

4. TECNICAS CONVENCIONALES DE TESTIFICACION

4.1. Métodos eléctricos

- 4.1.1. *Potencial espontáneo*
- 4.1.2. *Métodos con electrodos no focalizados*
- 4.1.3. *Métodos con electrodos focalizados*
- 4.1.4. *Métodos de Inducción*
- 4.1.5. *Resumen*

4.2. Métodos radioactivos

- 4.2.1. *Testificación con rayos gamma naturales*
- 4.2.2. *Registro gamma-gamma*
- 4.2.3. *Registro neutron-neutron*

4.3. Registro sónico

4. TECNICAS CONVENCIONALES DE TESTIFICACION.

En un Informe como el presente es difícil establecer criterios respecto a la extensión y naturaleza de los comentarios a realizar para cada método. Tratando de que este documento tenga un carácter eminentemente práctico evitaremos el extendernos en descripciones detalladas sobre los fundamentos teóricos de cada herramienta.

Entendemos de mayor interés dejar constancia de las aplicaciones específicas de cada registro y de los condicionantes logísticos o económicos de su empleo. En este sentido, se ha incluido un número considerable de referencias bibliográficas que se han seleccionado de acuerdo con la representatividad de los ejemplos que se incluyen y con la calidad de sus explicaciones de tipo teórico.

Dejamos constancia de estos criterios para que se tengan en cuenta en cualquier valoración de este trabajo que, en todo caso, no deja de ser una labor de recopilación y síntesis.

Existe un abanico muy amplio de métodos para la testificación geofísica de sondeos. Sin embargo no todos están siempre disponibles u ofrecen la combinaciones deseable para problemas específicos con condiciones particulares.

Elegir la herramienta apropiada es crítico, porque los diseños son muy variados en su manera de responder a determinadas características de las formaciones y en su forma de aplicación (Collier 1989).

Este capítulo intenta dar un repaso de los métodos, incluyendo algunos que todavía están en estado de desarrollo. Los tipos de mediciones se dividen básicamente en tres clases:

- Técnicas convencionales.
- Técnicas especializadas.
- Técnicas complementarias.

Realmente hay que añadir una cuarta clase, que describe las técnicas que normalmente fueron diseñadas para investigaciones en la superficie y posteriormente adaptadas a las medidas en sondeos. Esta categoría incluye casi todas las técnicas sísmicas, eléctricas y de campos potenciales. A veces se utilizan dispositivos para mediciones acústicas o eléctricas de manera combinada. Con la fuente que produce la señal a medir dentro del pozo y el receptor o detector en la superficie (hole-to-surface) o con la fuente en superficie y el detector en el sondeo (down-hole); o con la fuente en un sondeo y el detector en otro (cross-hole).

Estos métodos tienen la ventaja de que penetran en un radio muy amplio dentro de la formación. En combinación con métodos de superficie dan una imagen tri-dimensional de la vecindad de la perforación. (Daniel and Keys). Sin embargo los aparatos y técnicas todavía no están suficientemente desarrollados para su empleo comercial de forma sistemática. Por otra parte sus aplicaciones genéricas se apartan de los objetivos de este Informe.

4.1. Métodos eléctricos. -

Los registros eléctricos están extremadamente influidos por el entorno y las condiciones del sondeo. La fiabilidad del valor R_t , que es la resistividad real de la formación que se desea medir depende sustancialmente de factores como:

- Diametro y regularidad de la perforación.
- Resistividad del lodo de perforación R_m .
- Resistividad de capas contiguas.
- Resistividad del filtrado de lodo R_{xo} .
- Espesor de la zona invadida.
- Espesor de las capas.
- Características de la herramienta.

El hecho de que exista una multitud de posibilidades de combinaciones de problemas y de estados del pozo, deja claro, que en ningún caso una herramienta sola puede resolver un determinado aspecto o problema geológico.

En el establecimiento del programa de registros de resistividad hay que buscar un compromiso entre la penetración de las herramientas y la resolución vertical, lo cual nuevamente significa que solamente con varios instrumentos se puede obtener una determinación realista de la resistividad real R_t y una buena resolución vertical bajo una serie de distintas condiciones del sondeo. Dependiendo de la porosidad habrá distintas profundidades de invasión del filtrado de lodo R_{xo} . En consecuencia las investigaciones deberían comprender una serie de mediciones con varias penetraciones laterales para asegurar que los resultados realmente reflejen R_t (Collier 1989).

Los registros eléctricos se agrupan en cinco categorías:

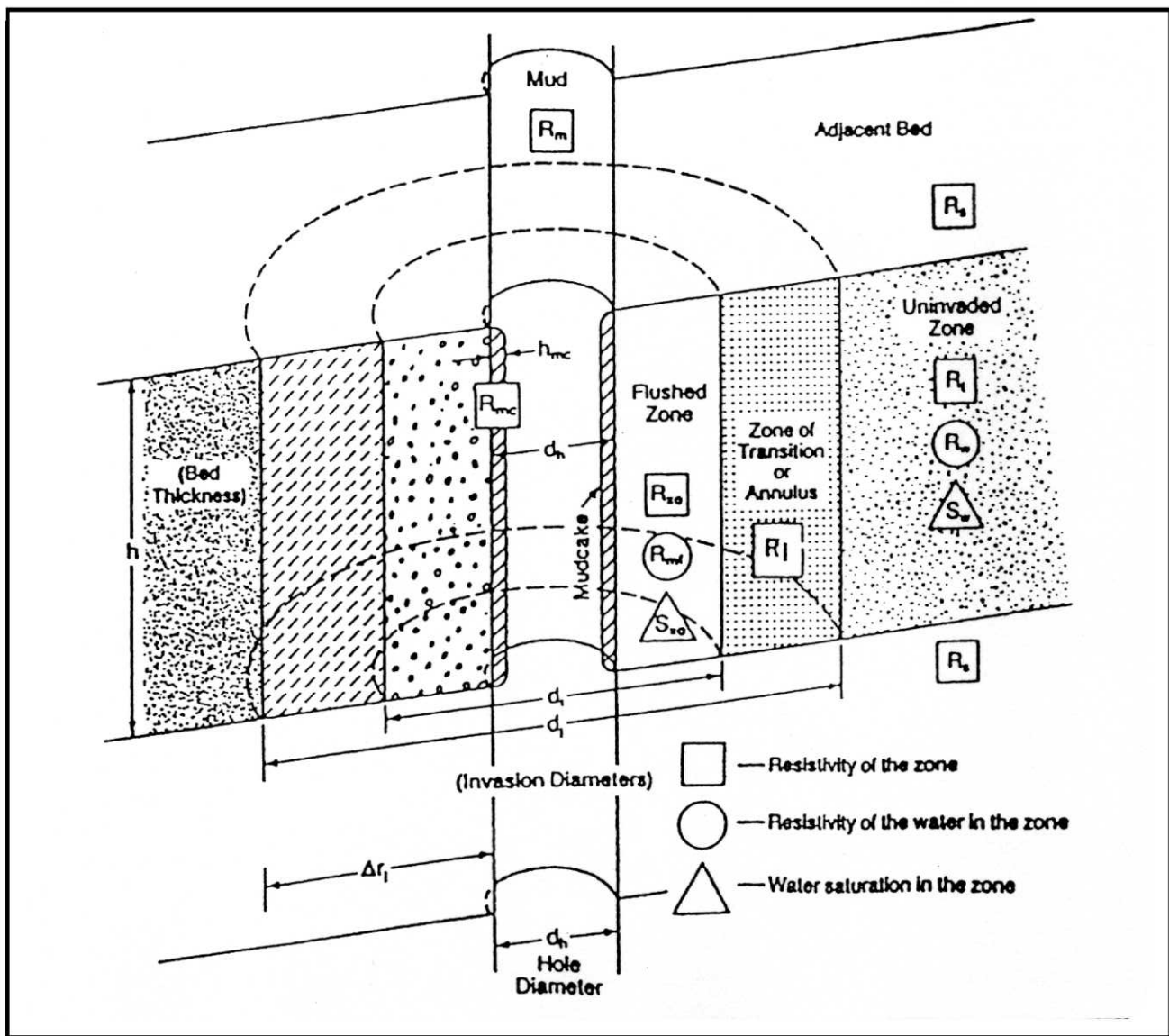


Fig. 1. Las zonas invadidas en una formación porosa.
(Collier 1989).

