



Secretaría de Infraestructura
y Política Hídrica
Ministerio del Interior,
Obras públicas y Vivienda
Presidencia de la Nación

COHIFE
CONSEJO HÍDRICO FEDERAL



APUNTES SOBRE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA Y TÉCNICAS DE PERFORACIÓN

**Compiladores | Dr. Rodolfo Fernando García
Dr. Eduardo Castro**

**SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA Y POLÍTICA HÍDRICA
CONSEJO HÍDRICO FEDERAL**

PLAN NACIONAL FEDERAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO 075/2011
“COMPORTAMIENTO Y EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL ARSÉNICO
EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA”

**Universidad Nacional de La Pampa
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires**

1 DE SEPTIEMBRE DE 2018



Esta publicación cuenta con el apoyo de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica y del Consejo Hídrico Federal, siendo la información de exclusiva responsabilidad de los compiladores.

INDICE

MÓDULO 1. Exploración de aguas subterráneas. Métodos Eléctricos 1D y 2D. El Sondeo Eléctrico Vertical. Uso de software libre. Elaboración de cortes geoelectrónicos y cortes geológicos. Tomografía Eléctrica. Electromagnéticos: MT, AMT. Bases teóricas. Equipos de registro. Trabajo de campo. Interpretación de datos.	7
1. Exploración de Aguas Subterráneas	7
1.1. Tipología de Acuíferos	11
1.3. Métodos de Prospección de Agua Subterránea	15
1.4. Métodos Resistivos	18
1.5. Prospección Geoelectrónica 1 D – El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Sondeos Dipolares	25
1.6. Prospección Geoelectrónica 2D y 3D	49
1.7. Prospección Magnetotelúrica (MT)	52
1.7. Prospección Audio Magnetotelúrica (AMT)	57
MÓDULO 2. Perforación de pozos. Método de Percusión. Principios. Equipos y herramientas. Metodología de perforación. Método de Rotación: Rotativo Directo. DDH (Diamantina). Aire Reverso. Principios. Equipos y herramientas. Técnicas de perforación.	58
2. Perforación de Pozos	58
2.1. Método de Percusión	59
2.2. Método a Rotación Directa o Rotary	64
2.3. Método a Rotación DDH (Diamantina)	72
2.4. Método a Rotación Aire Reverso	78
2.5. Método Odex	81
MÓDULO 3. El Pozo Exploratorio. Perfilajes durante y posteriores a la perforación exploratoria: Perfil de cronometraje, perfil litológico, comportamiento de la máquina. Perfilajes eléctricos (potencial espontáneo, resistividad y gamma). Cálculo de Tiempo de Retorno. Interpretación de electropofilajes.	82
3. El Pozo Exploratorio	82
3.1. Tiempo de retorno	82
3.2. Perfilajes de Pozos	83
3.3. Perfilajes durante la perforación exploratoria	84
3.4. Perfilajes posteriores a la perforación exploratoria	86
MÓDULO 4. El Pozo de Explotación: Diseño del pozo. Entubado. Relleno de prefiltro. Cálculo de tamaño y volumen de prefiltro. Determinación de abertura de filtro. Cementaciones. Lavado y Desarrollo. Equipos de bombeo. Video filmación de Pozos. Diagnósticos por imagen.	93
4. Pozo de Explotación	93
4.1. Entubación	93
4.2. Rellenos de Gravas o Prefiltros	95
4.3. Cementación	97

4.4.	Verticalidad y Alineación_____	99
4.5.	Desarrollo _____	99
4.6.	Bombas _____	101
4.7.	Video Filmación de Pozos y Diagnóstico por Imagen _____	104
4.8.	Actividad bacteriana en Pozos _____	108
5.	Bibliografía _____	112

Índice de Fotos

Foto 1: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (1970 – 1980).	34
Foto 2: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (1990).	35
Foto 3: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (2010).	35
Foto 4: Equipo de registro de Tomografía Eléctrica.	49
Foto 5: Cables multielectrodos con nodos de contacto y electrodos.	50
Foto 6: Equipo EMI. A la izquierda con conexiones a las barras magnéticas X, Y, Z y a los electrodos MN. A la derecha, conexión al sistema de GPS y PC. Gentileza del INGEIS.	54
Foto 7: A la izquierda barra magnética X. A la derecha, barra magnética vertical (Z). En todos los casos las tres componentes del campo magnético se encuentran enterradas.	54
Foto 8: Equipo de prospección geofísica para adquisición AMT.	57
Foto 9: Equipo de percusión y herramientas (en primer plano se observa la cuchara).	60
Foto 10: Trépano de un equipo de percusión.	61
Foto 11: Equipos de perforación con sistema rotativo.	64
Foto 12: Trépano tricono. Se observa rosca cónica, boquilla y dientes insertos. A la derecha, esquema del flujo del fluido de perforación o inyección.	65
Foto 13: Trépano y Portamechas o barra de peso.	66
Foto 14: Barras de sondeo. Se observa rosca macho y hembra, cónica.	66
Foto 15: En el mástil o torre, se observa suspendido el vástago y el cuadrante que se inserta en la mesa.	67
Foto 16: Mesa rotativa vista desde el frente (izquierda) y mesa rotativa vista desde atrás, con vástago y cuadrante (derecha).	67
Foto 17: Bomba de lodo de dos pistones.	68
Foto 18: Piletas de inyección y circuito de inyección.	69
Foto 19: Lodo orgánico (polímeros) preparado con salmueras.	71
Foto 20: Equipo de diamantina con torre tradicional (perforación a 90°).	72
Foto 21: Equipo de diamantina con torre rebatible (perforación con ángulo distinto a 90°).	72
Foto 22: Diferentes tipos de coronas (brocas) con diamantes insertos.	73
Foto 23: Detalle de diferentes tipos de coronas diamantadas.	73
Foto 24: barras o tubos de perforación de diamantina.	74
Foto 25: Barra de perforación en primer plano. Atrás equipo de perforación en funcionamiento.	74
Foto 26: Preparación (izquierda) y circulación de lodo (derecha) en la perforación de diamantina.	75
Foto 27: Arpón y barril para recuperación de corona testigo.	75
Foto 28: Extracción de la corona testigo del barril y almacenamiento en cajas de logeo.	76
Foto 29: Cajas de logeo y almacenamiento estandarizadas de 0,762 metros.	76
Foto 30: Equipo de aire reverso, con ciclón a la izquierda.	78
Foto 31: barras dobles o barras de doble pared para aire reverso.	78
Foto 32: Ciclón, con bolsa para recoger el cutting.	79
Foto 33: Martillos o cabezales de fondo para aire reverso.	79
Foto 34: Cabezal tipo tricono o trépano tricono para aire reverso.	80
Foto 35: Sistema Odex en modo perforación (izquierda) y en modo de entubación (derecha).	81
Foto 36: Broca o martillo del sistema Odex.	81
Foto 37: Muestreo y descripción de cutting proveniente de una perforación.	83
Foto 38: Equipo de perfilaje de pozos. Registro de SP, SPR, RNC, RNL y Gamma en el Salar de Pozuelos	91
Foto 39: A la izquierda se observa una entubación con cañería de PVC, mediante roscas. A la derecha, columna de entubación (filtros y caño ciegos) en acero con conexión entre ambos tramos con soldadura eléctrica.	94
Foto 40: A la izquierda se observan filtros de PVC común y especial (con prefiltro adherido a la superficie externa). A la derecha se aprecia un filtro ranura continua de acero galvanizado.	94
Foto 41: A la izquierda material prefiltrante constituido principalmente por cuarzo. A la derecha, material prefiltrante procedente de fragmentos líticos.	95
Foto 42: Material prefiltrante altamente seleccionado y redondeado de cuarzo.	95
Foto 43: Izquierda, inicio del desarrollo mediante sobrebombeo (agua turbia). Derecha, pozo desarrollado (agua clara). Localidad de Vaca Perdida, provincia de Formosa.	100

Foto 44: Desarrollo de pozo con aire comprimido. Izquierda, compresor con manguera de inyección de aire al pozo. Derecha, producción de agua. Salar del Hombre Muerto (provincia de Catamarca).	100
Foto 45: Electrobomba sumergible. A la derecha, esquema del motor (parte inferior) y de las turbinas (parte superior).	102
Foto 46: Bomba de eje. Se observa cabezal sobre el pozo y correas de distribución accionada por motor cardánico (atrás).	103
Foto 47: Estado de limpieza de filtros luego de finalizado el desarrollo y limpieza (filtros limpios).	105
Foto 48: Estado de filtros luego del desarrollo y limpieza (se observan restos de bentonita).	105
Foto 49: Filtros totalmente obturados por precipitados de carbonato de calcio.	106
Foto 50: Filtro tapizado de carbonatos y roto.	106
Foto 51: Observación del estado físico de la unión de soldaduras entre caños.	107
Foto 52: Elementos extraños dentro del pozo.	107
Foto 53: Actividad bacteriana en cañería de impulsión de electrobomba.	109
Foto 54: Actividad de bacterias de hierro en un filtro.	109
Foto 55: Precipitado negro debido a la presencia de bacterias sulforeductoras.	110
Foto 56: Precipitado ocre debido a la presencia de bacterias de hierro.	111

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Representación gráfica del concepto de Permeabilidad Darciana.	7
Ilustración 2: Representación gráfica del concepto de Transmisividad.	8
Ilustración 3: Representación gráfica del concepto de Coeficiente de Almacenamiento en un Acuífero libre.	9
Ilustración 4: Acuífero libre, mostrando el nivel freático (Fetter, 1988).	12
Ilustración 5: Acuífero confinado (Fetter, 1988).	13
Ilustración 6: Acuífero confinado, mostrando pozos artesianos y surgentes (Fetter, 1988).	13
Ilustración 7: Acuíferos libre, semiconfinado y confinado (Fetter, 1988).	14
Ilustración 8: Circuito de emisión y recepción.	19
Ilustración 9: Concepto de Resistencia y Resistividad.	19
Ilustración 10: Resistividad de sedimentos secos, saturados con agua dulce y con agua salada.	20
Ilustración 11: Superficies equipotenciales alrededor de un electrodo de corriente.	24
Ilustración 12: Líneas de corriente y equipotenciales en un corte transversal, generadas por dos electrodos de corriente conectados en superficie.	25
Ilustración 13: Líneas de corriente y equipotenciales en una vista en planta, generadas por dos electrodos de corriente conectados en superficie.	25
Ilustración 14: Medición de la resistividad aparente en un terreno compuesto por dos capas horizontales de resistividad diferente.	26
Ilustración 15: Distintos dispositivos electródicos.	27
Ilustración 16: Dispositivo electródico Wenner (visto en planta).	28
Ilustración 17: Dispositivo electródico Schlumberger (visto en planta).	29
Ilustración 18: Dispositivo electródico Semi - Schlumberger (visto en planta).	29
Ilustración 19: Dispositivo dipolar axil visto en planta. Modificado de Loke, 2004.	30
Ilustración 20: Sondeo Dipolar Axil bilateral visto en planta.	30
Ilustración 21: Dispositivo electródico Schlumberger y cálculo de constante geométrica.	31
Ilustración 22: Sondeo eléctrico en una capa de espesor infinito, homogéneo e isótropo.	38
Ilustración 23: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de dos capas; una superior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E1 y, una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.	39
Ilustración 24: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de dos capas; una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E1 y, una inferior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor infinito.	40
Ilustración 25: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo K); una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E1, una intermedia resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E2 y una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.	41
Ilustración 26: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo H); una superior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E1, una intermedia conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E2 y una inferior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor infinito.	42
Ilustración 27: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo H.	42
Ilustración 28: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo A); una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E1, una intermedia medianamente resistiva (100 Ohm.m) y de espesor E2 y una inferior resistiva (300 Ohm.m) y de espesor infinito.	43
Ilustración 29: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo Q); una superior resistiva (300 Ohm.m) y de espesor E1, una intermedia medianamente resistiva (100 Ohm.m) y de espesor E2 y una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.	44
Ilustración 30: Ejemplo de determinación de paleocauces con tomografía eléctrica (Conhidro, 2010).	51
Ilustración 31: Modelo 1D de las estaciones Ingeniero Juárez (izquierda) y Clorinda (derecha), provincia de Formosa (García, et al., 2008).	56
Ilustración 32: Modelo 2D, MT entre Ingeniero Juárez y Clorinda, provincia de Formosa (García, et al., 2008).	56
Ilustración 33: Equipos de perforación de distintas características y métodos.	59
Ilustración 34: Esquema de un equipo de perforación de percusión.	63
Ilustración 35: Perfil, descripción litológica y perfil de cronometraje en un pozo exploratorio.	85
Ilustración 36: Perfil litológico y de SP mostrando línea base de arcillas y deflexiones a la derecha (agua dulce) y a la izquierda (agua salada), respecto a la conductividad del lodo (Vitulli, 2010).	88
Ilustración 37: Perfil litológico, cronometraje, potencial espontáneo (SP), resistividad normal corta y larga (RNC y RNL), en un pozo exploratorio de la provincia de Formosa.	92
Ilustración 38: Tamizado de muestras de sedimentos para construcción de curva granulométrica.	96
Ilustración 39: Esquema de aislación por cementación de un acuífero portador de agua salada, con acuíferos con agua dulce.	98

