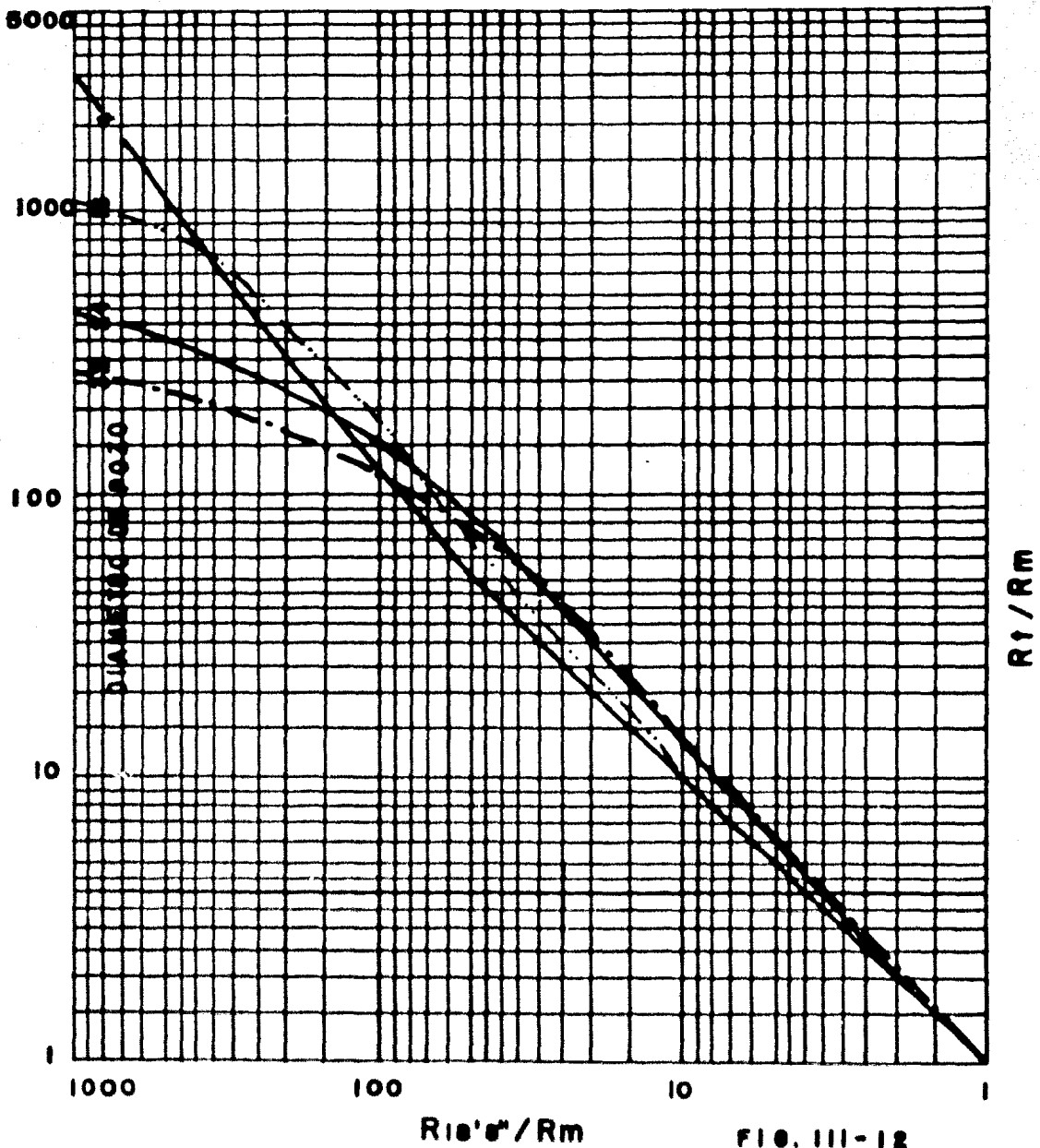


FIG. III-12

C A P I T U L O I V

IV.- REGISTROS RADIOACTIVOS.

Los registros radioactivos son básicamente 2: La curva de rayos gamma y la curva neutrón.

Estos perfiles tienen la ventaja de poderse correr - en pozos ademados, secos y con fluidos de perforación aislantes.

En la investigación de aguas subterráneas su uso no es muy frecuente por razones económicas, pero la información -- que obtenemos de ellos nos ayuda a hacer una mejor interpreta-- ción y evaluación de acuíferos.

IV.1.- CURVA DE RAYOS GAMMA.

La curva de rayos gamma es una medida de la radioac-- tividad natural de las formaciones, por lo que su uso principal es en la detección de minerales radioactivos; ya que estos mine-- rales tienden a concentrarse en las arcillas, es una herramien-- ta que nos permite identificarlas en una perforación.

Las formaciones limpias tienen usualmente un bajo ni-- vel de radioactividad, a menos de que estén contaminadas de ce-- nizas volcánicas, detritos de granito radiactivo y cuando el -- agua de formación contiene sales de potasio.

Esta curva puede ser corrida en pozo entubados lo -- que en cierto momento se puede aplicar en pozos viejos de los - que no se tenía información y en ocasiones para rehabilitación-- de los mismos. Con frecuencia se usa como sustituto del S.P. --

cuando éste no es satisfactorio, por lo que es recomendable correrse en pozo hechos con equipo de percusión donde generalmente el S.P. no tiene buena resolución.

IV.1.1.- PROPIEDADES DE LOS RAYOS GAMMA.

Los rayos gamma son erupciones de onda electromagnéticas de alta energía que son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos.

Casi toda la radiación gamma en la tierra es emitida por el isotopo radioactivo del potasio (K 40) y por elementos radioactivos de la serie Uranio y Torio. Cada uno de estos elementos emiten rayos gamma cuyo número y energía son distintos - en cada elemento, por ejemplo el K 40 emite rayos gamma de un solo nivel de energía de 1.46 Mev, mientras que las series Uranio y Torio emiten rayos gamma de varios niveles de energía.

Los rayos gamma al pasar através de la materia experimentan choques sucesivos con los átomos de la formación de -- acuerdo con el efecto Compton de dispersión que se debe a que - un rayo gamma al chocar con un electrón de la formación pierde energía cinética, continuando su trayectoria con menor velocidad y así sucesivamente pierde energía en cada coalisión.

Finalmente después de que el rayo gamma ha perdido la suficiente energía, es absorbida de acuerdo al efecto fotoeléctrico, que se manifiesta como una expulsión de electrones por - los átomos de la formación que absorbieron los rayos gamma.

IV.1.2.- EQUIPO.

La sonda de rayos gamma consta de un contador Geiger Mueller el que se usó por mucho tiempo, actualmente se usan los scintilómetros para la medición de la radioactividad originada en las paredes del pozo.

Estos contadores constan de un circuito R C el cual tiene una constante de tiempo que se regula de acuerdo a la radioactividad de las formaciones, por lo cual es necesario calibrar la sonda de tal manera que si la constante de tiempo es de 2 segundos, la velocidad de registro es de 30 cm. por segundo.- De acuerdo a la constante de tiempo escogida será la velocidad de registro.