- Potencial espontáneo
- Resistencia monoeléctrica
- Resistividad no focalizada
- Resistividad focalizada
- Inducción (focalizada - no focalizada)

Seguidamente explicaremos en forma resumida su funcionamiento y características particulares.

4.1.1. Potencial espontáneo.-

Respecto a nuestros objetivos, se trata de una herramienta de tipo complementario, aunque de uso habitual ya que normalmente va incluida en sondas que operan simultáneamente con varios registros.

El registro de los potenciales espontáneos se realiza con los registros de resistividad. Los registros de SP (Spontaneous potential) probablemente son la antítesis de la imagen de alta tecnología de la mayoría de los métodos de la testificación (Ellis 1987). La curva del potencial espontáneo es un registro de la diferencia de potencial entre un electrodo fijo en la superficie como punto de referencia, y otro que se mueve dentro del pozo a lo largo del sondeo. El registro básicamente es la medición de un voltaje que está variando muy despacio a medida que la sonda se desplaza por el sondeo. Las amplitudes varían bastante, pero en general son de algunas decenas de milivoltios.

Se explica el potencial espontáneo según varios orígenes, aunque se considera que la mayor contribución se debe a las reacciones electroquímicas entre los contactos de capas geológicas de distinta permeabilidad y las disoluciones del lodo de perforación.

Las arcillas son permeables para los cationes de Na^+ pero prácticamente impermeables para los aniones Cl^- ; como resultado se forma un potencial cuando los iones Na^+ migran de las aguas salinas de una formación permeable hacia las arcillas y después hacia la disolución de lodo (Telford 1982). En este sentido, la disolución de lodo provoca un desequilibrio del potencial de membrana. Debido a que los iones de Na y Cl tienen una movilidad diferente, se produce una separación y descompensación de las cargas eléctricas (Ellis 1987). Como resultado se genera una diferencia de potencial respecto a un punto de referencia.

Las capas arcillosas o margosas de un sondeo tienen el mismo potencial eléctrico y se alinean, en un registro, a lo largo de una recta de valores semejantes y que se define como "línea base de las arcillas". Los demás valores de un sondeo están relacionados con esta línea según su desplazamiento a la izquierda o a la derecha de la línea base. Los valores correspondientes del potencial son negativos (izquierda) o positivos (derecha), dependiendo de la salinidad del agua de formación y del filtrado (Schlumberger, IGME 1988).

Los registros del potencial espontáneo son un método muy útil para la identificación de las capas permeables y medios impermeables. Considerando los registros de otras técnicas aplicadas simultáneamente y con una interpretación crítica, el método de SP puede ayudar a la identificación de zonas de porosidad de primer grado (por ejemplo niveles de arenas entre arcillas) o de segundo grado (zonas fracturadas).

Los resultados solamente son fiables bajo condiciones relativamente ideales del estado de la perforación (Keys, 1989) y dependen del contraste en la calidad química entre el agua dentro del sondeo y de la que satura las formaciones permeables (Howard, 1989). Ese en general es el caso cuando se realiza la perforación

con lodo a base de arcillas de alta conductividad.

4.1.2 Métodos con electrodos no focalizados.-

Las técnicas son muy similares en su fundamento teórico a las técnicas eléctricas de superficie.

Una corriente de baja frecuencia es introducida a través de dos electrodos de corriente en la formación rocosa y se mide la diferencia del potencial que tal paso de corriente establece entre dos electrodos de potencial situados en la misma sonda. El registro es una curva de la variación del potencial en función de la profundidad. Su transformación a unidades de resistividad es sencilla.

Aunque los métodos con dispositivos focalizados son bastante más sofisticados, estas técnicas siguen siendo muy populares y utilizadas. Ello se debe a la gran experiencia en su empleo durante décadas y en segundo lugar porque son las herramientas más económicas de los métodos eléctricos.

Resistencia.-

Las sondas para la medida de la resistencia pueden considerarse como extremadamente sencillas y en parte anticuadas. Muchas veces forman parte de mediciones combinadas en aparatos de las primeras generaciones y por eso las mencionamos.

El dispositivo es el único de los métodos no focalizados, que utiliza los mismos electrodos para introducir la corriente al terreno y para la mediación del potencial. Se llama **monoelectrónico** cuando un electrodo se encuentra como electrodo de referencia

en la superficie, mientras el segundo es bajado al pozo. En la configuración **diferencial**, los dos electrodos se bajan a poca distancia (20 cm) al pozo.

En los dos dispositivos se pasa una corriente constante entre los dos electrodos y se registran las fluctuaciones del voltaje al mover la sonda a lo largo del pozo. La resistencia entre los electrodos está definida por la ecuación de Ohm: $V=R*I$; en la que R es la resistencia en Ohm, I la corriente en Amperios y V la diferencia de potencial entre los dos electrodos. Durante el registro se mantiene la corriente I rigurosamente constante y en consecuencia las fluctuaciones del voltaje corresponden a cambios de resistencia dentro del pozo, cambios interpretables en términos de variaciones litológicas.

Básicamente hay tres factores que condicionan a los valores de resistencia:

- la resistencia de las rocas en inmediata proximidad de los electrodos.
- el volumen de roca entre los dos electrodos.
- el efecto del lodo de perforación que rellena el sondeo.

Las variaciones de resistencia están primariamente provocadas por variaciones en la inmediata proximidad del electrodo dentro del pozo. En el dispositivo diferencial se refiere a la proximidad de la pareja de electrodos dentro del pozo.

El resultado depende mucho de la resistencia eléctrica del lodo de perforación y de la regularidad de las paredes de la perforación.

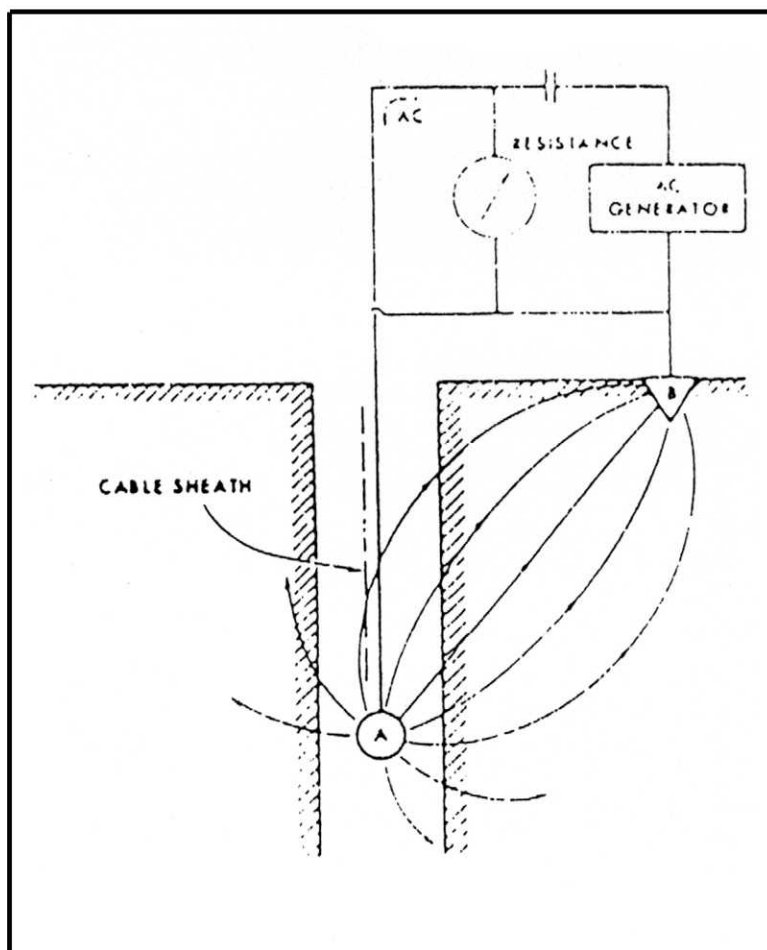


Fig. 2.- Sonda monoelectrónica (Kay and McCary. 1.971).