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Dispositivos dipolares (Orellana, 1984).	28
Gráfico 2: Curva de resistividad aparente con empalmes (método Schlumberger).	37
Gráfico 3: Curva de resistividad aparente (método Wenner).	37
Gráfico 3: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de una capa.	38
Gráfico 4: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de dos capas.	39
Gráfico 5: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de dos capas.	40
Gráfico 6: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo K.	41
Gráfico 7: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo A.	43
Gráfico 8: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo Q.	44
Gráfico 9: Curva de campo con valores de resistividad aparente obtenidos con el método Schlumberger (con empalmes).	45
Gráfico 10: Curva de gabinete con valores de resistividad aparente (empalmada).	45
Gráfico 11: Curva de resistividad aparente (curva de campo en puntos), curva interpretada (rojo) y profundidades y resistividades verdaderas que corresponden al modelo (azul).	47

Índice de Tablas

Tabla 1: Métodos geofísicos más usuales en la investigación del subsuelo.	15
Tabla 2: Factores que influyen en la selección de los dispositivos.	27
Tabla 3: Modelo de planilla para SEV.	36
Tabla 4: Organismos y géneros más comunes en la actividad bacteriana de pozos.	111

MÓDULO 1. Exploración de aguas subterráneas. Métodos Eléctricos 1D y 2D. El Sondeo Eléctrico Vertical. Uso de software libre. Elaboración de cortes geoeléctricos y cortes geológicos. Tomografía Eléctrica. Electromagnéticos: MT, AMT. Bases teóricas. Equipos de registro. Trabajo de campo. Interpretación de datos.

1. EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea es aquella que circula, movida por las fuerzas gravitatorias, a través de los poros o intersticios de las formaciones geológicas que conforman el subsuelo. Se define como **medio de circulación del agua subterránea** a aquellos cuerpos de roca que poseen intersticios (poros o fisuras), que permiten el movimiento del agua en el subsuelo. La corteza terrestre está conformada por materiales de constitución muy heterogénea, cuyas características, propiedades y distribución areal deben ser estudiadas para comprender la geología de los yacimientos de aguas de una región.

En el estudio del agua subterránea, tanto para conocer la distribución de las líneas de flujo, caudales y reservas es necesario conocer una serie de parámetros que son conocidos como Parámetros Hidráulicos de los acuíferos. Como expresa Sánchez San Román (2001), la “Personalidad Hidrogeológica” (o Propiedades Hidrogeológicas) de cualquier roca o formación geológica está definida por dos factores:

- ❖ Su capacidad de almacenar agua y luego cederla (porosidad y coeficiente de almacenamiento).
- ❖ Su capacidad de transmitir el agua que circula por ella (permeabilidad y transmisividad)

a. Permeabilidad

La Permeabilidad es definida normalmente como la facilidad que un cuerpo de roca o sedimento ofrece a ser atravesado por un fluido. Este concepto básico en geología, tiene un alcance más preciso en Hidrogeología ya que la Permeabilidad o Conductividad Hidráulica es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. Esta expresión es la Ley de Darcy, por lo que es válido denominarla Conductividad Hidráulica o Permeabilidad Darciana (KD). Las unidades de la Conductividad Hidráulica son las de una velocidad (L/T).

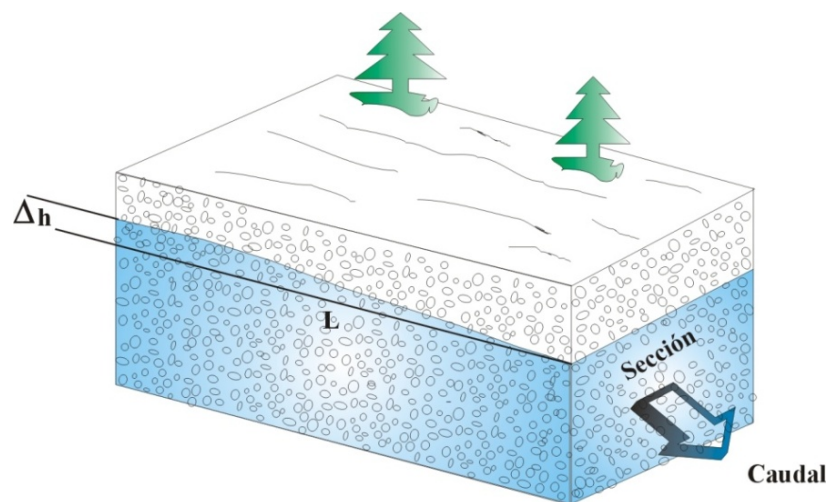


Ilustración 1: Representación gráfica del concepto de Permeabilidad Darciana.

La Permeabilidad es una medida muy característica de la textura del acuífero pero, como se verá más adelante, no representa las posibilidades de ceder agua como es el concepto de la Transmisividad. Un acuífero muy permeable, pero de muy poco espesor, puede ser poco transmissivo y, como consecuencia los pozos que se construyan en él, no brindarán mucho caudal.

K (m/día)	Clasificación
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

b. Transmisividad

Este concepto fue introducido por Theis en 1935 y lo define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho igual a la unidad y de altura igual al espesor permeable saturado, bajo un gradiente igual a la unidad y a una temperatura determinada. La transmisividad es representativa de la capacidad que tiene un acuífero para ceder agua. Theis intuyó que un acuífero que presenta una KD de 50 m/día y tiene un espesor de 5 metros, debería entregar el mismo caudal que un acuífero que tiene una KD de 25 m/día y 10 metros de espesor. La ley de Darcy expresa:

$$Q = K_D \cdot i \cdot A$$

El área (A) perpendicular al flujo, puede expresarse como el producto de la extensión del acuífero (L) por el espesor permeable saturado (e), luego: $Q = K_D \cdot i \cdot L \cdot e$

El producto **KD. e**, se conoce como Transmisividad Darciana (TD): $T_D = K_D \cdot e$

Por lo tanto la Ley de Darcy puede expresarse: $Q = T_D \cdot i \cdot L$ o bien: $T_D = \frac{Q}{L \cdot i}$

La Transmisividad, en consecuencia se expresa en m²/día o cm²/seg.

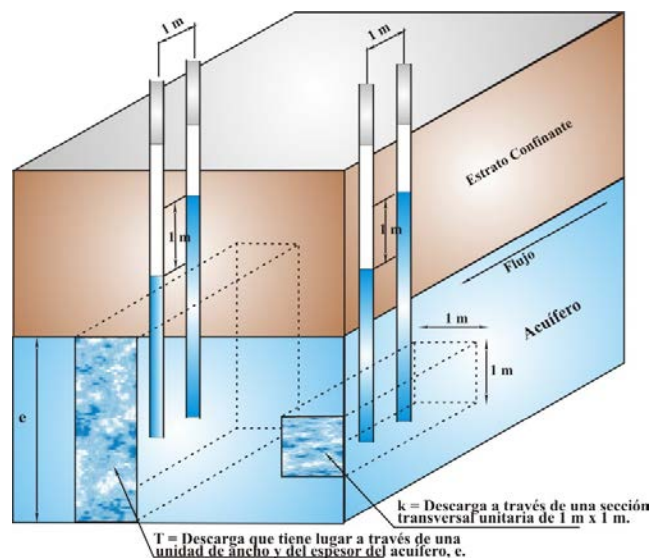


Ilustración 2: Representación gráfica del concepto de Transmisividad.

T (m ² /día)	Clasificación	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozo de menos de 3,6 m ³ /h, con 10 metros de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 3,6 y 36 m ³ /h, con 10 metros de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 36 y 180 m ³ /h, con 10 metros de depresión teórica.
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 180 y 360 m ³ /h, con 10 metros de depresión teórica.
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 360 m ³ /h, con 10 metros de depresión teórica.

c. Coeficiente de Almacenamiento

Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical de acuífero de sección igual a la unidad y de altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o carga hidráulica. El coeficiente de almacenamiento S , no tiene dimensión. En la literatura inglesa el Coeficiente de Almacenamiento se denomina Storativity (S) y se define como el volumen de agua que una unidad permeable va a absorber o expeler del almacenamiento por unidad de superficie cuando se produzca un cambio de gradiente en una unidad. Es adimensional. En la zona saturada, la carga piezométrica genera presión afectando al arreglo de los granos, así como a la densidad del agua almacenada en los espacios porales. Si la presión aumenta, se expande la trama mineral, si la presión disminuye, la trama se contrae o comprime. Esto se denomina elasticidad. El agua se va a contraer con un aumento en la presión y se expande si esta cae. Cuando el gradiente en un acuífero o capa confinante disminuye, la trama del acuífero se comprime, lo que reduce la porosidad efectiva y se expela agua. De acuerdo a la definición, en los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz; ya que si por ejemplo se considera 1 m² de acuífero libre y se hace descender 1 metro su superficie freática, el volumen de agua extraído será igual a la porosidad eficaz.

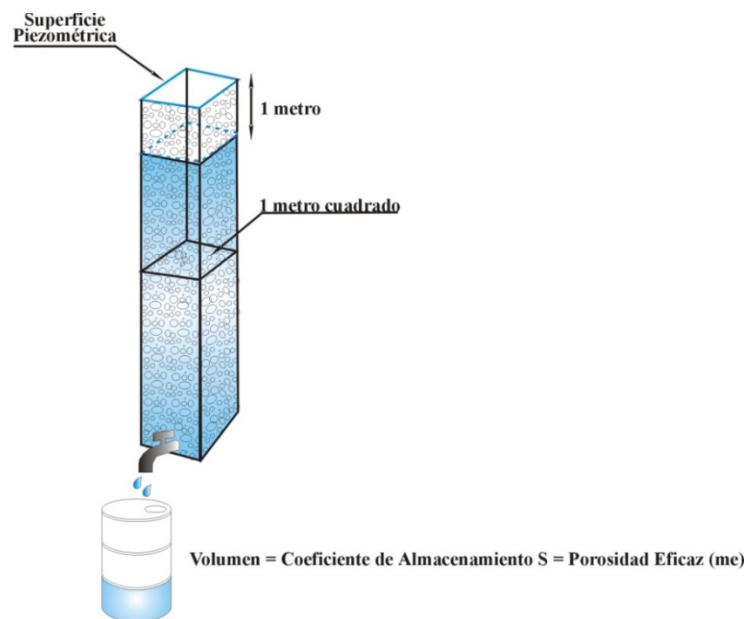


Ilustración 3: Representación gráfica del concepto de Coeficiente de Almacenamiento en un Acuífero libre.