Puede darse el caso de pozos con diámetro grande o bajo contraste radioactivo, entonces la constante será mayor y la velocidad menor.

IV.1.3.- RADIOACTIVIDAD DE LAS ROCAS.

Los rayos gamma es una herramienta que clasifica las formaciones en 2 grupos: Arcillas y Rocas.

En las arcillas se concentran los minerales radioactivos por lo que producen radiaciones de intensidad variable dependiendo de la concentración de elementos radioactivos y la edad de las arcillas siendo más intensa en las recientes y menos en las viejas, por lo que la intensidad de radiación varía de un área a otra.

Las rocas tienen baja radioactividad cuando están libres de material arcilloso, a menos de que estén contaminadas con material radioactivo como puede ser de: Arenas de arkosa, -

feldespatos, granitos radioactivos, etc., aún cuando presentan alta radioactividad es menor a la que se encuentra en las arcillas.

IV.1.4.- INTERPRETACION DE LA CURVA DE RAYOS GAMMA.

Para la interpretación de esta curva en pozo de agua es importante considerar los puntos siguientes:

1.- En un área dada, solamente la medición e intensidad relativa para varias formaciones es significativa.

2.- Las formaciones que presentan poca intensidad de radiación gamma son: Arenas gravas, areniscas, calizas, dolomitas, anhidrita o carbón; sin contener material arcilloso.

Una reducción en la intensidad de radiación puede indicar una alta porosidad y permeabilidad del acuífero o puede - indicar una roca impermeable.

La información geológica es necesaria para evitar ambigüedades.

3.- Si se sabe que las formaciones del área presentan solamente baja intensidad de radiación, todas las partes del registro que presenten alta intensidad son probables arcillas.

Los intervalos de intensidad media corresponderan a acuíferos que contienen algún material arcilloso; el contenido de arcilla puede asumirse como un incremento proporcional con - la intensidad de rayos gamma.

4.- Si no es conocida la radioactividad de la zona, - no es posible la interpretación de los intervalos que presentan

alta o intermedia intensidad de rayos gamma. Para evitar estas ambigüedades se recomienda el uso del registro eléctrico o la experiencia local.

5.- La curva de rayos gamma es casi siempre correlacionable con el corte litológico y con la información local.

IV.1.5.- INTERPRETACIONES DIFICILES.

Esta situación se presenta, cuando el agua que se -- utiliza para la preparación del lodo de perforación, arcillas, -- y parte de recortes radioactivos; pueden incrementar la intensi-dad de rayos gamma.

En rocas fracturadas, al contaminarse con el lodo de perforación se puede confundir con acuíferos arcillosos.

En pozos entubados la curva de rayos gamma estará -- afectada por el engravado, se parará parte de la radiación gamma de la que se detectaría en otras condiciones; teniendo una -- reducción en la amplitud de los rayos gamma.

Si el material usado para engravar es radioactivo, -- como ciertas rocas volcánicas que se usan en el engravado de pozos, las deflecciones que presenta la curva, se deberán principalmente a la presencia y espesor de este material.

Todas estas situaciones son dificultades en potencia; por lo que es necesario conocer lo más posible las condiciones del pozo y las formaciones que fueron afectadas en la perforación.

IV.1.6.- USOS PRINCIPALES DE LA CURVA DE RAYOS GAMMA.

1.- La aplicación del registro de rayos gamma en pozos adomados, se realiza solamente cuando no se tiene información de ellos, o sea en el caso de que pozos terminados no produzcan la cantidad de agua necesaria, nos puede ayudar a localizar posibles acuíferos que no se estén explotando por lo que se utilizan para rehabilitación de pozos.

2.- Esta curva es generalmente usada en pozos abiertos, cuando un registro eléctrico no puede ser corrido por las condiciones del pozo; o cuando el S.P. no tiene buena resolución.

3.- Los espesores y profundidades de capas, se obtienen también por este medio; siempre y cuando los espesores no sean menores de 60 cm.

4.- La información obtenida de él, es un suplemento para el registro eléctrico, y en particular nos ayuda a identificar capas de arcillas y zonas porosas en rocas densas.

5.- También nos permiten estimar en algunas ocasiones la reducción de la permeabilidad debido a la presencia de arcilla en el espacio poral.

IV.2.- PERFIL NEUTRONICO.

Esta curva rara vez se usa con el fin de investigación de acuíferos, pero es necesario mencionarla por ser importante como complemento de un registro eléctrico; desgraciadamente por razones de costo en México no se utiliza, brevemente menciona sus aplicaciones para éste fin.

Los perfiles neutrónicos se usan principalmente para

ubicar formaciones porosas y determinar su porosidad.

Responden principalmente a la cantidad de hidrógeno presente en la formación, por lo que, en formaciones limpias cuyos poros están llenos de agua o petróleo, esta curva nos da el valor real del espacio poral lleno de fluido.

Es la razón de su aplicación en pozos de agua, ya que conociendo la porosidad real podemos conocer el factor de formación y aplicar la fórmula de Archie, en la interpretación de registros eléctricos, permitiendo hacer la interpretación cuantitativa de ellos.

IV.2.11.- FUNDAMENTO DEL METODO.

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras, cuya masa es casi idéntica a la del átomo de hidrógeno, en la sonda tenemos una fuente radioactiva de neutrones que emite -- constantemente neutrones de alta energía, los que al encontrarse con los núcleos del material de la formación, chocan elásticamente y en cada coalición el neutrón pierde parte de su energía.

La cantidad de energía perdida en cada choque depende de la masa relativa del núcleo con el cual coaliciona, la mayor pérdida de energía ocurre cuando el neutrón choca con un núcleo de masa prácticamente igual, por ejemplo el del hidrógeno.

Coaliciones con núcleos pesados no provocan mucha -- pérdida de energía, por el efecto de rebote; de esta manera la pérdida de velocidad dependerá principalmente de la cantidad de hidrógeno en la formación.

En pocos microsegundos los neutrones han sido amortiguados, por los choques sucesivos, a velocidades termales correspondientes a energías alrededor de 0.025 electro-volts.

Entonces se dispersan sin orden, sin perder más energía hasta que son capturados por los núcleos de átomos tales como de hidrógeno, cloro, silice, etc.

Los núcleos absorbentes se excitan y originan una emisión de rayos gamma de alta energía, denominados Rayos Gamma de Captura. Dependiendo del tipo de herramienta, ésta puede detectar los rayos gamma de captura o sus propios neutrónes, mediante un detector colocado en la sonda.

Cuando la concentración de hidrógeno de la formación que rodea a la fuente de neutrónes es alta la mayoría de los neutrones son retardados y capturados aún a una corta distancia de la fuente. Con la distancia de fuente a detector comunmente-utilizada, a una mayor lectura corresponde a una menor concentración de hidrógeno y vice-versa.