Una de sus ventajas es la excelente resolución de capas finas y la posibilidad de detectar fracturas llenas de agua. Los registros no son lineales (Mac Cary 1971) y consecuentemente el dispositivo no se puede utilizar para evaluaciones cuantitativas de las propiedades eléctricas de unidades rocosas. Sin embargo resulta muy útil en la correlación cualitativa de medidas con significado litológico.

En ambientes geológicos de origen sedimentario los registros de resistencia tienen generalmente las siguientes características:

Frente a las arcillas muestran valores bajos, las areniscas tienen valores intermedios y las calizas reflejan valores de alta resistencia.

En el medio ígneo y metamórfico los valores de baja resistencia se explican por la presencia de formaciones rocosas conductoras o por la presencia de zonas de fractura aunque sean de poco espesor.

Sonda Normal.-

El dispositivo es un sistema de dos parejas de electrodos del tipo cuadripolar; AB y MN. Por los electrodos AB se envía una corriente I a través de la formación rocosa y se mide la diferencia de potencial ΔV que se produce entre M y N. La distancia AM se denomina espaciado de la sonda. Los espaciados standard son de 8", 16", 32" y 64". Las de uso más corriente son la normal corta de 16" y la normal larga de 64".

Se calcula la **resistividad aparente** que se refiere al punto situado en el centro de AM, suponiendo un medio homogeo, mediante la ecuación:

$$\rho_a = K * dV/I$$

ΔV :diferencia de potencial

I:corriente

K:factor geométrico.

El factor geométrico K depende de la configuración de la sonda, respecto al espaciado AM.

La relación espaciado/espesor de capa tiene significación para la selección de la herramienta apropiada. La mayoría de los instrumentos ofrecen registrar la normal corta y normal larga simultaneamente. La profundidad lateral de investigación aumenta proporcionalmente con el espaciados. Se acepta generalmente que la profundidad de investigación es aproximadamente = 2 AM. En consecuencia, la normal corta tendrá buena resolución vertical a costa de una menor penetración lateral, lo que lleva consigo que la resistividad R_i , de la zona invadida por el lodo de perforación, tendrá gran influencia en el registro. La normal larga refleja mejor la resistividad R_t , la verdadera de la formación.

Las sondas normales son una herramienta estandard en la determinación de la resistividad de la formación bajo condiciones favorables. El sondeo tiene que estar lleno del fluido de perforación.

El efecto de capas próximas y la invasión de lodo de perforación en formaciones porosas es muy significativa en los registros. Dichos efectos pueden corregirse en función del espesor de las capas y además, los resultados solamente son fiables con una corrección del diámetro de perforación, ya que los resultados del

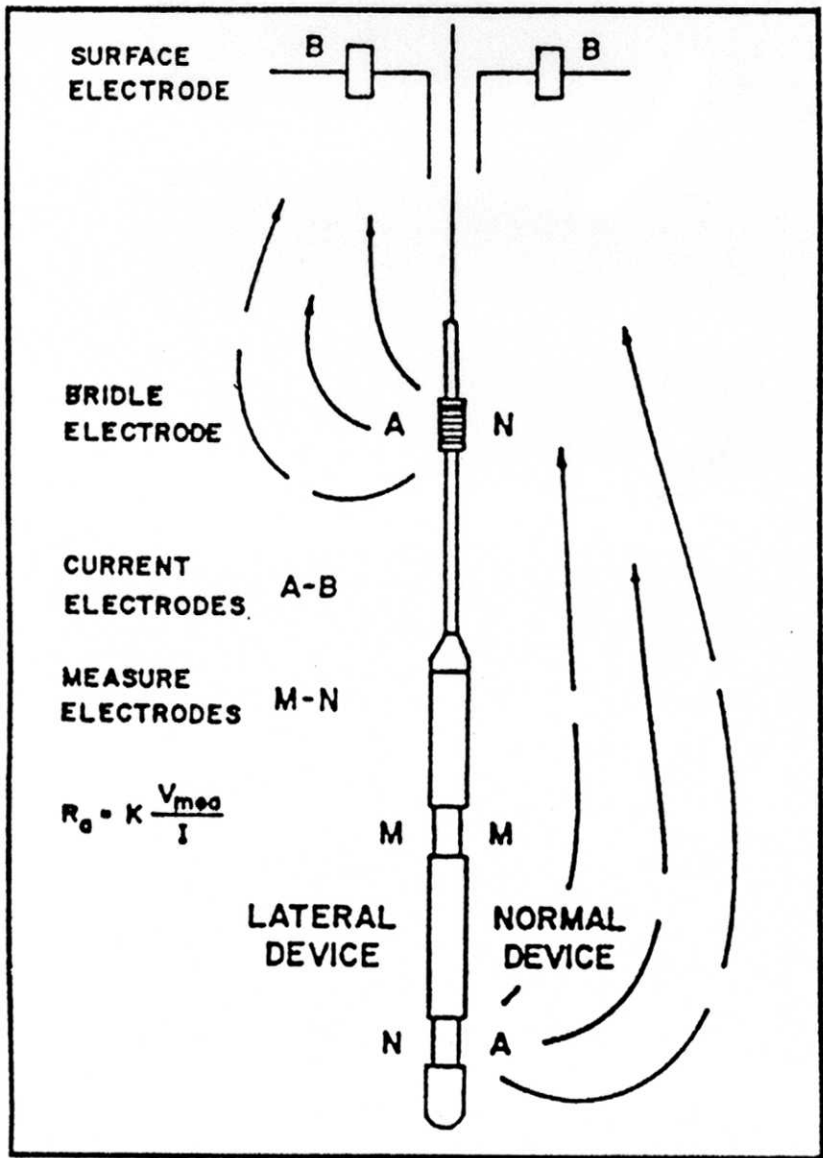


Fig. 3.- Esquema de las sondas normal lateral (Collier. 1.989)

método dependen mucho del estado geométrico del pozo.

La normal corta es apta para mediciones de resistividad de zonas porosas que están invadidas por el filtrado del lodo y de este modo permiten la determinación de porosidad de la formación. En la correlación entre pozos se puede aplicar el método, dada su característica, de que posibilita una buena definición de los contactos entre capas.

La normal larga mide la resistividad intermedia, que por lo menos en teoría permite calcular la resistividad de la zona invadida, R_i y la resistividad verdadera de la formación R_t (Telford 1982, Astier 1975).

Sonda lateral. -

Es el primer dispositivo empleado en la historia de la testificación. Durante muchos años era corriente aplicarlo conjuntamente con la sonda normal. Pocas empresas todavía emplean este método que está en desuso.

El método se denomina también dispositivo de tres electrodos. Los electrodos que miden la diferencia de potencial suelen estar separados por 32". El centro entre las dos está a una distancia de 18'8" del electrodo de corriente que se encuentra en el sondeo. Esta distancia es el espaciado del dispositivo.

La profundidad lateral de investigación equivale aproximadamente al espaciado. De las herramientas no focalizadas la sonda lateral tiene la única ventaja de tener una buena penetración lateral. En los registros destaca la asimetría de las curvas, provocada por la configuración de los electrodos. Parecido a los

sondeos normales se calcula la resistividad aparente:

$$\rho_a = K * \Delta V / I$$

ΔV : Potencial entre MN.

I : Corriente introducida.

K : Factor de geometría.

La herramienta fue diseñada para la determinación de la resistividad aparente. Sin embargo el registro de la sonda lateral es tan difícil de interpretar que no es una buena alternativa para la determinación de la resistividad R_t de la formación. La corrección del efecto del diámetro de la perforación y del espesor de las capas próximas en casi todos los casos, es imprescindible.

4.1.3. Métodos con electrodos focalizados.-

A finales de los años 50 se empezó a trabajar con herramientas focalizadas. Las no focalizadas tienen el grave defecto de que no se puede controlar la dirección del flujo de corriente. En consecuencia, de acuerdo con las leyes de la electricidad, la corriente toma el trayecto de la mínima resistencia, prefiriendo medios conductivos, como el lodo de perforación o las formaciones conductivas. Si el líquido de perforación es demasiado conductivo (lodo con sales) o si la formación tiene una resistividad demasiado elevada, la corriente se canaliza por el sondeo y no penetra en la formación.

Generalizando se puede decir, que los dispositivos de las sondas normales (larga y corta) y la lateral tienen espaciados demasiados grandes para detectar capas finas y el microlog está muy influenciado por el lodo.