En los acuíferos confinados o cautivos, lamentablemente, el concepto no es tan simple ya que además entran en juego parámetros tales como los efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua. En un acuífero confinado, cuando proporciona agua, todos sus poros continúan llenos de agua (a diferencia de los poros de un acuífero libre que se vacían a medida que entrega el agua) y sólo disminuye la presión. De esta forma, queda claramente evidenciado que en los sistemas confinados, el dato de porosidad eficaz no indica nada acerca de la cantidad de agua disponible en el reservorio.

El Specific Storage (S_s) de la literatura inglesa (Fetter, 1988) se refiere a la cantidad de agua por unidad de volumen de una formación saturada que es almacenada o expelida del almacenamiento debido a la compresibilidad de la trama mineral y del agua poral por unidad de cambio de gradiente, también se conoce como "Elastic Storage Coefficient". Este concepto se aplica a acuíferos y a capas confinantes.

$$S_s = \rho_w \cdot g (\alpha + m\beta)$$

Donde,

ρ_w es la densidad del agua

g es la aceleración de la gravedad

α es la compresibilidad de la trama del acuífero

β es la compresibilidad del agua

m es la porosidad total

S_s posee dimensiones de longitud $^{-1}$ y generalmente es un número muy pequeño. En un acuífero confinado, al caer el gradiente, el nivel piezométrico sigue estando por arriba del techo del acuífero, a pesar de que se saca agua del almacenamiento, el acuífero permanece saturado. De la misma forma, en un acuífero confinado, el Storativity (S) es igual al producto de su Specific Storage (S_s), por el espesor (b) del acuífero:

$$S = b \cdot S_s$$

Al tener en cuenta las unidades, el concepto de Storativity (S) es adimensional. El agua es incorporada o cedida debido a la compresibilidad de la trama mineral y del agua contenida en los poros. El agua proviene de todo el espesor del acuífero. El valor correspondiente a un acuífero confinado es muy pequeño. En un acuífero libre, al fluctuar el nivel por variaciones en el almacenamiento, el agua drena desde los espacios porales. Esta adición o pérdida es debida a su porosidad efectiva (m_e).

$$S = h \cdot m_e \cdot S_s$$

m_e = porosidad efectiva

h = espesor saturado

S_s = specific storage

Los valores de porosidad eficaz (m_e), son muy grandes con respecto al producto del espesor saturado y el valor de Specific Storage, por esto, los valores de Storativity se consideran como equivalentes a la porosidad eficaz o el llamado Specific yield (S_y).

$$S = m_e = S_y$$

El coeficiente de almacenamiento es adimensional (ya que es una relación de volumen/volumen), y los valores que presenta son mucho más bajos en los acuíferos confinados perfectos que en los semiconfinados y libres. Los valores típicos son:

- ❖ Acuíferos libres: 0,3 a 0,01 ($3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2})
- ❖ Acuíferos semiconfinados: 10^{-3} a 10^{-4}
- ❖ Acuíferos confinados: 10^{-4} a 10^{-5}

En el caso de los acuíferos confinados, el agua liberada procede de los efectos mecánicos de la compresión del cuerpo del acuífero (trama sólida) y del agua. En el caso de los acuíferos libres o freáticos, ignorando los efectos relativamente pequeños que puede introducir la elasticidad del acuífero, resulta claro que el coeficiente de almacenamiento es equivalente a la porosidad eficaz, ya que en ambos casos resulta ser la cantidad de agua que puede ser extraída por gravedad de una unidad de volumen de acuífero saturado.

1.1. Tipología de Acuíferos

Como se ha visto, el agua que circula en el subsuelo lo hace a través de diferentes medios. Ese medio, analizado sobre la base de su permeabilidad, permite clasificarlos en: Acuífugo, Acuicludio, Acuitardo y Acuífero.

- ❖ Acuífugo: Formación geológica que no almacena ni transmite agua.
- ❖ Acuicludio: Formación geológica capaz de almacenar agua pero no transmitirla.
- ❖ Acuitardo: Formación geológica que almacena y transmite agua subterránea a escala regional.
- ❖ Acuífero: Formación geológica que almacena y transmite agua subterránea en cantidades económicamente explotables.

El estudio del agua subterránea es importante para la realización de obras de ingeniería, para la ejecución de investigaciones geológicas y muy especialmente para el desarrollo de obras de captación de agua con fines de abastecimiento para satisfacer las necesidades del hombre. Las formaciones geológicas en que se acumula el agua subterránea y que son capaces de cederla reciben el nombre de acuíferos. Los acuíferos sirven como conductos de transmisión y como depósitos de almacenamiento. Como conductos de transmisión, transportan el agua subterránea de las áreas de recarga, hacia lagos, pantanos, manantiales, pozos y otras estructuras de captación. Como depósitos de almacenamiento, los acuíferos actúan suministrando agua de sus reservas para ser utilizadas cuando la extracción exceda a la recarga y, a la vez, almacenando agua durante los períodos en que la recarga resulta mayor que la extracción (PIEB, 2000).

Los espacios huecos o intersticios que presentan las rocas que componen los acuíferos, pueden ser poros o vacíos intergranulares, como en el caso de rocas formadas por depósitos sedimentarios granulares (gravas y arenas), consolidados o no, o fracturas, fisuras y canales de disolución.

Los acuíferos, que son unidades geológicas que almacenan y transmiten agua en cantidades económicamente explotables, pueden encontrarse en diversos ambientes geológicos, en contacto directo con la atmósfera o bien, desconectados parcial o totalmente de ésta y por lo tanto, sometidos a cargas hidráulicas muy distintas. Desde este punto de vista se pueden clasificar a los acuíferos en:

1. Acuíferos Libres, Freáticos o No Confinados
2. Acuíferos Confinados, Cautivos o Artesianos
3. Acuíferos Semiconfinados (Leaky aquifers)
4. Acuíferos Semilibres

1. Acuífero Libre o Freático

Los acuíferos libres son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica como límite superior de la zona de saturación. Esta superficie se conoce como superficie freática y el nivel a que ella se eleva, respecto a otro de referencia, se llama **nivel freático**. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado en agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable. La profundidad de este sustrato impermeable varía de acuerdo al medio geológico, desde unas decenas a cientos de metros.

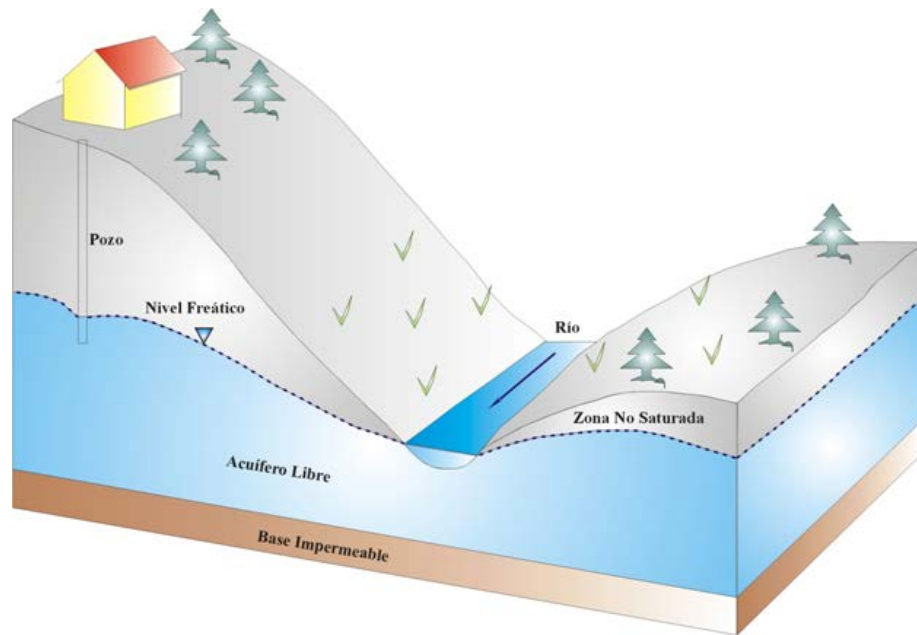


Ilustración 4: Acuífero libre, mostrando el nivel freático (Fetter, 1988).

En la mayoría de los casos, existe solamente un nivel freático, pero en otros a causa de la presencia de acuitardos de pequeñas dimensiones relativas, pueden existir acuíferos que se denominan acuíferos colgados con niveles freáticos adicionales. En algunos acuíferos libres compuestos de partículas finas, el drenaje por gravedad de los poros con frecuencia puede que no sea instantáneo, y en ese caso, el acuífero entrega el agua un cierto tiempo después de que el nivel freático desciende en el mismo. A este tipo de acuíferos se le denomina libre con entrega retardada.

2. Acuífero Confinado o Cautivo

Los acuíferos confinados, cautivos o artesianos, son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables (una inferior y otro superior). En estos acuíferos el agua está sometida, en general, a una presión mayor que la atmosférica y al perforar un pozo en ellos el agua se eleva por encima de su parte superior (techo) del acuífero hasta un nivel que se denomina nivel piezométrico. La superficie imaginaria que representa la carga piezométrica en los distintos puntos del acuífero se conoce como superficie piezométrica. Se debe recordar en este punto que, tanto el sustrato como el techo impermeable presentan morfología y posición estables, mientras que la superficie piezométrica presenta variaciones de altitud y forma. En algunos casos, la superficie piezométrica puede estar por encima del terreno natural por lo que un pozo perforado en el lugar fluirá naturalmente. Los acuíferos confinados se conocen también como artesianos a causa de que en la región francesa de Artois fue el primer lugar donde se perforaron pozos profundos en acuíferos confinados, alrededor del año 1750.

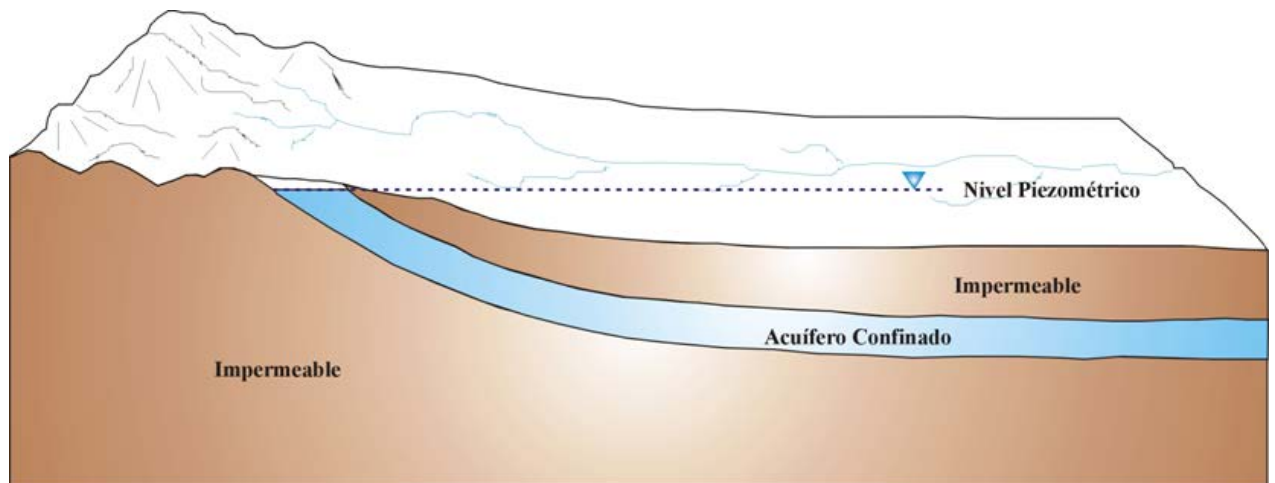


Ilustración 5: Acuífero confinado (Fetter, 1988).