Como el agua en su mayoría es hidrógeno, esta curva tiene buena resolución en la exploración de acuíferos, ya que responde a la presencia de este elemento.

IV.2.2.- EQUIPO.

Las sondas utilizadas para este fin, son los sistemas GNT y SNP. Las fuentes de neutrónes empleadas emiten neutrones con una energía inicial de varios millones de electrón-volts, usando fuentes de Plutonio-berilio o Americio-berilio.

El sistema GNT es una herramienta no direccional, --

que es sensible a los rayos gamma de captura de alta energía y los de velocidad termal.

El sistema SNP lleva la fuente y el detector colocado en un patín, en contacto con la pared del pozo. El contador-proporcional está blindado de tal manera, que sólo registra neutrones de energía por encima de 0.4 electrón-volts.

El SNP tiene ventajas que el GNT, ya que no hay que realizar correcciones por efecto de pozo, y nos da valores de porosidad real de la formación; aún cuando no se pueda correr en pozos entubados, como el GNT.

IV.2.3.- APLICACIONES EN POZOS DE AGUA.

El perfil neutrónico para pozos de agua no se usa en la actualidad pero, es una herramienta en potencial y lo más probable es que con el tiempo se llegue a utilizar.

Uno de los más importantes usos sería, la determinación de la porosidad de los acuíferos; con lo cual se podría interpretar cuantitativamente los registros eléctricos de manera más precisa. Su operación no se lleva a cabo por razones de costo del equipo, por problemas de tipo de operación ya que por ser una herramienta que funciona a base de patines, se presentarían atorones en formaciones sueltas, las que con frecuencia se encuentran en formaciones someras, como es el caso de perforaciones para agua.

C A P I T U L O V

V.1.- ANÁLISIS DE REGISTROS EN POZOS DE AGUA.

La evaluación de acuíferos presenta varios problemas, una buena parte de ellos nos lo resuelven los registros eléctricos y ocasionalmente el de rayos gamma.

Asumiendo que se conocen los datos de perforación como son: tiempo de perforación corte litológico y geología local- podemos atacar los problemas siguientes:

A.- Presencia de Agua.

La existencia de acuíferos se puede inferir a partir de la información que se obtiene de los registros eléctricos y - radioactivos. Las profundidades y espesores de éstas capas se de terminan también de ellos.

En pozos además la curva de rayos gamma nos marca - principalmente los intervalos que contienen arcilla y donde no - se manifiestan intensidad de radiación pueden ser probables acuíferos, los que se pueden evaluar por medios más caros como un registro neutrón compensado.

B.- Calidad del Agua.

Las curvas de resistividad y el S.P. nos dan la salinidad del agua de formación que es un dato muy importante es el estudio de acuíferos.

La determinación cuantitativa de la salinidad es posible realizarla cuando se conocen la resistividad del acuífero, -

la porosidad y la resistividad del filtrado del lodo.

Esta información no se puede obtener totalmente de los registros eléctricos pero se pueden hacer cálculos aproximados que se acercan a la realidad lo cual se tratará con detalle posteriormente.

C.- Cantidad de Agua y Porosidad.

La cantidad de agua que puede aportar un acuífero es proporcional a su espesor, porosidad, permeabilidad y recarga.

El espesor de un acuífero granular se determina por los registros eléctricos de una manera aproximada y se puede determinar la posibilidad de ser acuífero productor.

El espesor de un acuífero granular puede determinarse y cuantificarse de un registro eléctrico, lo mismo que de capas impermeables, los estratos arenosos se pueden determinar -- también a partir de las curvas de rayos gamma cuando no existen rocas en las formaciones perforadas, las rocas se pueden determinar con un registro eléctrico.

Los espesores efectivos de acuíferos no granulares no pueden evaluarse con éstos registros, una aproximación del intervalo fracturado en una formación densa puede ser estimado por -- las curvas de resistividad, atenuación acústica y otros como el de calibración.

La porosidad se puede evaluar de manera aproximada -- partiendo de registros eléctricos; la manera más efectiva es la herramienta de neutrón que nos da porosidades reales de formación.

D.- Permeabilidad.

No existen datos obtenidos de registros que nos den la permeabilidad de un acuífero, por lo que para conocerse se hacen necesarias mediciones de lujo y técnicas de trasadores para lo cual es necesario bombear e inyectar fluidos en el pozo para obtener una aproximación de éste parámetro.

No existe una herramienta que nos de la permeabilidad directamente, ya que es una prueba mecánica, pero los registros eléctricos en acuíferos granulares nos dan una idea de la permeabilidad, ya que dependiendo de la arcillosidad y el tamaño de los granos que forman el acuífero y correlacionandolos con los valores obtenidos de un registro de rayos gamma si es posible se puede determinar la permeabilidad de una manera cualitativa en forma aproximada clasificando los acuíferos en:

1. Acuíferos de buena permeabilidad
2. Acuíferos de permeabilidad media
3. Acuíferos de baja permeabilidad
4. Acuíferos impermeables

E.- Identificación de Capas.

No existe herramienta geofísica que nos de la composición mineralógica de una formación, aún cuando se pueden identificar algunos minerales usando métodos de radiación espectral; en áreas donde se conocen las formaciones, sus propiedades son similares pueden correlacionarse con sus valores de resistividad y de radioactividad.

V.-2.- INTERPRETACION CUANTITATIVA.

El procedimiento para la interpretación de perfiles de pozos, se realiza desarrollando una secuencia de pasos que se siguen para la localización de acuíferos y algunos cambios en la salinidad del agua de formación, basándose en el uso de registros eléctricos, rayos gamma ocasionalmente y la información adicional del área en estudio.

El procedimiento para la interpretación requiere determinar por anticipado cual de las 3 siguientes situaciones se presenta: A).- Acuíferos granulares en formaciones arcillosas (sin presentarse rocas densas). B).- Una combinación de rocas y arcillas. C).- Una combinación de rocas pero no arcilla.

Si el agua de formación es conocida en la zona, el problema se reduce a encontrar solamente estratos permeables. Para el caso A, los acuíferos se manifestarán por las resistividades más altas, en el caso de B los acuíferos tendrán resistividades intermedias para los cuales el avance en la perforación fué de medio a rápido, para el caso C los acuíferos se manifestarán con valores de resistividad relativamente bajos comparados con los demás presentando un avance de medio a rápido.

Si se conoce que en un intervalo de interés existe agua salobre o salada el problema se reduce a localizar éste acuífero y estimar su salinidad por medio de los valores de resistividad o del SP, conociendo ésta salinidad dependiendo del uso que se le vaya a dar al agua la perforación podrá ser positiva o negativa.

La teoría para la interpretación de perfiles eléctricos en pozos se basa considerando que los acuíferos son granulares, para lo cual se presentan 2 ejemplos de la interpretación cuantitativa de éste tipo de formaciones.

V.-2.-1.- DETERMINACION DE LA CALIDAD DEL AGUA (R_w)

El conocimiento de la resistividad del agua de formación R_w , nos permite calcular la salinidad del agua siendo muy importante por ser el objetivo de la perforación y de la interpretación de los registros eléctricos. El conocimiento de R_w se puede realizar por 2 métodos usando la curva de SP y por las -- curvas de resistividad.