Los instrumentos con electrodos focalizados superan

los siguientes problemas:

- Lodo de perforación de alta conductividad.
- Resolución de capas de poco espesor.
- Formaciones de alta resistividad.

Los electrodos focalizados controlan el trayecto de la corriente utilizando electrodos auxiliares de corriente, que se encuentran encima y debajo del electrodo de corriente primaria. Los electrodos auxiliares (de guarda) ajustan la intensidad de su corriente automáticamente de tal forma, que siempre tienen el mismo potencial. Este dispositivo permite medir simultáneamente la resistividad de la zona invadida por el filtrado de lodo Rxo y la resistividad aparente de la formación Rt.

Guard Log.-

El nombre comercial es Laterolog 3 (LL3). La corriente se focaliza dentro de un disco horizontal que entra en la formación lateralmente en lugar de desplazarse verticalmente por las paredes del pozo.

La profundidad de investigación, que es la distancia donde la corriente pierde su carácter focalizado, es aproximadamente tres veces la distancia entre los electrodos "guard".

Electrodos puntuales (Point-Electrode).-

También se llama Laterolog 7 (LL7). Los discos del Laterolog 3 son sustituidos por 7 electrodos puntuales. El "rayo" de la corriente enfocada es más "grueso" que el del Laterolog 3. Los resultados de ambos son muy parecidos.

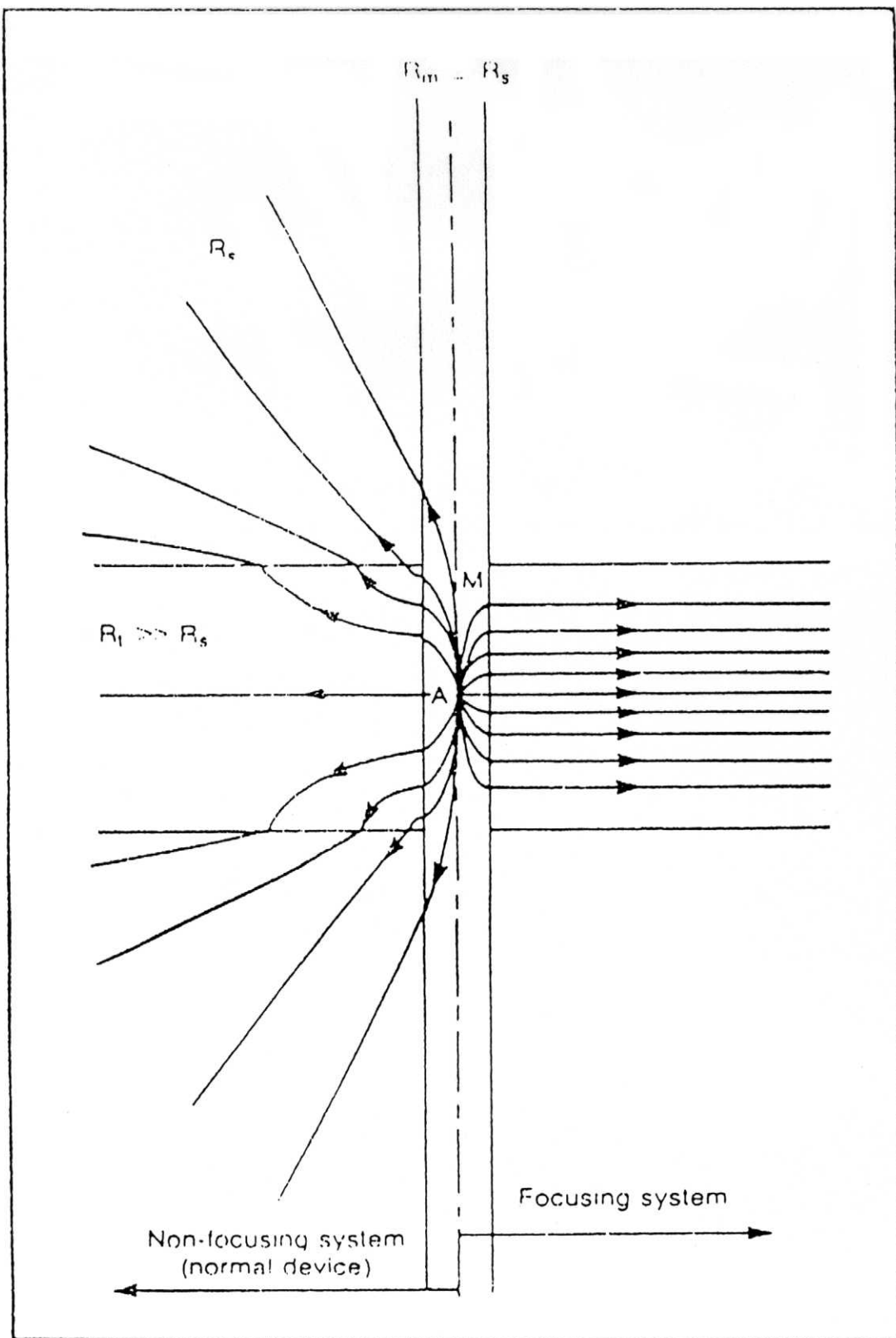


Fig. 4.- Diferencia de trayecto de la corriente empleando sondas focalizadas y no focalizadas

Spherically Focusing Electrodes (SFL).-

Este tipo de herramienta focalizada se puede considerar como sustituto de la normal corta de las herramientas no focalizadas de la primera generación. El SFL tiene un concepto diferente de los Laterologs 3 y 7. En lugar de enfocar el "rayo" de corriente de forma horizontal, los electrodos auxiliares están diseñados en tal manera, que forman un casco esférico alrededor del electrodo de corriente.

La ventaja es, que se reducen los efectos de la perforación, no hace falta una corrección de espesor de capas próximas y la profundidad lateral de investigación es, mayor que la de los metodos no focalizados (Jordan and Campbell 1986).

Dual Focusing Electrode (DLL).-

Es el desarrollo más avanzado de las herramientas de resistividad. El nombre común es Dual Laterolog (DLL) o Dual Guard Log.

Una corriente se envía a la formación desde el electrodo central de la sonda. Varios electrodos montados simétricamente a lo largo de la sonda focalizan la corriente

El mismo dispositivo registra los valores de poca penetración (LLS, Laterolog shallow) y un alcance lateral más profundo (LLD, Laterolog deep). Los dos conceptos utilizan los mismos electrodos. Electrónicamente se varía el modo de enfoque que determina la profundidad de investigación. De este modo se puede medir simultaneamente la resistividad de la zona de infiltración R_i y la resistividad aparente, de que se deriva la verdadera

resistividad R_t .

Sin duda, el Dual Laterolog ofrece la técnica más refinada para la medida de resistividad. El alcance lateral de profundidad es más grande que el del LL3 y LL7. El Dual Laterolog tiene con su configuración del LLD buena capacidad de investigar la resistividad aparente en una escala, que incluye formaciones de muy baja hasta muy alta resistividad (40.000 Ohm).

La herramienta tiene características muy favorables para determinar la verdadera resistividad R_t y al mismo tiempo puede garantizar una relativamente buena resolución vertical (Jordan and Campbell, 1986).

Microlog. -

El microlog se desarrolló para detectar capas de muy poco espesor. Sin embargo el microlog en sus aplicaciones reales, se ha limitado al estudio de la resistividad del mud cake.

La presencia de mud cake es un indicador cualitativo, de que la formación es permeable. Esta norma hay que aplicarla con cuidado, sobre todo porque en general el mud cake no se forma en zonas de porosidad secundaria.

Microlog no focalizado. -

Los electrodos están situados encima de un cojín de goma que está apretado mecánicamente contra la pared del pozo. La herramienta combina dos mediciones de resistividad.