De acuerdo a la posición dentro de un mismo acuífero, se puede advertir un comportamiento distinto de los pozos que se realicen en la unidad. De esta forma, un acuífero puede iniciarse como un acuífero libre (respecto a la zona de recarga), luego pasar a semiconfinado y por último, confinado totalmente. Si un pozo alcanza un nivel confinado con suficiente nivel energético (superficie piezométrica o potenciométrica) y está localizado en una posición topográfica favorable, puede alcanzar a ser un pozo surgente.

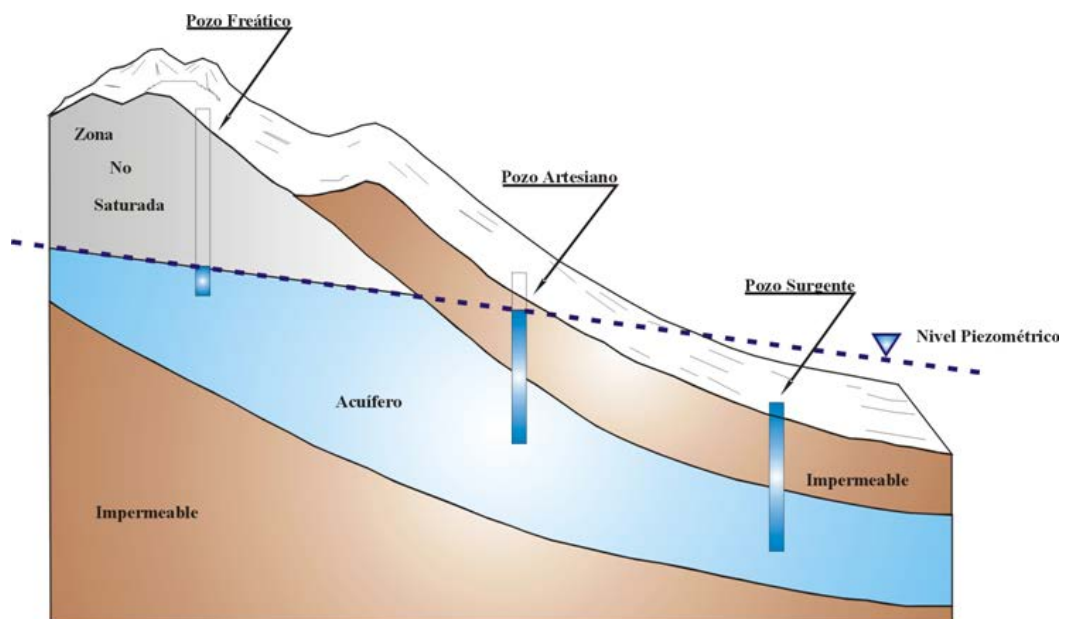


Ilustración 6: Acuífero confinado, mostrando pozos artesianos y surgentes (Fetter, 1988).

3. Acuíferos Semiconfinados

Son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (acuífugo) o también por otro acuitardo. En este tipo de acuífero, la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, por ejemplo, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. Las características del acuitardo confinante en un acuífero semiconfinado son tales que puede ignorarse la componente horizontal del flujo del acuitardo.

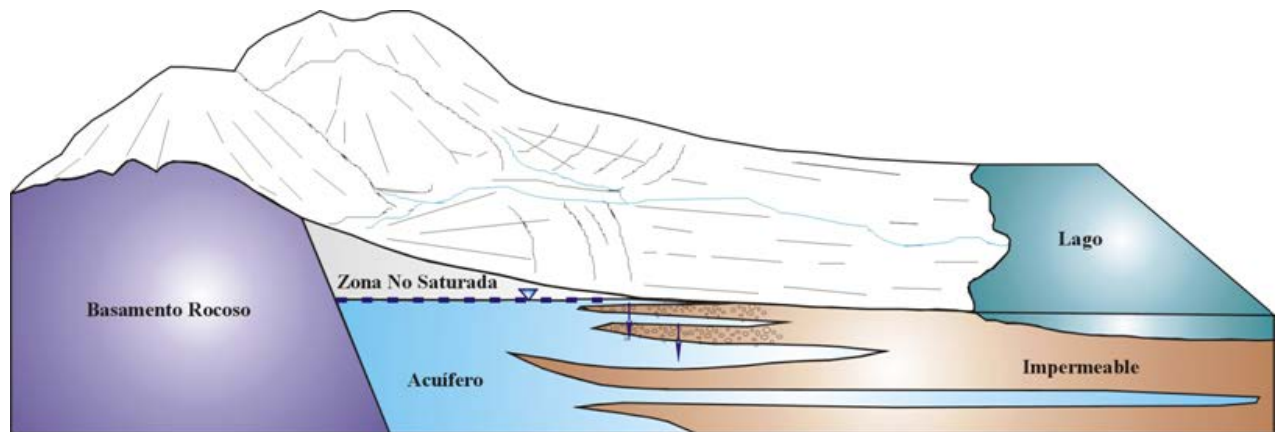


Ilustración 7: Acuíferos libre, semiconfinado y confinado (Fetter, 1988).

4. Acuíferos Semilibres

Los acuíferos semilibres representa una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que su componente horizontal de flujo no puede ignorarse.

Kruseman y De Ridder (1970), partiendo de considerar los acuíferos apoyados en una capa impermeable, especifican que el tipo de acuífero queda determinado por el carácter de la capa superior. Así quedan definidos:

Acuífero Libre	Capa superior igual que la parte principal del acuífero
Acuífero Semilibre	Capa superior semipermeable (Acuitardo), menos permeable que la parte principal del acuífero, en el que hay que tomar en cuenta la componente horizontal del flujo.
Acuífero Semiconfinado	Capa superior semipermeable (Acuitardo), en que puede ignorarse la componente horizontal del flujo.
Acuífero Confinado	Capa superior impermeable.

1.3. Métodos de Prospección de Agua Subterránea

La metodología de prospección es variada y dependerá su aplicación de acuerdo a las necesidades de investigación. Fundamentalmente, los métodos de prospección más importantes son:

1. Métodos Geológicos

Los mapas geológicos, topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales, constituyen uno de los instrumentos básicos para el estudio de las aguas subterráneas. En los estudios preliminares de reconocimiento, cuando no se dispone de datos hidrológicos, constituyen prácticamente el único punto de apoyo para hacer deducciones hidrogeológicas (Custodio & Llamas, 1996). El hidrogeólogo debe adquirir el hábito de plantearse los problemas de la localización y movimiento de las aguas subterráneas cuando examina el plano o la fotografía aérea de la zona a estudiar. Como consecuencia de ello, muchas veces formulará varias hipótesis y deberá saber programar las operaciones necesarias para comprobar cuál puede ser la hipótesis verdadera. Como es de suponer, los métodos geológicos hacen uso de las herramientas que brinda la geología. Así, se deberá conocer los principios de geología regional, estructural, estratigrafía, petrología, geomorfología, fotogeología, etc., para abordar el estudio de una zona en particular.

2. Métodos Geofísicos

De un modo general, la Geofísica puede definirse como la ciencia y técnica que, a partir de fenómenos físicos naturales o provocados (inducidos), trata de conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades. Cualquier fenómeno es utilizable, no sólo para deducir indirectamente la distribución de los materiales, su estado y sus accidentes, sino para, el caso de ser posible, estudiar directamente sus características.

La Geofísica es ciencia ya que se basa en leyes físicas científicamente establecidas; es técnica por que utiliza equipos y métodos para estudiar los diferentes materiales del suelo y subsuelo. Las propiedades y distribución de los materiales se deducen de observaciones superficiales y el terreno, en cada caso, se clasifica de acuerdo a su comportamiento ante el fenómeno empleado. Existen numerosos métodos de prospección geofísica, en función del fenómeno empleado y si es natural o inducido. Los registros geofísicos pueden realizarse en superficie o bien en pozos (abiertos y/o entubados). En función de estos aspectos puede clasificarse a los métodos en:

Tabla 1: Métodos geofísicos más usuales en la investigación del subsuelo.

Métodos	Propiedad Física Medida	Origen del Fenómeno
Gravimétrico	Aceleración de la Gravedad	Natural
Electromagnético	Susceptibilidad Magnética	Inducido
Radiactivos	Radiactividad	Natural o Inducido
Térmicos	Temperatura	Natural
Sísmicos	Refracción	Inducido
	Reflexión	Inducido
Eléctricos	Corrientes Telúricas o Magneto Telúrico (MT)	Natural
	Potencial Espontáneo	Natural
	Líneas Equipotenciales	Inducido
	Resistividad (1D, 2D y 3D)	Inducido

Cuando se investiga una región, normalmente se emplean ciencias y técnicas muy diversas destinadas a conocer las propiedades de los materiales y, muchas veces, de los fluidos, elementos y compuestos que ellos pudieran contener. Para ello se aplican estudios geológicos (estratigráficos y estructurales), geofísicos de superficie (sísmica, eléctricos, gravimétricos, magnéticos, etc.), geofísicos de pozos (eléctricos, sísmicos, radiactivos, térmicos, etc.) y toda una gama de estudios complementarios que conllevan a establecer con la mayor precisión posible las propiedades del medio que se quiere analizar.

Es imposible pensar que cada una de estas ciencias, técnicas o disciplinas se excluyan entre sí o que se establece una competencia; por el contrario, se necesitan unas de otras para alcanzar un fin determinado. Por ejemplo, se sabe que los pozos exploratorios (pozos de estudio) brindan datos precisos de la zona atravesada, pero están limitados a la zona inmediatamente próxima.

El estudio de los terrenos perforados se potencia al máximo cuando, aparte de las descripciones litológicas, se realizan registros geofísicos dentro del pozo. También es cierto que tratar de caracterizar una región amplia a través del uso exclusivo de perforaciones es prácticamente inabordable desde el punto de vista técnico y económico. Debido a esta razón, cuando se realizan estudios regionales se debe iniciar el trabajo con el reconocimiento geológico (levantamientos geológicos, cartografía, perfiles geológicos, perfiles estratigráficos, etc.) que establezca una hipótesis del marco existente. Sin embargo, si se aplicase únicamente esta metodología sería imposible determinar las verdaderas propiedades del medio que se quiere estudiar. Entre ambos métodos, como enlace, surgen la prospección geofísica, que confirma o modifica las hipótesis geológicas realizadas con los datos de superficie y permite establecer el lugar más conveniente para la realización de perforaciones que confirmaran o no las características litológicas de los niveles detectados y supuestos previamente. La coordinación de estos tres métodos de trabajo es esencial para el correcto conocimiento del subsuelo y cada uno de ellos debe respetar lo aportado por los otros y el responsable de la coordinación (un geólogo) debe conocer los alcances y limitaciones de cada uno de ellos, para poder resumir los resultados de todos y resolver el problema planteado.

✓ Métodos Magnéticos

De acuerdo a su susceptibilidad magnética, los terrenos se clasifican en paramagnéticos (susceptibilidad positiva) o diamagnéticos (susceptibilidad negativa). Su presencia modifica la distribución del campo magnético terrestre, lo que permite identificar cualitativamente su situación en el subsuelo. El método magnético es el más antiguo y, a partir del año 1950 con el advenimiento del magnetómetro discriminador de flujo y el magnetómetro nuclear, se potenció el uso de este método por la mayor rapidez y confiabilidad en la adquisición de datos que la balanza de Schmidt. Actualmente se usan desde aviones, lo que permite un levantamiento rápido de amplias zonas.

✓ Métodos Gravimétricos

Estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre, para deducir la distribución y naturaleza del subsuelo. Exige numerosas correcciones (situación y topografía) y es útil para determinar la existencia de grandes fallas que pongan en contacto rocas con diferentes densidades y para deducir la estructura del basamento en estudios regionales. La interpretación, cuantitativa, parte siempre de la premisa de una configuración hipotética de las masas perturbadoras del valor regional medio de gravedad y la comparación de los datos obtenidos con los teóricos supuestos.