A.- Determinación de R_w por medio de la curva de SP.

Una manera aproximada de conocer la resistividad del agua de formación R_w partiendo de la curva de SP es una manera no precisa pero se tienen buenas aproximaciones usando la ecuación $SP = -K \text{ Log } \frac{R_{mf}}{R_{we}}$

Donde $K = a 70.7 R_{mf}$ la resistividad del filtrado de lodo $R_{we} = a$ la resistividad del agua de formación obtenida de la curva de SP.

Por lo general las perforaciones para agua son someras y los efectos de invasión y temperatura se desprecian, considerando $R_{mf} = R_m$ a 25°C para nuestros cálculos.

Para una precisión mayor se recomienda la ecuación de las actividades químicas, pero se hace necesario un análisis químico del filtrado del lodo lo que en el campo generalmente -

no se realiza, con el cual se utilizarían las gráficas de las -- Figs. III.2 y III.3, de ésta manera se conoce la concentración - de los cationes por separado, y en consecuencia sus actividades - con lo cual se puede usar la ecuación siguiente:

$$SP = -K \text{ Log } (A) W / (A) Mf.$$

Los ejemplos que se presentan en estos trabajos las - sales que predominan son los cloruros de sodio por lo que se usa - rá la primera ecuación en la interpretación de los registros A y B.

Se presenta un ejemplo de la forma de como se hace -- el cálculo de Rwe:

En el intervalo del registro A de 217 mts a 224 mts - tenemos un acuífero granular que por la forma de la curva del SP es un acuífero saturado de H₂O dulce y contamos con la siguiente información: SP = + 10 m.v. y Rm = 11 Ohms.m a 39°C, en la fig.- 11.-1.- obtenemos el factor de corrección por temperatura para - obtener Rm a 25°C, entonces Rm = 11 x 1.25 = 13.75 Ohms.m a 25°C por lo que sustituyendo en nuestra ecuación se tiene: + 10 = - 70.7 (Log 13.75 - Log Rwe), de ésta despejamos Rwe que es igual a 19.53 Ohms.m. a 25°C, con este dato vamos a la figura 11.-2.- para encontrar la concentración de sólidos totales di- - sueltos en partes por millón para éste caso utilizando una solu- ción de Na Cl se obtuvo una concentración de 280 Ppm.

Para localizar los intervalos de interés se realiza - una inspección del registro marcando los intervalos con posibili- dades de ser acuíferos de acuerdo a sus valores de resistividad,

SP, y corte litológico.

Las tablas que se presentan a continuación, nos muestran los intervalos de interés y la interpretación de la curva de SP, para los registros A y B.

Registro A.

Datos : $R_m = 11$ ohms.m a 39°C , se usó un $R_m = R_{mf}$ corregido a 25°C igual a 13.75 ohms.m.

INTERVALO (mts)	SP (m.v.)	Rwe(ohms.m)	CONCENTRACION.
1. 62.5 a 65	+16	23.15	220 ppm
2. 74 a 82	+18	25.4	200 ppm
3. 99.5 a 102	+4	16.04	300 ppm
4. 108 a 114.5	+10	19.53	270 ppm
5. 136 a 138	+8	18.29	285 ppm
6. 143 a 153	+14	22.27	230 ppm
7. 159 a 162	+8	18.29	285 ppm
8. 189 a 223	+8	18.29	285 ppm
9. 217 a 224	+10	19.53	280 ppm
10. 238 a 243	+8	18.29	285 ppm
11. 247 a 260	+10	19.53	280 ppm
12. 270 a 278	+10	19.53	280 ppm
13. 307 a 316	+7	17.7	350 ppm
14. 324 a 337	+6	17.13	360 ppm
15. 342 a 352	-8	10.81	510 ppm
16. 362 a 365	-6	11.55	430 ppm
17. 376 a 390	-8	10.81	510 ppm
18. 400 a 415	-8	10.81	510 ppm

Presencia de agua de mala calidad

19.	445	a	470	-28	5.61	1200 ppm
20.	477	a	484	-4	12.33	300 ppm
21.	496	a	501	-12	9.5	560 ppm

La solución que se tomo de referencia para calcular las salinidades es de NaCl. La salinidad aproximada que tendrá este pozo es del orden de las 320 ppm de sólidos totales disueltos, considerando que no se explotará el acuífero de mala calidad.

Registro B.

Datos : $R_m = 7$ ohms.m a 26°C , $R_m = R_{mf} = 7.14$ ohms.m a 25°C .

INTERVALO (mts)	SP (m.v.)	Rwe(ohms.m)	CONCENTRACION
1. 40 a 48	-10	5.16	1250 ppm
2. 58 a 61	-4	6.27	850 ppm
3. 65 a 68	-2	6.7	780 ppm
4. 70 a 75	-8	5.5	930 ppm
5. 96 a 98	-10	5.16	1250 ppm
6. 118 a 126	-12	4.83	1300 ppm
7. 146 a 150	-7.5	5.6	930 ppm
8. 219 a 224	-30	2.7	2000 ppm
9. 226 a 228	-22	3.5	1700 ppm

Este pozo producirá agua salobre del orden de las 1200 ppm dependiendo del uso que se le vaya a dar servirá o no, ya que tiene el límite superior para usos domésticos, y puede pasar algún límite obligatorio para un elemento por lo que es nece

sario realizarse un análisis químico de ella.

Se observa que el potencial natural en éste registro es negativo, por lo que era de esperarse agua de mala calidad; - en comparación del registro A donde las desviaciones de SP son positivas y tenemos agua de buena calidad.

V.2.2.- Determinación de R_w por medio de las curvas de resistividad.

El procedimiento parte de la ecuación de Archie que es:

$$F = R_t / R_w = A / \phi^m$$

Para poder conocer R_w es necesario conocer a R_t y a F . R_t se obtiene de el registro eléctrico, F en el laboratorio, lo cual no es posible realizar, pero con experiencia y conocimiento del área se pueden dar valores aproximados de F .

En el caso de que existan pozos productores en la zona, podemos conocer el valor de R_w , con el cual se puede tener un valor de F para aplicarse en formaciones conocidas.

Otra manera de encontrar a F sería conociendo la porosidad efectiva del acuífero, para lo cual se necesita un registro neutrón que en la práctica de exploración de aguas subterráneas no se realiza; otra forma puede ser con un análisis granulométrico de las muestras siempre y cuando no se hayan alterado -- con la perforación, para conocer la porosidad, con la gráfica de la fig. 11.3 y 5 se obtendría F . En nuestro caso se darán valores de F de acuerdo al corte litológico de los pozos y los valores de R_t se tomarán de la curva inversa, por tener ésta mayor penetración en la formación y estar menos afectada por la colum-

na del lodo, siguiendo los criterios ya mencionados.