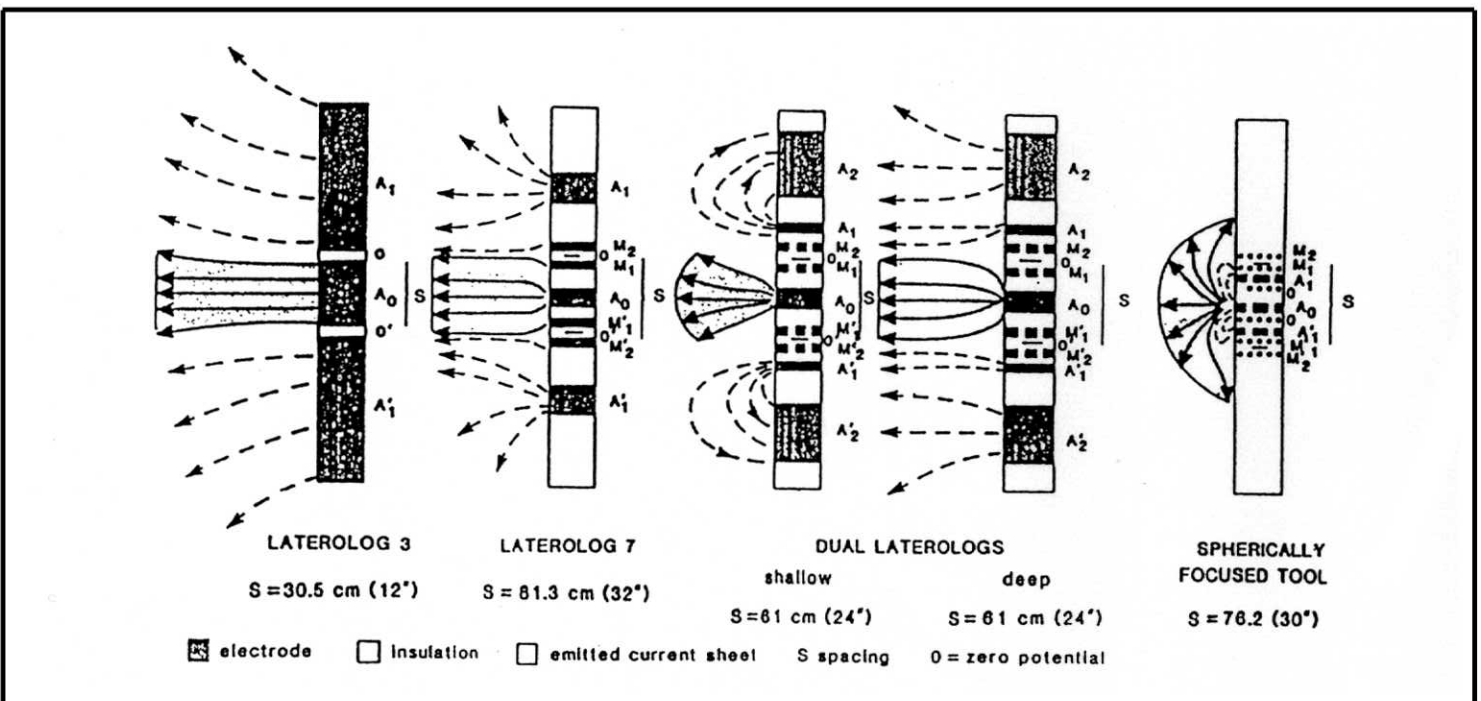


Fig. 5.- Esquema de la configuración de varios dispositivos focalizados de Schlumberger (Collier/Ride. 1.989)

El espaciado corto de 1" registra la resistividad del mud cake. La profundidad lateral llega a aproximadamente 4 cm. El espaciado largo mide el conjunto de mud cake y la resistividad de la formación. La profundidad investigada por el espaciado largo es del orden de 10 cm.

La herramienta se utiliza en pozos llenos de lodo a base de agua. El dispositivo con el cojín de goma lleva incorporado un caliper para registrar el diámetro de la perforación.

Microlog focalizado.-

En esta clase existen una serie de herramientas que se distinguen por el grado de enfoque de la corriente. El Microlaterolog (MLL) es lo menos focalizado, luego el Micro Log que está enfocado esféricamente (MSFL Microspherically Focused Log) y por fin la focalización más efectiva se consigue con una herramienta denominada Log de Proximidad (PL, Proximity Log).

En el caso de poco enfoque del dispositivo, el registro será dominado por el efecto del mud cake. Al contrario un enfoque concentrado puede en, buenas condiciones de poca invasión del lodo, llegar a medir de forma efectiva la resistividad aparente de la formación.

Esta herramienta se utiliza en pozos rellenos de agua y lodo y mide en la misma operación el estado de la perforación mediante un caliper.

Los micrologs, focalizados o no, registran en primera línea las características del mud cake. En correlación con otros métodos permiten la identificación de capas de poco espesor.

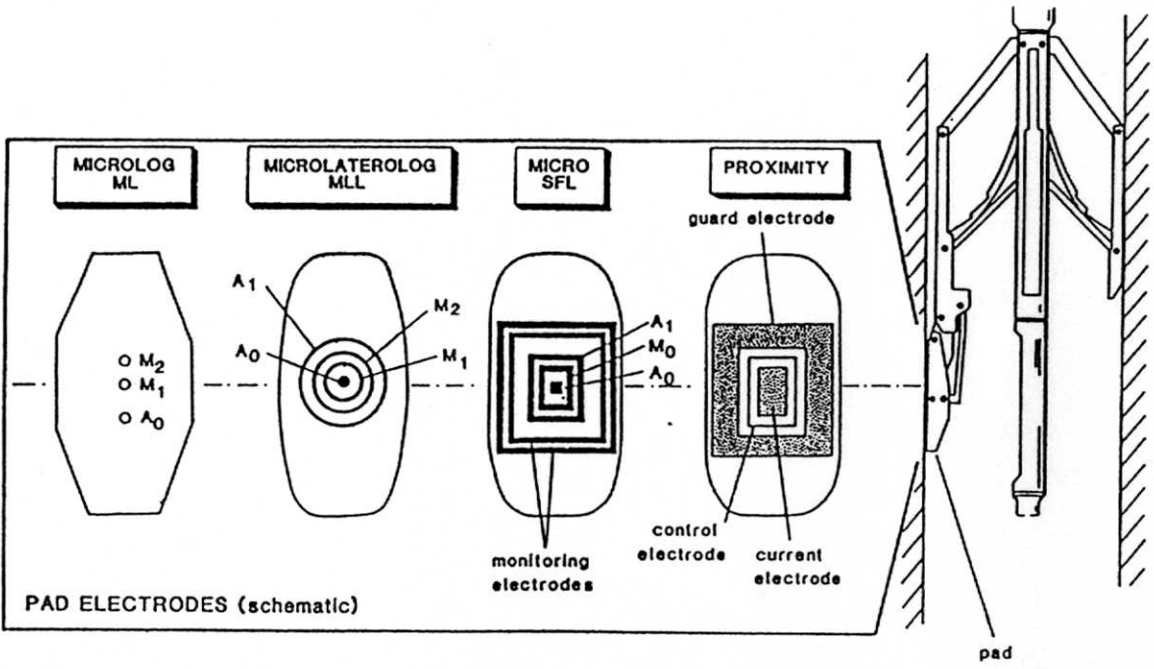


Fig. 6.- Esquema de microelectrodos focalizados (Collier/Rider. 1.989).

Detectar zonas porosas será posible con las herramientas focalizadas con la condición de que se haya utilizado un lodo suficientemente conductor. El uso de las sondas no focalizadas solamente da información cualitativa sobre la existencia del mud cake. En general, la técnica da también información sobre el estado de la perforación.

4.1.4. Métodos de Inducción .-

El hecho que originó el desarrollo de herramientas de inducción fue el cambio de métodos de perforación, como la perforación de percusión con aire y con espuma, o el uso de lodos no conductivos. La falta de un elemento conductor como el lodo hizo inútil las clásicas herramientas de resistividad.

Es la única herramienta de resistividad que funciona en pozos secos. Por supuesto, como todos los métodos eléctricos no se podrá utilizar cuando el sondeo esté entubado con tubería metálica.

El principio de funcionamiento es el siguiente. Una corriente alterna de alta frecuencia se hace circular por un sistema de bobinas coaxiales (bobina emisora). El campo magnético resultante provoca en las rocas una corriente secundaria (corriente Foucault), que por ser variable en el tiempo da origen a su propio campo magnético secundario. Este depende mucho de las características físicas de la roca. El campo magnético secundario induce una corriente dentro de la bobina receptora del dispositivo, que se registra en el log.