✓ Métodos Electromagnéticos

Estudia la influencia del terreno sobre un campo electromagnético artificial. Pueden realizarse estudios muy rápidos desde aviones.

✓ Métodos Sísmicos

Es una derivación de los métodos ideados para el estudio de terremotos, partiendo de la base de que las oscilaciones sísmicas son consecuencia de la propagación de ondas elásticas originadas en el foco del terremoto. Posteriormente, se estableció que en un terreno cualquiera, cuando se produce una liberación brusca de energía (terremoto, explosión, etc.) una parte de ella se propaga en forma de vibraciones. Estas ondas así liberadas pueden asimilarse a fenómenos oscilatorios, lo que permite distinguir tres tipos de ondas: Ondas longitudinales o de compresión, Ondas transversales o de cizalla y Ondas superficiales. Estas ondas se propagan en todas las direcciones y sufren los mismos fenómenos que las ondas luminosas o electromagnéticas; es decir que todo punto alcanzado por las ondas se convierte en un centro emisor de esa perturbación.

Al alcanzar un frente de onda una superficie de separación de dos medios diferentes se originan una onda longitudinal reflejada y otra refractada, una onda transversal reflejada y otra refractada y por último una onda superficial. El fenómeno se complica a lo largo de la propagación, hasta concluir en una vibración muy compleja donde no es fácil distinguir las diferentes componentes. Por ello, la prospección geofísica utiliza las ondas longitudinales en todo su recorrido, que por ser las más rápidas y abundantes, son las que primero alcanzan los puntos de observación. Si se observa las primeras llegadas o frentes de ondas, que serán longitudinales en todo su recorrido, las más rápidas de todas las engendradas en el origen de la perturbación o en sus transformaciones por refracción y reflexión se tiene dos métodos: Sísmica de Refracción y Sísmica de Reflexión.

✓ Métodos Radiactivos

Existen dos tipos principales: el primero y más sencillo, mide la radiación gamma ligada al terreno y el segundo, neutrónico, mide las radiaciones gamma inducidas por la influencia de una fuente radiactiva de neutrones, o los neutrones absorbidos por el terreno.

✓ Métodos Térmicos

Los registros de temperatura permiten conocer la variación de este parámetro en profundidad y son especialmente indicados para estudiar y controlar de forma rápida, procesos tales como penetración de agua marina o procedente de yacimientos salinos, cuerpos saturados con fluidos, rocas en proceso de enfriamiento, y cualquier otro tipo donde se produzca una reacción exotérmica o endotérmica.

✓ Métodos Eléctricos

Existen muchas modalidades en los métodos de exploración eléctrica del subsuelo, cada una de ellas con su propio campo de aplicación, sus ventajas y desventajas. A continuación se muestra la clasificación propuesta por Orellana (1982), que toma en cuenta si el campo electromagnético estudiado es de origen natural o se crea artificialmente; y también, si dicho campo es constante (corriente continua) o varía en el transcurso del tiempo (corriente alterna).

A. Método de campo natural.

A-1 Método del potencial espontáneo.

A-2 Método de corrientes telúricas.

A-3 Método magneto-telúricos.

A-4 Método AFMAG.

B. Métodos de campo artificial.

B-1 Método de campo constante (corriente continua).

B-1-1 Método de las líneas equipotenciales y del cuerpo cargado (mise-a-la masse).

- B-1-2 Sondeos eléctricos (simétricos, dipolares, etc.)
- B-1-3 Calicatas eléctricas (muchas modalidades).
- B-1-4 Medición magnética de las resistividades.
- B-2 Método de campo variable.
 - B-2-1 Sondeos de frecuencia.
 - B-2-2 Sondeos por establecimiento de campo (transitorios).
 - B-2-3 Calicatas electromagnéticas (inclinación de campo, Turam, Slingram, etc.).
 - B-2-4 Método "Radio-Kip".
 - B-2-5 Método de radiografía hertziana.
- B-3 Método de polarización inducida.

La información que los métodos eléctricos brindan acerca de las características del subsuelo, pueden utilizarse con diversas aplicaciones o fines. Cada método puede brindar datos distintos; y la calidad y seguridad de la información recogida aumentan mayormente si se combinan dos o más métodos.

1.4. Métodos Resistivos

La prospección geoeléctrica es un tipo específico de estudios geofísicos donde se prospecta alguna propiedad eléctrica de las rocas y de los fluidos que se encuentran relleno los intersticios porales. La característica física que se mide en el método resistivo, empleando corriente continua, es la capacidad que poseen los terrenos naturales de conducir la corriente eléctrica. Si en un terreno cualquiera se introduce una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que es posible asignarle al terreno una resistividad o resistencia específica, una capacitancia y una inductancia. Si la corriente eléctrica empleada es continua, la resistividad es el único parámetro que tiene importancia. Se debe tener presente que solo son conductores los materiales metálicos y algunas de sus sales. Por lo tanto, normalmente, el suelo y subsuelo se comportarían como aislante o de resistividad muy alta.

Generalmente, en la mayoría de los terrenos existen poros y/o fisuras que pueden estar o no saturados de agua u otro fluido. El agua, por la presencia de sales disueltas, en una proporción que depende a la vez de la temperatura, actúa como un conductor. La resistividad de las rocas dependerá, por lo tanto, del volumen de sus poros, de su distribución y de la resistividad del fluido que los rellena. Se comprende así porque no es posible clasificar en forma simple a los terrenos por su resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua u otro fluido y a su resistividad.

❖ Conceptos Básicos

Si se introduce un par de electrodos en la superficie plana de un terreno homogéneo e isótropo y se hace circular una corriente eléctrica continua de intensidad (I), se puede registrar la caída de potencial (ΔV) que existe, también en superficie, entre dos puntos del terreno. A través de estas medidas y en base a la ley de Ohm, puede conocerse la resistividad de los terrenos involucrados en el circuito.

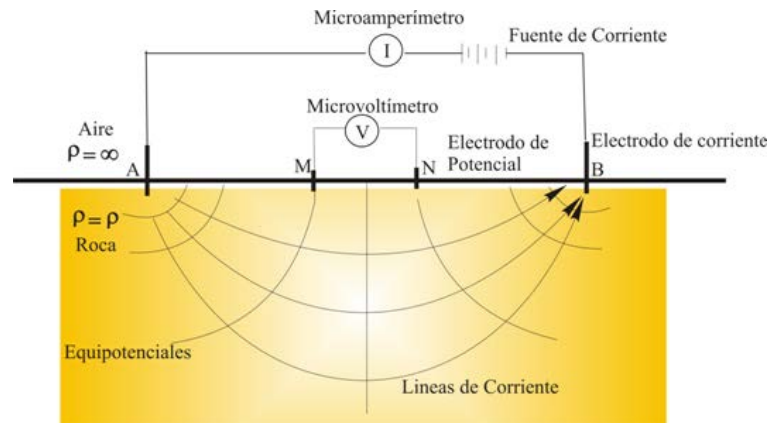


Ilustración 8: Circuito de emisión y recepción.

❖ Ley de Ohm

La ley de Ohm expresa que la Resistencia (R) que ofrece un conductor al flujo de una corriente, es directamente proporcional a la diferencia de potencial (ΔV) entre los extremos del material e inversamente proporcional a la intensidad (I) del flujo de corriente.

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

La unidad de medida de la resistencia es el Ohmio, que surge de la siguiente definición: Cuando por un conductor se hace circular una corriente de intensidad $I = 1$ Amperio, y la diferencia de potencial entre sus extremos es de 1 Voltio, la Resistencia es de $R = 1$ Ohmio (Ω).

A su vez la Resistencia (R) del conductor es directamente proporcional a la longitud (L) del material considerado, e inversamente proporcional a su sección (A), multiplicada por una constante de proporcionalidad, conocida como resistividad ρ (Rho).

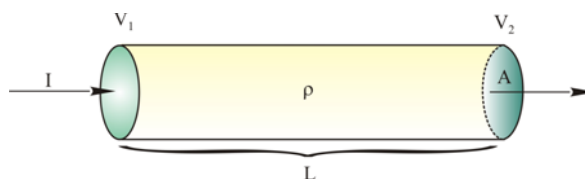


Ilustración 9: Concepto de Resistencia y Resistividad.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{y} \quad \rho = \frac{\Delta V}{I} \times \frac{A}{L}$$

La resistividad (también llamada resistencia específica) es una constante propia e intrínseca de cada material, independientemente de su forma. La unidad de medida es el Ohmio x metro ($\Omega \cdot m$). Un conductor de 1 m^2 de sección y 1 metro de longitud posee una resistividad de 1 Ohmio x metro cuando permite pasar una corriente de intensidad $I = 1$ Amperio mientras la diferencia de potencial registrada entre sus extremos es igual a (ΔV) = 1 Voltio.

1. Resistividades de las rocas más comunes

Los materiales que componen la corteza terrestre son en general **aislantes o malos conductores**, ya que sólo se comportan como conductores los metales y algunas de sus sales. Esto significa que las rocas poseen en general resistividades muy elevadas. El agua pura también tiene resistividad muy alta, pero la presencia de sales disueltas la convierte en un conductor electrolítico. Pero la mayor parte de las rocas que componen la porción más superficial de la corteza, están meteorizadas en mayor o menor medida y poseen fisuras o poros, en los que en general se encuentra un cierto contenido de humedad. El agua contenida en los poros generalmente posee sales disueltas, que contribuyen a aumentar la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Por esta razón la resistividad de las rocas consolidadas y no consolidadas depende de su constitución mineralógica, de su porosidad, del grado de saturación y del tipo de líquido que rellena los poros. El agua destilada posee una resistividad que alcanza los $3.000 \Omega \cdot m$, mientras que el agua marina puede tener $0,03 \Omega \cdot m$. Como la resistividad depende también del grado de saturación, se da el caso que una grava saturada puede tener una resistividad similar a la de una arena seca, o bien que un limo desecado puede ser igual de resistivo que una arena saturada. La situación se complica aún más si se agrega que el contenido de sales del agua intersticial es inversamente proporcional a la resistividad. Una arena saturada con agua salobre puede poseer igual resistividad que una arcilla.

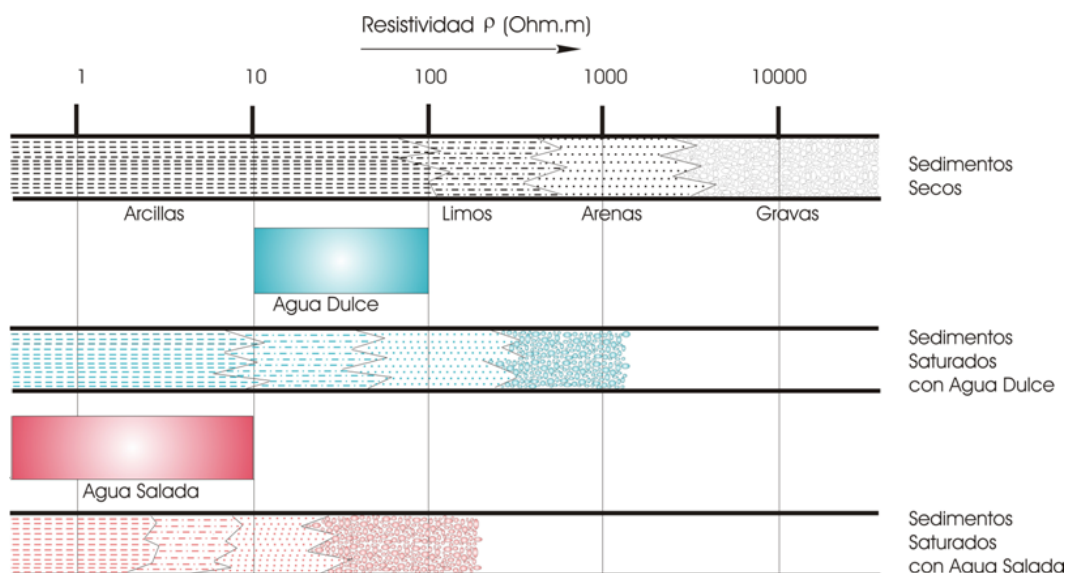


Ilustración 10: Resistividad de sedimentos secos, saturados con agua dulce y con agua salada.