Por ejemplo en el intervalo de 445 a 470 mts. en el registro A por ser un estrato de espesor mayor al espaciamento-
OA se toma el valor donde la curva es constante, entonces $R_t = 30$ ohms.m, dándose el valor aproximado de $F = 7$; sustituyendo en la ecuación tenemos:

$$R_w = 30/7 = 4.29 \text{ ohms.m}$$

Observamos que difiere al calculado por medio de la curva de SP; éste método es más preciso siempre y cuando se tenga experiencia en la proposición de F.

Conociendo R_w en la fig. 11.2 se encuentra la concentración de sólidos totales disueltos en ppm, escogiendo la solución de el tipo de sal que se creó que predomina en la zona.

Las tablas que se presentan a continuación, se refieren al cálculo de R_w por medio de las curvas de resistividad de los registros A y B, encontrando la concentración de sólidos totales disueltos tomando una solución patrón de Na Cl y valores asignados de F.

Registro A.

INTERVALO (mts)			R_t (ohms.m)	F	R_w (ohms.m)	CONCENTRACION.	
1.	74	a	82	60	3	20	230 ppm
2.	108	a	114.5	52	3	17.5	280 ppm
3.	143	a	153	112	6	18.75	250 ppm
4.	189	a	223	55	3	18.33	260 ppm

5.	117	a	224	56	3	18.75	250 ppm
6.	238	a	243	40	3	13.33	350 ppm
7.	247	a	260	112	7	16.07	300 ppm
8.	270	a	278	71	6	11.8	400 ppm
9.	307	a	316	112	7	16.07	300 ppm
10.	324	a	337	93	7	13.30	350 ppm
11.	376	a	390	97	7	13.86	330 ppm
12.	400	a	415	112	7	16.07	300 ppm
13.	418	a	433	112	7	16.07	300 ppm
14.	445	a	470	30	7	4.29	1250 ppm
15.	477	a	484	67	4	16.75	280 ppm

La calidad del agua de éste pozo, por la interpretación de las curvas de resistividad es del orden de 280 ppm de sólidos totales disueltos; difiere de la estimada por el método de la curva del SP, pero es más confiable por lo que se recomienda para el cálculo de R_w .

En el siguiente ejemplo el factor de formación se asigno tomando en cuenta que son acuíferos de calidad de agua de formación salobre y se encuentran más compactados, por lo que tendremos valores de F grandes, para éste caso se escogio el de 7 por cálculos de la resistividad del agua del pozos cercanos a éste:

Registro B

INTERVALO (mts)	R_t (ohms.m)	F	R_w (ohms.m)	CONCENTRACION
1. 40 a 48	30	7	4.29	1250 ppm
2. 58 a 61	10	7	1.43	3500 ppm

3.	65.5	a	68	17	7	2.43	2000 ppm
4.	70	a	75	22.5	7	3.21	1500 ppm
5.	96	a	98	17.25	7	2.46	2000 ppm
6.	118	a	126	60	7	8.57	550 ppm
7.	146	a	150	15	7	2.14	2500 ppm
8.	219	a	224	8	7	1.14	4800 ppm
9.	226	a	228	8	7	1.14	4800 ppm

En éste registro observamos que la salinidad aumenta con la profundidad, y no correlaciona con la interpretación de la curva de SP; obteniendo por éste método salinidades mayores - es necesario aclarar la situación que se presenta en éste pozo. - El registro marca resistividades en general bajas debido a la arcillosidad y a el agua de mala calidad, observándose éste efecto en la curva lateral que toma valores menores que la curva normal en la mayoría de los casos y la curva de SP tiene poca amplitud en la parte superior por la presencia de arcilla, en el intervalo de 118 a 126 mts. tenemos una amplitud media que nos indica que el acuífero es limpio y es donde las curvas de resistividad toman el valor máximo, es el único acuífero de buena calidad de agua.

En los intervalos de 219 a 224 mts. y de 226 a 228 -- mts. son capas de arena limpia se observa que la curva de SP tiene amplitudes mucho mayores que en los demás casos esto se debe a que son acuíferos limpios saturados de agua salobre, en las -- curvas de resistividad la inversa toma un valor mucho menor que la normal esto se debe al efecto de la columna del lodo, y la inversa por tener mayor penetración se ve afectada por el fluido -

propio de la formación.

V.3.- DETERMINACION DE LA POROSIDAD.

El cálculo de la porosidad por medio de registros -- eléctricos es de manera muy relativa, ya que no es una herramienta hecha para éste fin, aún cuando se pueden realizar cálculos tentativos sin tener una buena precisión; como la que se tendría con un registro neutrón.

El procedimiento consiste en obtener el valor del -- factor de formación mediante la relación $F = R_t / R_{we}$, donde R_t se obtiene de las curvas de resistividad, y R_{we} de la curva de SP sería muy fácil obtener la porosidad por medio del valor de factor de formación que se propuso empíricamente pero se tiene más error, por lo que es necesario introducir el valor de R_{we} estimado de la curva de SP, por lo que conociendo F con las gráficas de las figuras 11-3 y 11-5, podemos obtener la porosidad; o conociendo R_t y la salinidad del acuífero con la fig. 11.4, se presentan algunos ejemplos del cálculo de la porosidad (ϕ) de algunos intervalos de interés de los registros A y B usando los dos métodos.

En el intervalo de 108 a 114.5 mts de registro A, tenemos una $R_t = 52$ ohms.m y $R_{we} = 19.53$ ohms.m entonces $F = 2.66$ con éste valor aplicándolo en la gráfica de la fig. 11.3 se obtiene una $\phi = 50\%$.

En el intervalo de 445 a 470 mts. del registro A, se tiene una $R_t = 30$ y una $R_{we} = 5.61$, por lo que $F = 5.35$ de la fig. 11-3 obtenemos $\phi = 35\%$; utilizando R_t , la salinidad y la

Fig. 11-4 se obtiene una $\phi = 32\%$.

Es una manera para estimar la porosidad la cual hay que tomar como un recurso cualitativo, si se requiere de ésta información.

V.4.- ESPEORES PERMEABLES.

Para la determinación de espesores de capas, por medio de registros eléctricos, se basa en las curvas que son simétricas a las formaciones; en nuestro caso son la curva normal y la curva de SP.

Como ya se mencionó no existe una herramienta que nos mida directamente la permeabilidad, pero se pueden diferenciar estratos permeables con las curvas de resistividad, SP y rayos gamma; comparandose con el corte litológico de la perforación.

Los factores que afectan la permeabilidad de un acuífero son: el tamaño de las partículas, grado de cementación y arcilla en los espacios intergranulares. Por medio de la curva de SP y de rayos gamma podemos identificar acuíferos limpios; los que se manifiestan en la curva de SP con una amplitud media más o menos constante un todo el espesor del estrato, por ejemplo en el intervalo de 247 a 260 mts de registro A, que junto con las curvas de resistividad y las muestras de la perforación, se trata de un estrato limpio y en consecuencia de buena permeabilidad.