El voltaje inducido es proporcional a la conductividad de la formación, que es la recíproca de la resistividad.

Los instrumentos modernos tienen en realidad varios transmisores y receptores para conseguir de una manera parecida a los Laterologs, una focalización del campo magnético. El resultado es la medición simultánea, que se efectúa con la herramienta de **Inducción Dual** (DIL, Dual Induction Log), de resistividades representativas de varios rangos de profundidad.

En el caso de que se utilice la herramienta en pozos con lodo, los registros incluirán información bastante completa sobre el comportamiento eléctrico del medio (Verdier, 1986).

Las curvas se registran como sigue:

Inducción normal: registro de conductividad y su recíproca la resistividad, asociado con el registro de resistividad de poca penetración lateral.

Inducción dual: se comparan los registros de la conductividad de poca e intermedia profundidad y de su recíproca, la resistividad, con los valores de resistividad procedentes del registro convencional de resistividad.

Generalmente la herramienta en la versión focalizada tiene buenos resultados tanto en la resolución vertical como en la profundidad lateral de investigación (Schlumberger 1987). Su aplicación es la determinación de R_t , la resistividad verdadera de la capa a través del registro de la resistividad aparente.

Las condiciones de la perforación tienen notable influencia aunque pueden ser compensadas en teoría con tablas de correcciones.

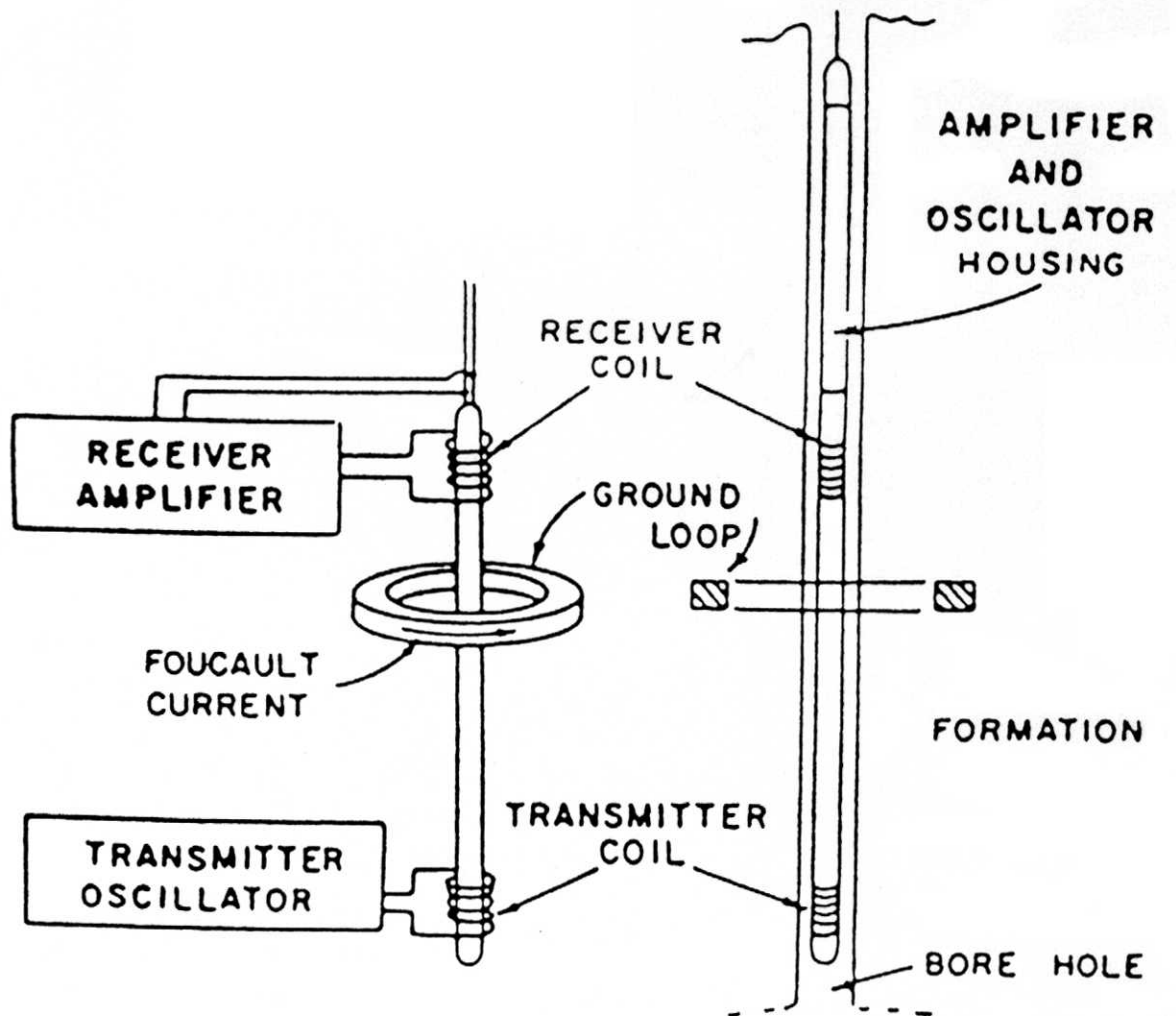


Fig. 7.- Herramienta de Inducción (Verdier, 1.986).

En segundo lugar los resultados son fiables solamente en la escala hasta 100 ohms. En capas de alta resistividad, equivalente a poca conductividad, falla la calibración de los instrumentos.

4.1.5. Resumen.-

1. Los registros monoeléctricos aportan resultados de carácter cualitativo y su empleo se mantiene porque normalmente se utilizan integrados con otros registros en una misma sonda.

2. Los métodos de inducción se pueden aplicar solamente en perforaciones con lodos no conductivos y tuberías no metálicas.

3. Para determinar la verdadera resistividad de formaciones y la localización de niveles de poco espesor en medios de baja o intermedia porosidad, únicamente las sondas focalizadas llevan a resultados aceptables (Laterolog o Guardlog).

5. La invasión de filtrado del lodo se mide apropiadamente con microdispositivos de enfoque esférico (MSFL).

6. Las capas finas se pueden definir solamente con precisión mediante herramientas equipadas con microelectrodos y dispositivos focalizados (Collier, 1989).

4.2. Métodos radioactivos.-

Algunos átomos de las estructuras cristalinas de los

componentes de las rocas emiten radiaciones naturales mientras que otros pueden hacerlo al ser provocados por ciertas formas de energía. La radiación nuclear puede incluir cualquiera de los tipos de radiación: alpha, beta, gamma o la emisión de neutrones. La radiación en la forma gamma y de los neutrones tiene una capacidad de penetración considerable.

Los instrumentos de la testificación que registran la radiación se dividen básicamente en tres categorías:

- Instrumentos que registran la radiación gamma natural de los elementos Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K) que forman parte de la matriz de la roca.
- Instrumentos que emplean fuentes artificiales de radiación gamma para bombardear el medio rocoso.
- Métodos que emplean fuentes de neutrones para iniciar procesos radioactivos (Telford 1982).

Durante la desintegración nuclear, los núcleos excitados emiten impulsos de radiación electromagnética, los rayos gamma. De forma simplificada se puede considerar esta radiación como un "exceso" de energía. La capacidad de radiación natural de las formaciones geológicas resulta condicionada por la presencia de pequeñas cantidades de U, Th y K40 en las rocas. La radiación del tipo gamma de la serie de desintegración de los elementos uranio y torio es bastante más intensa que la del potasio. Sin embargo la diferencia de intensidad se compensa, porque los isótopos del potasio están mucho más concentrados en las formaciones rocosas comunes. Consecuentemente la radiación media se puede asignar, a partes aproximadamente iguales, a los tres elementos.

Los rayos gamma de K40 son monoenergéticos con una

intensidad de 1.46 MeV, mientras que la radiación del Th y U tiene un espectro energético entre 1.7 MeV hasta 2.62 MeV. Para detectar la radiación de un elemento individual, el detector tiene que ajustar su sensibilidad dentro de un espectro específico de energía.

En general la emisión radioactiva es elevada en rocas de origen sedimentario/detrítico y sedimentos metamórficos. Es inferior en las rocas ígneas y metamórficas, con la excepción de granitos con un alto componente de potasio (Militzer 1986).