2. Factores que afectan la resistividad

La resistividad varía en función de las características del terreno. Algunos de los factores que lo influyen son:

- ✓ El grado de saturación del terreno.
- ✓ La temperatura.
- ✓ Porosidad y la forma de los poros.
- ✓ La salinidad del fluido.
- ✓ El tipo de roca.
- ✓ Los procesos geológicos que afectan a los materiales.
- ✓ La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Las relaciones entre la resistividad, porosidad y textura de la roca son fundamentales para los estudios geoelectrónicos, a su vez, la resistividad también varía de acuerdo a la movilidad, concentración y disociación de los iones presentes en el agua, contenida en los intersticios en la roca. Una de las relaciones fue observada por Archie quien usó una función empírica para relacionar la resistividad y la porosidad la cual es conocida como Ley de Archie.

$$\rho_r = \frac{a \rho_w}{\phi^m S^n}$$

S es el coeficiente de saturación, ρ_w es la resistividad del fluido de los poros, ρ_r es la resistividad del terreno y ϕ la porosidad.

3. Resistencia transversal y conductancia longitudinal unitaria

Las propiedades eléctricas en conjunto con los parámetros geométricos de los materiales geológicos como espesor, profundidad, etc., determinan una sección geoelectrónica, que caracteriza la geología de una determinada área. Una sección geológica es distinta de una sección geoelectrónica cuando los límites entre capas u horizontes geológicos no coinciden con los límites entre capas caracterizadas por diferentes resistividades (Reynolds, 2011). Los límites eléctricos que separan estratos de diferentes resistividades pueden o no coincidir con los límites que separan capas de diferente edad geológica o composición litológica.

Dentro de la prospección geoelectrónica el criterio utilizado para clasificar un estrato es las variaciones direccionales de la resistividad. Una capa eléctrica está caracterizada por dos parámetros fundamentales: su resistividad ρ_i y su espesor e_i , donde el subíndice i indica la posición del estrato en la sección investigada (Cosenza Muralles y Arias Salguero, 2006). Otra manera de caracterizarla es a través de los parámetros de Dar Zarrouk. Para ello se considera un medio estratificado, suponiendo que este es atravesado por una corriente eléctrica perpendicular a la estratificación, las diferentes capas se comportarán como conductores en serie, por lo que sus resistencias se sumarán. La resistencia perteneciente a la capa, i –ésima, será:

$$T_i = e_i \rho_i$$

Este producto se llama resistencia transversal unitaria (Ohm.m). Al conjunto de las n capas primeras, corresponderá la resistencia total.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n e_i \rho_i = e_1 \rho_1 + e_2 \rho_2 + e_n \rho_n$$

Si en un prisma de suelo, se supone que la corriente fluye paralelamente a la estratificación, la resistencia será:

$$R_i = \frac{\rho_i}{E_i}$$

Estas resistencias no pueden sumarse por estar en paralelo, por lo que conviene pasar a sus inversas las conductancias, ya que estas si poseen la propiedad aditiva.

$$S_i = \frac{e_i}{\rho_i}$$

Este cociente recibe el nombre de conductancia longitudinal unitaria (Siemens). El conjunto de la n primeras capas presentará una conductancia total:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\rho_i} = \frac{e_1}{\rho_1} + \frac{e_2}{\rho_2} + \frac{e_n}{\rho_n}$$

puede obtenerse que:

$$S = \frac{E}{\rho_L}$$

$$T = \rho_T E$$

donde E es la suma de los espesores de las n capas, ρ_L se denomina resistividad longitudinal media, y ρ_T resistividad transversal media. A partir de los dos últimos parámetros se define la anisotropía λ como:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_L}} = \frac{\sqrt{TS}}{E}$$

Cuando la resistividad es la misma en sentido longitudinal y transversal dentro de un estrato geoelectrico se dice que éste es homogéneo e isótropo, es decir que $\rho_T = \rho_L$ y $\lambda = 1$.

Un medio es homogéneo cuando sus propiedades son constantes, en cualquier lugar del mismo; si esas propiedades varían, el medio es heterogéneo. Los valores de resistividad mencionados hacen referencia a materiales homogéneos e isótropos, que son condiciones más bien excepcionales en la naturaleza. Estrictamente, todo medio poroso o fracturado es un medio heterogéneo por naturaleza. Pero como a efectos prácticos solo interesan las propiedades promedio, un medio en si es homogéneo si las propiedades promediadas en un cierto volumen de material alrededor de cada punto considerado no varían de un lugar a otro (García Maurizzio, 2013).

La resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan anisotropía. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil, dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

4. Principio de equivalencia y supresión de capas

En los métodos eléctricos las curvas de campo de los sondeos vienen dadas por tan solo unos cuantos puntos, afectados con errores de medida, de modo que en vez de una curva geométrica perfectamente determinada, se tiene una serie de cortos segmentos por los que pueden pasar infinitas curvas teóricas (Orellana, 1982). Por lo tanto, las posiciones de ciertos puntos característicos de una curva de resistividad aparente, no pueden servir para determinar valores únicos de espesores y resistividades. Por ello, a cortes geológicos diferentes entre sí, pueden corresponder curvas de campo cuya discrepancia mutua es menor que el límite experimental de error, es decir: a cada curva de campo le corresponden n diferentes combinaciones de espesores y resistividades (Cosenza Muralles y Arias Salguero, 2006).

Es por ello que en la teoría de medios conductores estratificados, los parámetros y funciones que resultan de productos y cocientes entre el espesor y la resistividad de cada capa del sondeo, cobran gran importancia.

El principio de equivalencia se refiere a las modificaciones que pueden efectuarse en una capa del corte geoelectrico sin alterar la profundidad del techo de la capa, y existen dos posibles casos:

Cuando la resistencia transversal $T_i = e_i \rho_i$ de una capa es mucho menor que la del conjunto de capas conductoras adyacentes, esta puede ser sustituida por otra de distinta resistividad (ρ) y espesor (e) pero del mismo valor de T .

En el caso de que la conductancia longitudinal $S_i = \frac{e_i}{\rho_i}$ sea mucho menor que la del conjunto de capas resistivas adyacentes, la capa en cuestión puede ser sustituida por otra que mantenga una misma relación de S .

Por su parte, el principio de supresión corresponde al cambio del número de capas sin afectar la curva de resistividad aparente. En el caso de una capa delgada cuya resistividad es intermedia entre las capas adyacentes, su influencia disminuye e incluso puede ser suprimida (capa ciega) y pasar inadvertida.

Orellana (1982) consideró que los principios de equivalencia y de supresión generan cambios poco significativos en la forma de la curva del sondeo; sin embargo su influencia se ve reflejada en su interpretación.

5. Error y Ruido

A través de los electrodos M y N no llega solamente la señal debida al campo del circuito de emisión, que es la señal que se desea medir, sino también algunas tensiones indeseadas o ruidos que deben ser registrados y compensados o filtrados mediante dispositivos especiales. Corwin (2000, in Burgos, 2011) distingue que los fenómenos que perturban la señal y que, denomina error, son los asociados al propio proceso de adquisición de datos. Estos pueden ser producido por:

- ✓ Polarización del electrodo
- ✓ Efecto contacto suelo – electrodo
- ✓ Deriva (variaciones temporales del valor de la polarización–)
- ✓ Humedad del suelo
- ✓ Química del fluido
- ✓ Temperatura

Los ruidos o tensiones perturbadoras, serían todos aquellos potenciales generados de forma natural (polarización espontánea, corrientes telúricas) o artificial (ferrocarriles eléctricos, instalaciones industriales o mineras, etc.); los cuales pueden ser generados de las siguientes maneras:

- ✓ Cambios de las propiedades del terreno debido a lluvias, cambios de temperatura o actividades humanas.
- ✓ Variaciones en los campos de corrosión debido a los cambios de las propiedades del suelo
- ✓ Corrientes telúricas.
- ✓ Corrientes eléctricas debido a las actividad humana.
- ✓ Efectos topográficos.
- ✓ Corrosión de elementos metálicos enterrados.

La relación señal - ruido está estrechamente relacionada con el valor de la constante K de cada dispositivo y para el mismo modelo de subsuelo. La señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de resistividad aparente.

6. Líneas de corriente y superficies equipotenciales

La medición de la resistividad de un material requiere de un circuito eléctrico que conecte al mismo con la fuente de emisión y los instrumentos de medida. Si en un medio homogéneo e isótropo se coloca un electrodo en un punto de la superficie plana de un cuerpo dado, con resistividad (ρ), y otro electrodo a una distancia muy grande (en teoría en el infinito), la corriente de intensidad (I) se propaga en forma radial divergente en el semiespacio inferior (la resistividad del aire es infinita, por lo tanto la corriente no se propaga), de tal manera

que el potencial creado en un punto cualquiera (A) del semiespacio, a distancia a del electrodo, está dado por la ley de Ohm:

$$V = \rho \times I \times \frac{L}{S}$$

La superficie de una semiesfera es $S = 2\pi a^2$

Por lo que el potencial de un punto estará dado por:

$$V_A = \rho \times I \times \left[\frac{a}{2\pi a^2} - \frac{b}{2\pi b^2} \right]$$

Simplificando;

$$V_A = \frac{\rho \times I}{2\pi} \times \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right]$$

Como la distancia b es muy grande, el segundo término puede despreciarse y la expresión queda reducida a:

$$V_A = \rho \times I \times \frac{a}{2\pi a^2}$$

De la fórmula se deduce que los potenciales irán disminuyendo a medida que aumenta la distancia del electrodo.

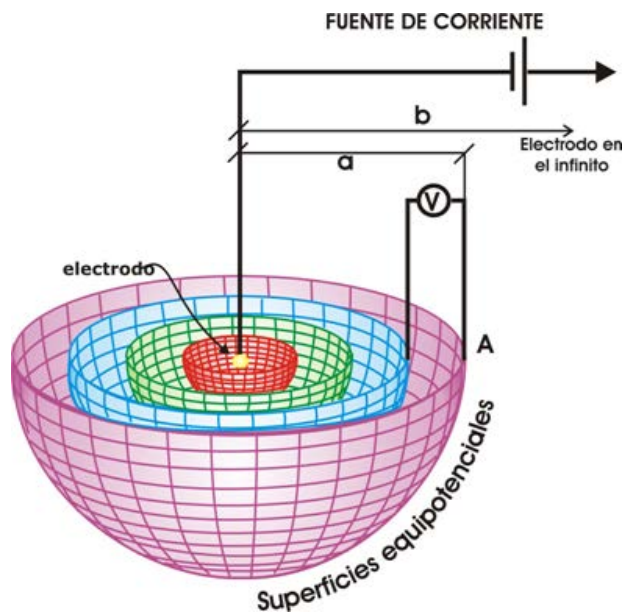


Ilustración 11: Superficies equipotenciales alrededor de un electrodo de corriente.

Si en un terreno homogéneo e isótropo se introducen dos electrodos, conectados a una fuente de poder, la corriente que circula se propaga en la forma que indica la figura.