La presencia de arcilla en los espacios intergranulares de un acuífero, hace que disminuya su capacidad de transmisión de fluido; en los registros la presencia de arcilla se manifiesta con una reducción en la resistividad, en la amplitud de -

el SP y un incremento en la radioactividad natural. Dependiendo de la cantidad y de la distribución que tenga la arcilla, dentro de los granos del acuífero, se verá disminuida su permeabilidad, por lo que pueden ser acuíferos de permeabilidad de media a baja.

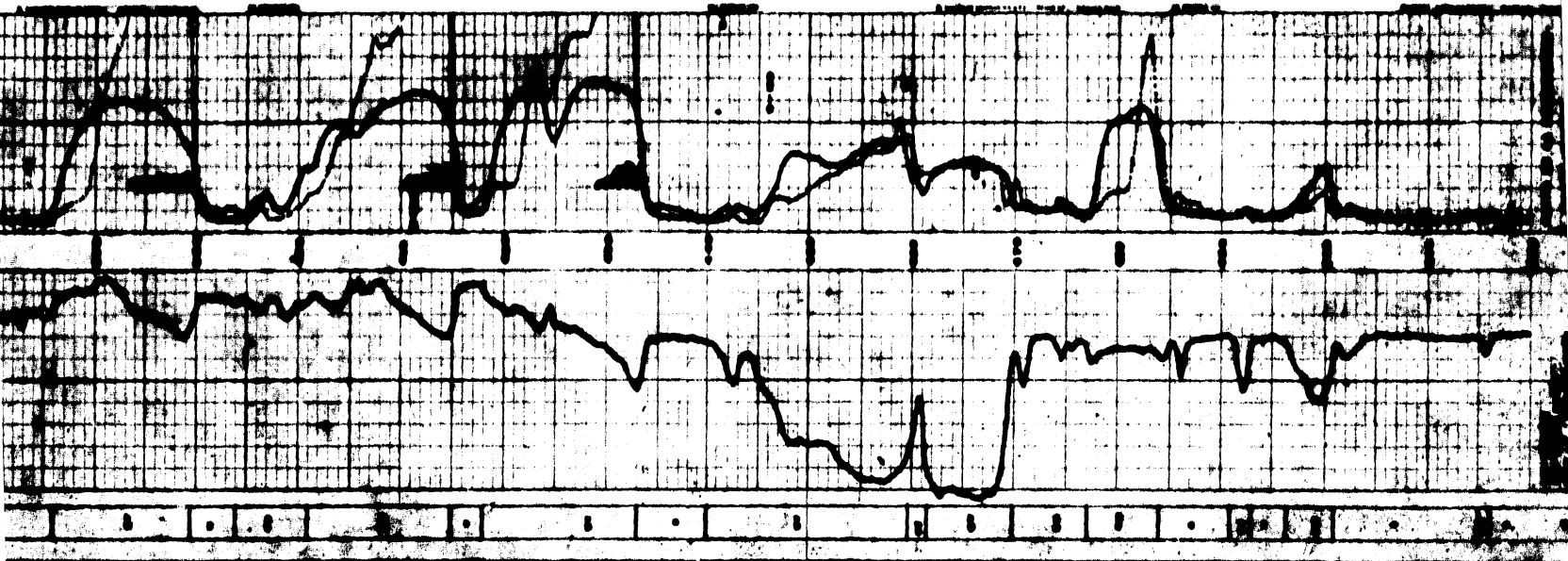
Un estrato impermeable se caracteriza por una baja resistividad en el caso de que sea arcilla, o muy elevada en formaciones densas, en estos casos el Sp tiene pocas variaciones, la curva de rayos gamma en caso de ser arcilla tiene alta intensidad de radioactividad y para formaciones densas no presenta variaciones.

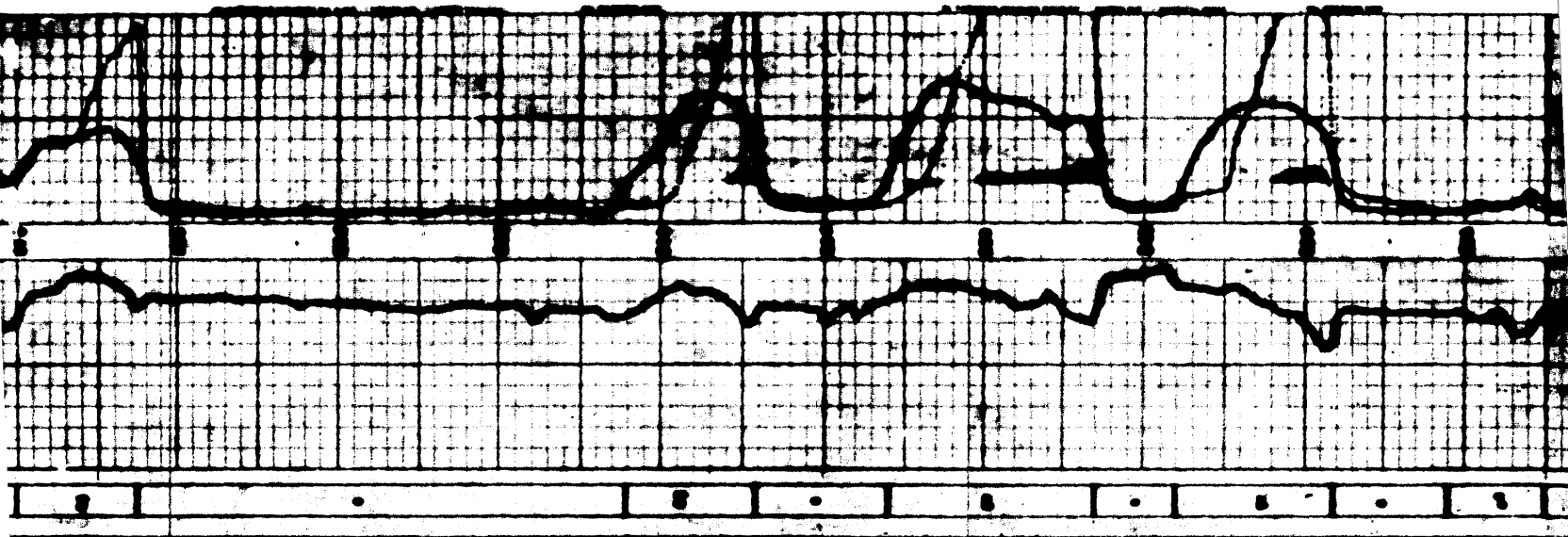
Es conveniente mencionar que cuando se presentan amplitudes de SP grandes se debe a la presencia de agua de mala calidad, acompañada en una disminución en los valores de resistividad, un ejemplo se aprecia en el intervalo de 445 a 470 mts del registro A, donde el SP es negativo, comparándolo con el resto del registro que es positivo; las curvas de resistividad tienen valores bajos; sin embargo se trata de un acuífero limpio de buena permeabilidad, al que se podría confundir con un acuífero de baja permeabilidad.