Un rayo gamma puede interactuar con el medio en que entre en contacto de varias maneras:

- Transfiriendo toda su energía a un electron del átomo (conversión fotoeléctrica),
- Pierde su energía sucesivamente en la colisión con varios nucleos, transfiriéndola a varios electrones (efecto Compton).
- El rayo gamma desaparece enteramente, convirtiendose en un par positrón-electrón.

Los tres procesos están estrechamente relacionados con la densidad de electrones en el medio. Como consecuencia los procesos radioactivos están determinados por el tipo de material que atraviese el rayo gamma.

La energía de los rayos gamma se estima en el orden de aproximadamente 1 MeV. Esta energía permite llegar a una profundidad de investigación de 30 centímetros en medios no compactos.

Otra forma de diagnóstico del medio rocoso es la característica de la interacción de los neutrones con el medio.

Los neutrones rápidos (Energía > 0.1 MeV) son frenados por la colisión con un núcleo en forma elástica o inelástica. En la colisión inelástica el núcleo recibe energía cinética y entra en un estado excitado, emitiendo una radiación gamma característica. La manera en que un neutrón pierde su energía en una colisión depende de la masa del núcleo con el que choca; o expresado en otra forma: del tipo de material. Sin embargo, el proceso se complica, porque la capacidad de un núcleo para capturar un neutrón depende también de la velocidad del neutrón al entrar en el medio. El hecho se expresa mediante un valor de probabilidad de captura (barns).

La mayor pérdida de energía la sufre un neutrón cuando choca con un núcleo de masa similar a la suya, por ejemplo, con núcleos de H. En este hecho se basan las posibilidades de empleo de esta radiación como medida indirecta de porosidad. Las formaciones porosas saturadas de agua presentan una mayor concentración de átomos de H que las formaciones impermeables y la respuesta frente a la radiación neutrónica es diferente.

4.2.1. Testificación con rayos gamma naturales.-

La testificación de la radioactividad natural se desarrolló como técnica para perforaciones entubadas en las que no se podían utilizar métodos eléctricos.

La sonda consiste en un detector y un amplificador. El detector puede ser un contador Geiger o un detector scintilométrico.

Hay dos tipos de sondas:

- Las que registran toda la radiación en la proximidad de la sonda.
- Las que discriminan la radiación de cada elemento radioactivo (sondas espectrométricas).

En sedimentos recientes, o más general en los medios no compactos, el registro de la radiación de los rayos gamma refleja el contenido de arcillas. La testificación de rayos gamma en rocas ígneas y metamórficas está condicionada por la concentración relativa de componentes félsicos. (Daniels y Keys 1989).

Las medidas de radiación gamma natural permiten la posibilidad de diferenciar el contenido de arcillas de las formaciones y en consecuencia permiten estimar cualitativamente variaciones de porosidad y permeabilidad en medios sedimentarios recientes.

En combinación con otros registros (investigaciones con trazadores) es un instrumento de fácil manejo para detectar zonas impermeables.

Es uno de los pocos registros en que el estado del pozo no tiene una influencia decisiva, pudiendo efectuarse las medidas en pozos entubados.

4.2.2. Registro Gamma - Gamma.-

Esta herramienta también se denomina como Log de

densidad. Tiene interés respecto a nuestros objetivos ya que las medidas de densidad de las formaciones están inversamente relacionadas con la porosidad de las mismas.

En la herramienta está incluida una fuente radioactiva, que suele ser C_{60} ó Cs_{137} . Un brazo articulado mantiene los detectores apretados contra la pared con un dispositivo de muelles. El sistema incorpora un dispositivo colimador que garantiza que se registre sólo la radiación gamma que efectivamente ha viajado por las formaciones.

Un sistema electrónico evalúa los registros independientes de dos detectores, para eliminar los efectos del mud cake y de irregularidades del pozo.

Existen dispositivos que dan, mediante transformación de los valores medidos, información sobre la densidad aparente conocida con la denominación Densidad de Formación (Verdier, 1986).

Los instrumentos de la última generación se basan en el fenómeno del efecto fotoeléctrico, que calcula el número atómico Z que permite obtener conclusiones directas sobre la litología de la formación.

Los materiales carbonatados tienen una densidad entre 2.7-2.85 g/cc, las arcillas entre 1.8-2.2 g/cc, las areniscas se encuentran de una densidad entre 2.4-2.65 g/cc. Con estos ejemplos se ven claramente el rango de valores que hay que discriminar con el método. Sin embargo los registros de testificación de densidad se consideran como método auxiliar combinado con otros. Es un registro útil para interpretar variaciones de porosidad en yacimiento sedimentarios.

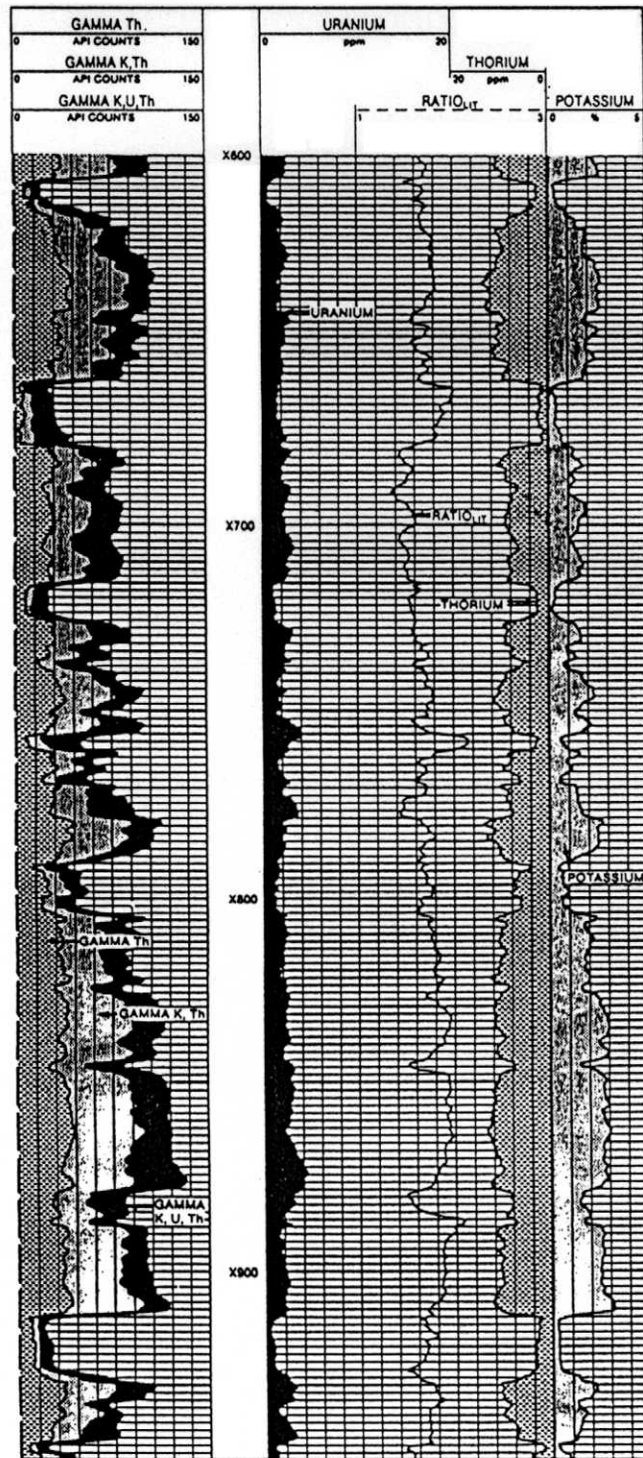


Fig. 8.- Ejemplo de registro espectral de la radiación gamma natural.

La densidad de rocas ígneas y metamórficas es en general más alta, variando desde 2.6 g/cc de las andesitas, hasta 2.8 g/cc en las rocas de alta metamorfosis. La variación de densidad dentro de un medio litológico está provocada en general por cambios de porosidad o alteraciones de la roca (Daniels y Keys, 1989).

La relación entre densidad medida y porosidad es del tipo $D_m = D_r (1-\Phi) + D_f \cdot \Phi$.

siendo:

D_m .- Densidad medida por la sonda.

D_r .- Densidad de la matriz rocosa.

D_f .- Densidad del fluido.