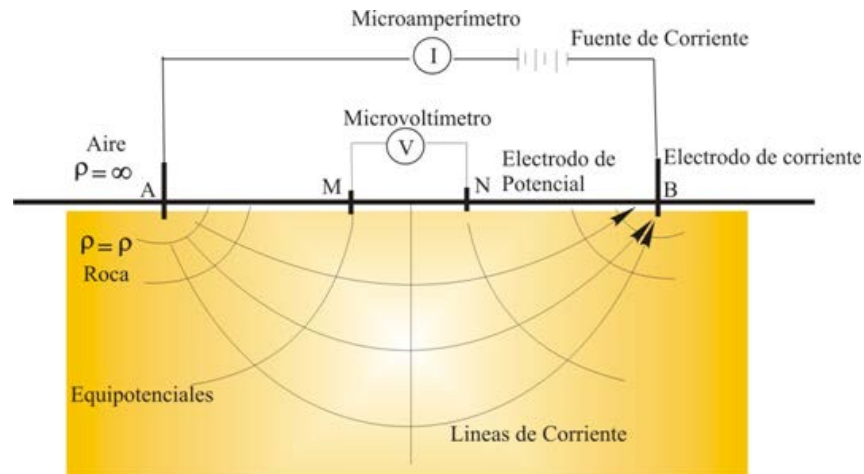


Ilustración 12: Líneas de corriente y equipotenciales en un corte transversal, generadas por dos electrodos de corriente conectados en superficie.

Si se tiene presente que el potencial es máximo en uno de los electrodos y mínimo en el otro, el gradiente de potencial puede graficarse en forma de líneas equipotenciales, que se disponen en forma perpendicular a las líneas de corriente. Vistas desde superficie, estas equipotenciales poseen la siguiente disposición:

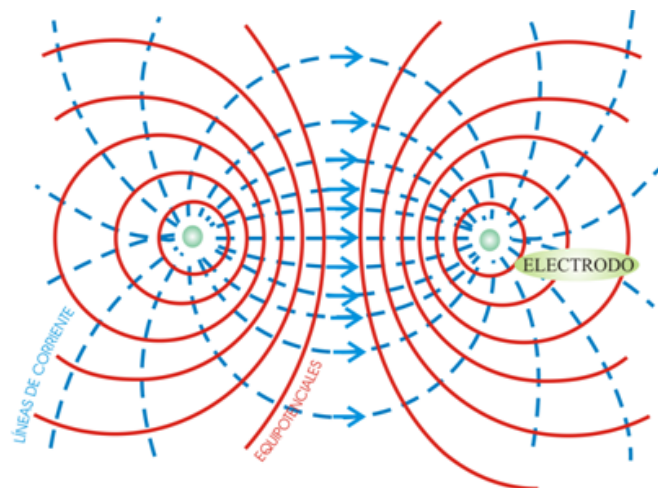


Ilustración 13: Líneas de corriente y equipotenciales en una vista en planta, generadas por dos electrodos de corriente conectados en superficie.

1.5. Prospección Geoeléctrica 1 D – El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Sondeos Dipolares

Un sondeo eléctrico vertical (SEV) consiste en registrar, desde la superficie, la variación de la resistividad aparente en profundidad, a medida que los electrodos situados sobre una recta, se alejan del centro O del dispositivo, en forma progresiva y regular, a intervalos de escala logarítmica (Modelo 1D). Con las mediciones obtenidas, se puede establecer la curva de variaciones de resistividad aparente, en función de la distancia entre el electrodo y el centro del sistema. Como a medida que la separación entre los electrodos aumenta, en general también se incrementa la profundidad de investigación (esto no es estrictamente cierto), las resistividades aparentes serán representativas de espesores cada vez mayores de rocas por las que circula la corriente.

Los pares de valores resistividad aparente/distancia OA se vuelcan a un gráfico bilogarítmico y dan como resultado una "curva de campo", que posteriormente se interpreta por métodos cualitativos, cuantitativos manuales y por computadora. Los resultados de esta interpretación permiten distinguir capas a partir de sus resistividades verdaderas diferentes, así como también determinar sus espesores. Estos resultados son representativos para el punto central de medición (O) y su proyección en profundidad. La interpretación con especificaciones de resistividades y espesores de cada capa identificada en el subsuelo recibe el nombre de corte geoelectrico (Modelo 1D).

También se incluyen dentro de esta metodología a los Sondeos Dipolares (SD), en los cuales la separación entre electrodos de corriente (AB) y de potencial (MN); que se desplazan independientemente, son pequeños en comparación con la distancia R que los separa. Su posición mutua puede ser cualquiera, aunque, en la práctica se emplean las configuraciones básicas que se tratarán más adelante. Los SD surgieron como consecuencia de las dificultades que presentaba la ejecución de SEV profundos, por causa de la gran longitud de las líneas AB exigidas (Orellana, 1982). Este inconveniente queda eliminado en los SD, porque en ellos basta una línea corta para cada uno de los dipolos sin que estos queden unidos por ningún cable. Otras ventajas que poseen, es la posibilidad de su empleo en modalidad bilateral (al igual que los dispositivos Semi-Schlumberger) y el mayor poder resolutivo que presentan algunos SD si se comparan con los SEV.

La correlación de SEV contiguos, permite elaborar perfiles geoelectricos, interpretando las variaciones de las resistividades y espesores del subsuelo en forma lateral.

1. Resistividad Verdadera y Resistividad Aparente

Hasta el momento se ha visto la medición de la resistividad en un medio homogéneo e Isótropo, circunstancia que en la naturaleza pocas veces se encuentra. En la mayor parte de los casos, los materiales de la corteza terrestre se disponen en capas horizontales, cuyas propiedades, incluida la resistividad, varían considerablemente. Si en el circuito de emisión - recepción están involucradas dos capas o más, la resistividad que se medirá en superficie será un promedio entre las resistividades de los materiales por los que pasa la corriente. A esta resistividad medida se la denomina resistividad aparente.

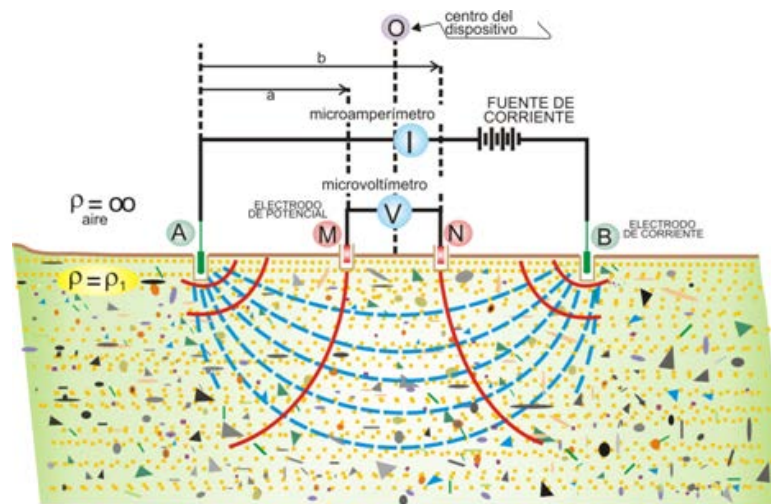


Ilustración 14: Medición de la resistividad aparente en un terreno compuesto por dos capas horizontales de resistividad diferente.

2. Dispositivos Electródicos

La manera de disponer los electrodos por los que se introduce la corriente y aquellos con los que se registra el potencial en la superficie de un medio cuya resistividad se desea investigar, da lugar a diferentes dispositivos o arreglos electródicos. La importancia de estos dispositivos es que sus formulaciones matemáticas condicionan el trabajo en campaña, permitiendo mayor o menor agilidad en el desarrollo de las operaciones o posibilitando la medición en lugares que poseen condicionamientos naturales.

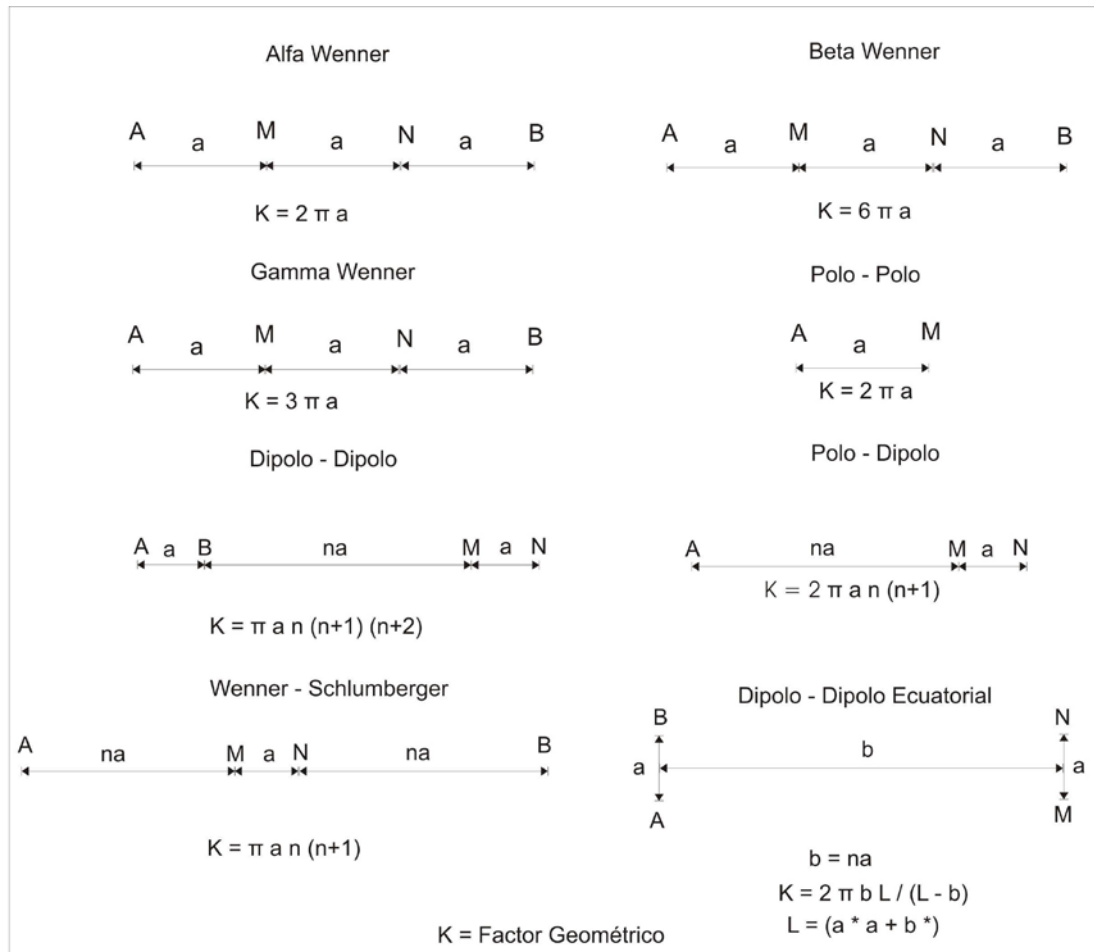


Ilustración 15: Distintos dispositivos electródicos.

Los diferentes tipos de dispositivos empleados en el método geoelectrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. Al momento de seleccionar dispositivos geoelectricos, son muchos los factores que hay que tener en cuenta. De acuerdo con Ward (1990), se debe considerar lo siguiente:

Tabla 2: Factores que influyen en la selección de los dispositivos.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS				
DISPOSITIVO	Intensidad de la Señal de Respuesta	Resolución	Sensibilidad frente Heterogeneidades del Terreno	Ruido de Acoplamiento Electromagnético
Wenner	A	A	C	C
Schlumberger	B	A	C	B
Dipolo-Dipolo	C	B	A	A

Además de los dispositivos lineales, existe una enorme variedad de otros dispositivos, entre ellos los arreglos dipolares, donde el par de corriente y el par de potencial se mueven separadamente según distintas geometrías, de acuerdo a la estrategia prospectiva definida (Orellana, 1982 y Astier 1975). En esta disposición, AB y MN se ubican mucho más cerca de la distancia que los separa entre sí.