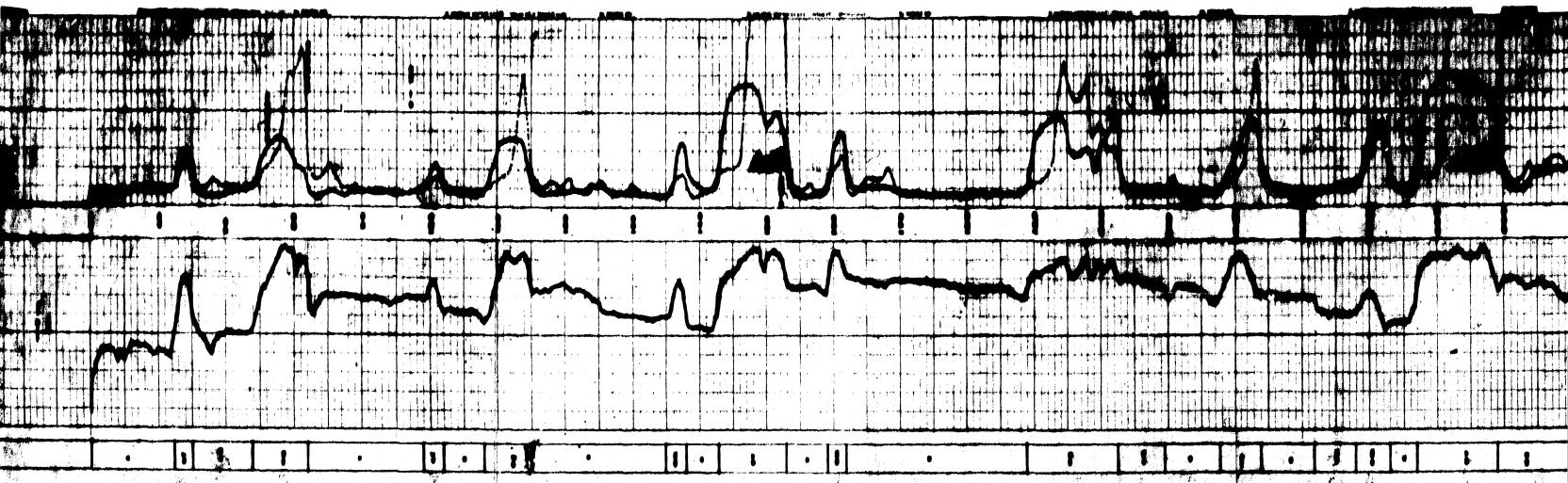
V.5.- INTERPRETACIONES DIFÍCILES.

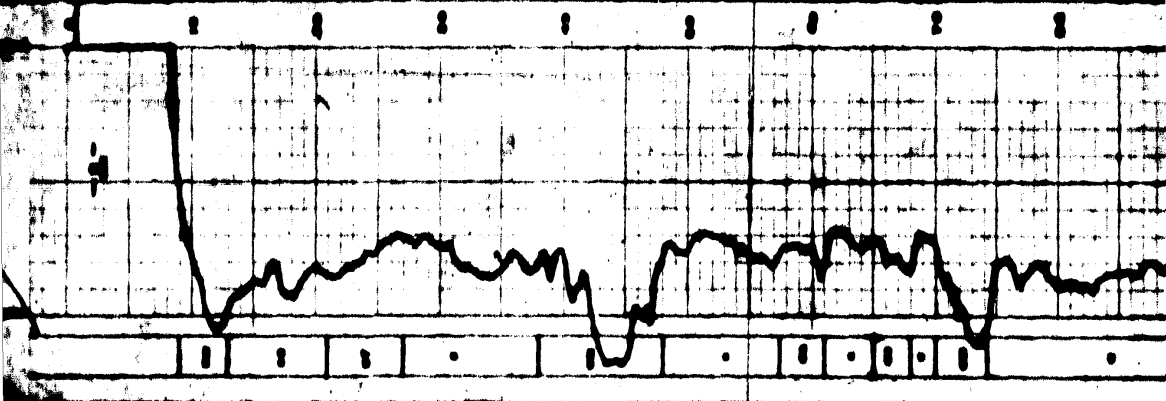
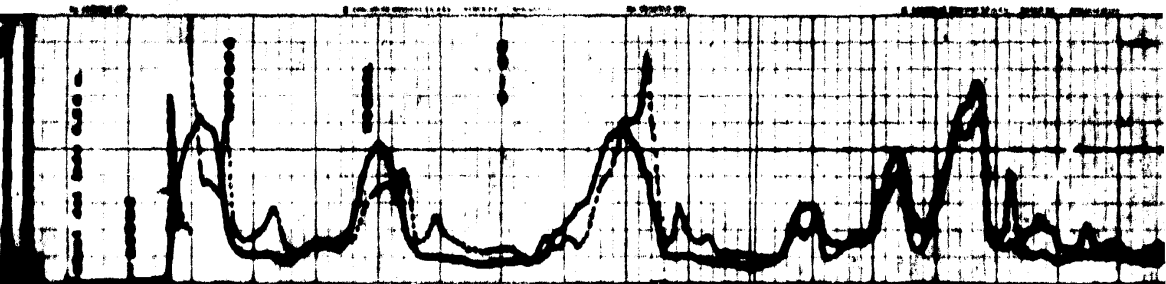
Como ya se ha mencionado ésta teoría es aplicable a medios granulares limpios, en la realidad se pueden dar casos en los registros eléctricos y de rayos gamma no den información que se vea claramente la posibilidad de presencia de acuíferos, por ejemplo en formaciones muy cerradas o muy arcillosas es muy aventurado certificar la presencia de agua; por lo que se recomienda