Φ .- Porosidad.

4.2.3. Registro Neutrón - Neutrón.-

La sonda consiste en una fuente de neutrones (Am o Be) y uno o dos detectores (compensación para mud cake) separados por pocos centímetros. El método está basado en el principio de que los neutrones emitidos por una fuente son difundidos o absorbidos por las rocas y una parte de ellos llegan a los detectores.

Los neutrones "rápidos" (1- 5 Mev) chocan con los núcleos de los átomos de la roca y pierden energía, según la masa relativa del núcleo que participa en la colisión. Las colisiones con núcleos pesados tienen poco efecto en los neutrones; sin embargo, una colisión con un núcleo de masa equivalente (el núcleo de hidrógeno o los protones), provoca, que los neutrones pierdan rápidamente su energía. Sucesivas colisiones le convierten en un neutrón térmico que corresponde a un nivel energético de 0.1 MeV (Howard, 1989).

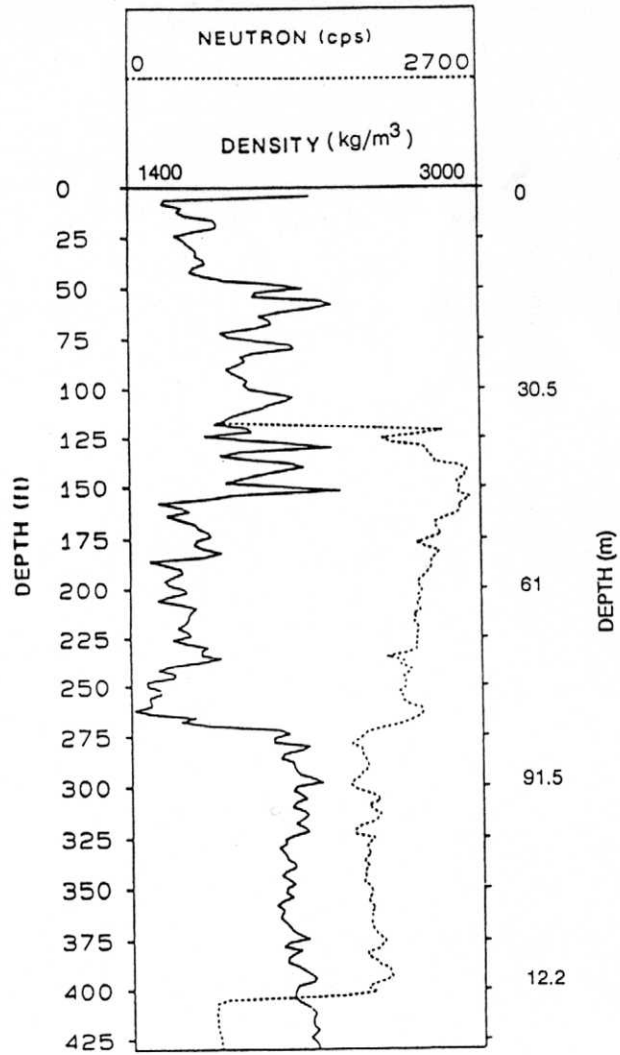


Fig. 9.- Registro de densidad y neutrón-neutrón.
(Daniels y Keys).

La mayoría de detectores están capacitados para la medida de los neutrones térmicos.

La segunda posibilidad es la detección de la radiación gamma, que se produce cuando un neutrón térmico es capturado por un núcleo de determinados elementos (método neutrón-gamma).

El primer moderador para neutrones es el átomo de hidrógeno. Por lo tanto, la testificación con el método neutrón-neutrón responde en primer lugar a la presencia de agua en la formación y así es un indicador de porosidad.

La respuesta de esta herramienta da información respecto del contenido de agua de la formación y por tanto dará una indicación indirecta sobre la porosidad y permeabilidad de la misma, asumiendo que la formación esté totalmente saturada.

En rocas compactas, la herramienta da buenos resultados en la detección de fracturación si está relacionada con la existencia de agua. Silicatos hídricos, producto de una alteración química dentro y en la proximidad de fracturas pueden ser la segunda causa de una anomalía en el registro.

Los problemas surgen con la dificultad de distinguir entre zonas alteradas, fracturadas y la presencia de minerales hídricos como la biotita. Las dificultades pueden ser resueltas con la ayuda de "cross-plots", estudios de una serie de pozos en la misma zona, etc. (Keys, 1979, McCann et al., 1981, Davidson et al., 1982).

4.3. Registro Sónico. -

El método sónico o la herramienta acústica basa su funcionamiento, en las propiedades elásticas de las formaciones.

El registro de la herramienta da una medida del tiempo de tránsito que la onda de propagación de un impulso acústico (las ondas P o de compresión) necesita para llegar del emisor al receptor, atravesando por la formación rocosa. El emisor acústico consiste en un transductor piezoeléctrico, que convierte la energía eléctrica en energía vibratoria. La sonda lleva dos receptores que funcionan en sentido contrario y transforman la energía de vibración de la onda acústica en señales eléctricas. El emisor y los detectores están mecánicamente desconectados entre sí, por una sección aislante.

En su trayecto por la roca, la señal acústica genera una serie de ondas de distintas características. Los registros de la testificación convencional se basan en la medida de la velocidad de las ondas P compresionales. La onda P es la primera en llegar a los receptores. La diferencia del tiempo de tránsito de la onda P entre los dos receptores, se usa para calcular la velocidad característica de la roca. La llegada de la onda P es automáticamente registrada por el sistema electrónico que se encuentra en la superficie.

Bajo condiciones ideales, puede considerarse el tiempo de tránsito como la suma del tiempo que la onda ha pasado dentro de la matriz sólida y el tiempo de viaje dentro de los fluidos que rellenan los poros. En consecuencia los registros del método sónico están relacionados de forma lineal con el contenido de agua (o fluidos en general), que es equivalente a la porosidad, suponiendo la saturación de la roca.

En presencia de fracturación, la onda acústica tiene la tendencia de evitar las fracturas y a propagarse por el trayecto más corto hacia el detector. A diferencia de las testificaciones con los métodos de neutrón - neutrón y gamma - gamma que aportan información respecto a lo porosidad total, el método sónico mide de forma preferente la componente primaria o intergranular (Howard 1989).

Para cálculos cuantitativos, la formula de Wyllie del tiempo promedio, relaciona las velocidades con la porosidad teórica:

$$1/V = \Phi/V_f + (1-\Phi)/V_m.$$

siendo:

- V - Velocidad medida.
- V_f - Velocidad del fluido.
- V_m - Velocidad de la matriz.
- Φ - porosidad.

Los registros de la velocidad acústica son adecuados para la diferenciación de litología, la determinación de porosidad y en casos determinados para la detección de zonas fracturadas. La velocidad acústica varía entre 1639 m/s en el agua, valores inferiores a los 3000 m/s en sedimentos poco consolidados y llega a velocidades superiores a los 6557 m/s en rocas metamórficas e ígneas (Daniels y Keys 1989).

En zonas fracturadas el registro sonico tiene serias limitaciones como método singular. En comparación con la testificación de densidad (gamma-gamma) o el neutrón-neutrón este registro identifica de forma cualitativa las zonas fracturadas o de permeabilidad secundaria.

En varias ocasiones el registro sónico fue destacado como método idóneo para la detección de fracturas. Sin embargo existen al respecto algunas matizaciones:

En presencia de fracturas la señal se ve gravemente atenuada con el resultado de que solamente las segundas o terceras llegadas serán registradas (Serra, 1984). En consecuencia ciclos enteros de señales desaparecen del registro. Evaluando este hecho de forma positiva se podría considerar como indicio de la presencia de fracturas (efecto skipping).

En segundo lugar, la interpretación no es muy clara si la fracturación tiene su origen en cambios litológicos (Howard 1989, Telford 1984).

Como método especializado para la detección de la porosidad de segundo grado, se desarrolló como una técnica avanzada en la interpretación de la señal acústica el análisis del "full wave train" (la señal completa).

Un valor de tipo complementario tienen los registros acústicos para el apoyo de posteriores estudios sísmicos en los medios arcillosos. En las formaciones no consolidadas, el registro acústico como método aislado es de poco interés, dado que las velocidades en las arcillas y las arenas son similares y no distinguibles.