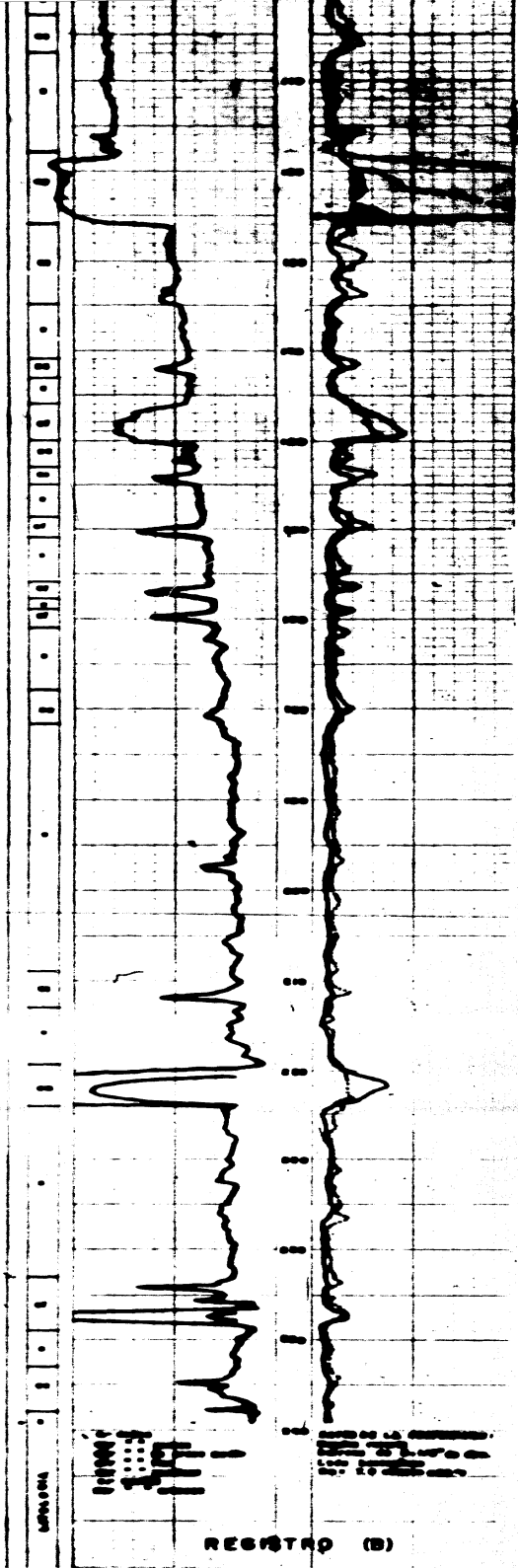
antes de terminar el pozo que se realicen pruebas de bombeo, para tener más seguridad en la producción del pozo. En ocasiones se puede presentar que los valores obtenidos por el registro sean muy buenos para ser acuíferos pero si no consideramos la geohidrología del lugar pueden ser pozos no productores, por ejemplo en una zona elevada donde los niveles freáticos están muy bajos, en la parte superior se puede pensar en acuíferos por los valores de resistividad de la curva normal, sin embargo la inversa tendrá valores mucho mayores, lo que nos indica un medio no totalmente saturado; existen muchos casos problemáticos en la investigación de aguas subterráneas pero con experiencia y conocimiento de estas herramientas se pueden resolver casi todos ellos.











REGISTRO (B)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los registros geofísicos para pozos, en particular - el eléctrico de tres curvas y rayos gamma que son los que se -- trataron en éste trabajo; son el medio por el cual se puede evaluar un acuífero.

En México tenemos un 70% de territorio semi-desérti--co por lo que es necesario explotar el agua subterránea para -- los diferentes usos que le da el hombre, por lo que se realizan inversiones en la perforación de pozos para éste fin; los regis--tros son el medio por el cual se protegen dichas inversiones ya que representan aproximadamente el uno % del costo total de un--pozo, es un gasto mínimo que bien vale la pena realizar; ya que con la información obtenida en caso de ser positiva se realizan programas de terminación de pozo más reales que las que se ha--rían sin tener ésta información. En el caso de que la explora--ción no fuera positiva, los registros nos evitan realizar gas--tos infructuosos perdiendose solamente el costo de la explora--ción, que es aproximadamente un 25% del costo de un pozo termi--nado.

En la actualidad en México el registro que se hace - con más frecuencia es el de resistencia eléctrica, para pozos - de agua la información que se obtiene por éste método hay que - tomarla con cierta precaución por tratarse de valores relativos con los que no podemos realizar una interpretación cuantitativa.

La exploración de aguas subterráneas se hace cada -- día más difícil por lo que con el tiempo se hará necesario que-

sea un requisito la corrida de registros de resistividad en pozos para agua, a los cuales se les debe de realizar la interpretación cuantitativa y también sería bueno que se instituyera un registro de porosidad, con el cual se tendría la información necesaria para hacer una interpretación cuantitativa completa.

Desgraciadamente esto no ocurre muchas veces por causa de personas no profesionales en la materia que han desprestigiado éste trabajo, realizando interpretaciones que dan datos imposibles de obtener de un registro eléctrico y menos de uno de resistencia; por lo que es necesario estar conciente de las limitaciones que se tienen en la interpretación de este tipo de registros, por lo que muchas veces el registro de un pozo sólo sirve para comprobar que el contratista perforó cierto número de metros y no se le saca mayor provecho a ésta información.

El material presentado en éste trabajo trata de manera sencilla llenar esos vacíos que se tienen del desconocimiento de la aplicación de los registros eléctricos a la geohidrología.

Por lo anterior para tener pozos de agua mejor explotados y terminados se recomienda el uso de registro de resistividad y si es posible el de rayos gamma y el de porosidad, con los cuales se puede realizar una evaluación completa de los acuíferos presentes en una perforación.

B I B L I O G R A F I A

- ALGER R.P.
INTERPRETATION OF ELECTRIC LOGS IN FRESH
WATER WELLS IN UNCONSOLIDATED FORMATIONS
SCHLUMBERGER WELL SURVEYING CORPORATION
HOUSTON, TEXAS.
ANNUAL SYMPOSIUM OF THE SOCIETY OF
PROFESSIONAL WELL LOG ANALYSTS. 1966
- ALLAUD LOUISA AND MARTIN MAURICE H
SCHLUMBERGER
THE HISTORY OF A TECHNIQUE
WILEY - INTERSCIENCE PUBLICATION
JOHN WILEY AND SONS - 1977
- ESTIMATING WATER QUALITY FROM ELECTRICAL LOGS.
USGS. PAPER N° 450-C. 1962
- GUYOD HUBERT
INTERPRETATION OF ELECTRIC AND GAMMA RAY LOGS
IN WATER WELLS.
THE WELL LOG ANALYSTS - 1966
- GEARHART - OWEN INDUSTRIES, INC.
FORMATION EVALUATION DATA HAMBOOR. 1974
- JOHNSON HAMILTON M.
A HISTORY OF WELL LOGGING
GEOPHYSICS - VOL. XXVII, N° 4, AUGUST. 1962

- JONES P.H. AND BUFORD T.B.
ELECTRIC LOGGING APLIED TO GROUND-WATER
EXPLORATION
GEOPHYCICS VOL. 16, N° 1 - 1951
- LYNCH EDWARD J.
FORMATION EVALUATION
HARPER AND ROW
WEATHER-HILL - 1962
- ORELLANA ERNESTO
PROSPECCION GEOELECTRICA EN CORRIENTE CONTINUA
BIBLIOTECA TECNICA PHILIPS - 1972
- PERKINS Jr., OSOBA J.S. AND RIBE K.H.
RESISTIVITY OF SANASTONES AS RELATED
TO THE GEOMETRY OF THEIR
INTERSTITIAL WATER
GEOPHYSICS, VOL. XXI, N° 4, OCTOBER - 1956
- SCHLUMBERGER CORPORATION
FUNDAMENTOS DE LA INTERPRETACION
DE PERFILES. 1975
- TODD DAVID K.
HIDROLOGIA (AGUA SUBTERRANEA)
PARANINFO. MADRID 1973
- VARGAS A. VICENTE
TECNICAS Y ANALISIS DE COSTOS
DE POZOS PROFUNDOS Y AGUAS SUBTERRANEAS.
EDI. LIMUSA. MEXICO. 1976