Otras veces uno de los electrodos de corriente permanece fijo y muy alejado de los otros tres (se asume que en el infinito) y se denomina a estos dispositivos trielectródicos (García Maurizzio, 2013 y Orellana, 1982); aunque en rigor siguen siendo cuatro, o bien polo-dipolo (como si se olvidase del polo que se deja en el infinito). También están los llamados polo-polo, donde además de uno de los electrodos de corriente, hay uno de potencial también en el infinito. En la práctica, las configuraciones más frecuentes son la ecuatorial y la axil.

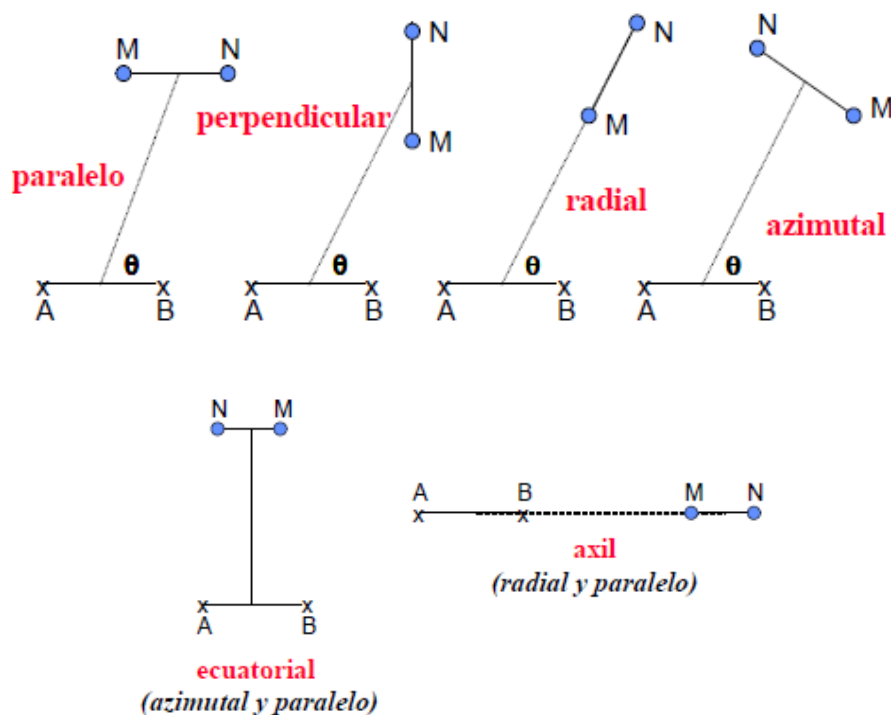


Gráfico 1: Dispositivos dipolares (Orellana, 1984).

❖ Dispositivo Wenner

Es un dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico, en el que las distancias MN, AM y NB son iguales, es decir que se mantienen constantes durante las mediciones.

$$MN = AM = NB$$



Ilustración 16: Dispositivo electródico Wenner (visto en planta).

Cada vez que se amplía la distancia AB, se debe modificar la distancia MN, por lo que su utilización en el campo es trabajosa.

❖ Dispositivo Schlumberger

Es también un dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico. Debe cumplir con la siguiente condición:

$$MN < a = AB/5$$

Ejemplo: $MN = 2$ metros, $AB = 20$ metros

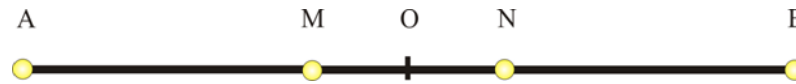


Ilustración 17: Dispositivo electródico Schlumberger (visto en planta).

El dispositivo Schlumberger tiene la ventaja que para una misma posición de los electrodos M y N, los electrodos A y B pueden disponerse a cualquier distancia que respete la condición mencionada. Esto acelera el trabajo en campaña ya que ahorra gran cantidad de operaciones.

❖ Dispositivo Semi - Schlumberger

Consiste en ubicar un electrodo de corriente (B) en posición fija e inamovible y a 90° respecto a la línea AMN y de esta forma anular la diferencia de potencial del electrodo B con respecto de MN, por lo tanto el electrodo de corriente A es el único que se desplaza.

Este tipo de dispositivo se emplea en aquellos lugares donde existen problemas para tender los cables en forma simétrica, o donde los condicionamientos geológicos lo impiden.

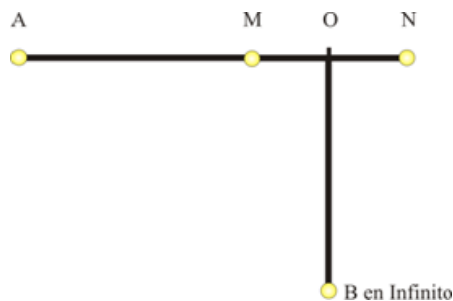


Ilustración 18: Dispositivo electródico Semi - Schlumberger (visto en planta).

❖ Dispositivo Dipolo - Dipolo

Estos dispositivos se caracterizan porque los electrodos de corriente AB están lo suficientemente próximos entre sí respecto a la distancia en la que se miden sus efectos para que puedan considerarse como un dipolo. Existen dos dipolos, el AB de emisión y el MN de recepción, cuya posición mutua puede ser en principio cualquiera. Cada par de electrodos tiene el mismo espaciamiento. Este arreglo presenta buenos resultados en dirección horizontal, ya que es sensible a variaciones laterales de resistividad pero no en la vertical; aunque Reynolds (1997) estima que este dispositivo presenta la mayor profundidad de penetración e investigación.

La configuración utilizada en este trabajo es la axil. De acuerdo con los geofísicos rusos, para que AB y MN puedan considerarse realmente dipolos se debe cumplir que:

$$AB < a = 0,2R \text{ y } MN < a = 0,2R$$

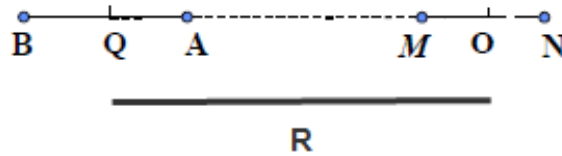


Ilustración 19: Dispositivo dipolar axil visto en planta. Modificado de Loke, 2004.

Para el dispositivo axil, la constante viene dada por la ecuación:

$$K = \frac{\pi R^3}{ABMN}$$

El problema que presentan, radica en que el campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y de potencial, por lo que se necesita intensidades de corrientes mucho mayores que los dispositivos lineales. Se los utiliza en investigaciones geoelectricas profundas, ya que los circuitos de potencial y de corriente son independientes.

Además suelen medirse SD bilaterales (modalidad que también es utilizada en los dispositivos Semi-Schlumberger), cuyo ejemplo para la disposición axil se muestra en el gráfico siguiente. Son de gran utilidad para detectar buzamientos de estratos resistivos.

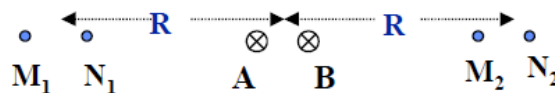


Ilustración 20: Sondeo Dipolar Axil bilateral visto en planta.

3. Constante Geométrica

En todos los dispositivos el cálculo de la resistividad se efectúa con la fórmula ya conocida, lo único que varía en cada uno de ellos es una constante que depende de la geometría de la disposición electródica. Las técnicas de medición se basan en ampliar los circuitos de emisión recepción, aumentando progresiva y regularmente la distancia entre los electrodos, con lo que se logra una profundidad de investigación cada vez mayor. Cada vez que se modifica la distancia entre los electrodos, debe utilizarse una constante geométrica diferente; las distancias electródicas y las constantes están estandarizadas y tabuladas.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{S}{L}$$

$$K = \frac{S}{L}$$

Donde K es la constante geométrica.

Si se analiza la disposición electródica tetrapolar Schlumberger, se observa que el potencial en un punto M es:

$$V_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right]$$

y el potencial en el punto N es:

$$V_N = \frac{\rho \cdot I}{2 \pi} \left[\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right]$$

mientras que la diferencia de potencial entre dos puntos M y N será:

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{2 \pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} - \frac{1}{b} + \frac{1}{a} \right]$$

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{2 \pi} \left[\frac{2}{a} - \frac{2}{b} \right]$$

simplificando:

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right]$$

operando, queda:

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \left[\frac{b - a}{a \cdot b} \right]$$

En el dispositivo Schlumberger

(a) será igual a OA – OM

(b) será igual a OA + OM

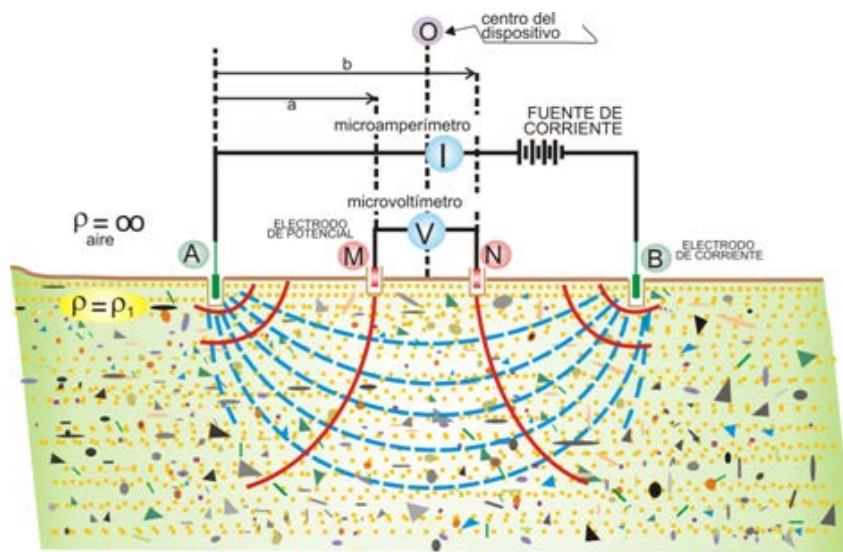


Ilustración 21: Dispositivo electródico Schlumberger y cálculo de constante geométrica.

Esta última expresión permite escribir:

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \left[\frac{(OA + OM) - (OA - OM)}{(OA - OM) \cdot (OA + OM)} \right]$$

Si se efectúa la operación matemática correspondiente queda:

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \left[\frac{OA + OM - OA + OM}{OA^2 + OA \cdot OM - OA \cdot OM - OM^2} \right]$$

$$V_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{\pi} \left[\frac{OM + OM}{OA^2 - OM^2} \right]$$

Si se despeja la resistividad y se reemplaza 2 OM por MN se obtiene:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} \cdot \frac{\pi}{MN} (OA^2 - OM^2)$$

Luego:

$$K = \frac{\pi}{MN} \cdot (OA^2 - OM^2)$$

Finalmente:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} \cdot K$$

4. Limitaciones del Método

✓ Limitaciones para la ejecución

1. Las capas a investigar deben tener propiedades eléctricas homogéneas e isotropas.
2. La extensión lateral debe ser mucho mayor que las dimensiones del dispositivo electródico.
3. Los contactos entre las capas deben ser horizontales o casi horizontales.

✓ Limitaciones en la interpretación

1. Debe existir un contraste significativo y detectable entre las capas que constituyen el suelo.
2. La correlación entre los valores de resistividad y la constitución geológica depende de gran cantidad de variables, que es necesario interpretar en cada caso en particular.

5. Realización de Sondeos Eléctricos Verticales

1. Planificación de tareas de campaña

Para minimizar las limitaciones del método y para obtener el máximo beneficio de una campaña de prospección geoelectrica, se deben tener en cuenta las siguientes premisas:

- 1.1. Selección del área a prospectar

Como paso previo e imprescindible, debe contarse con un estudio preliminar, en el que se hayan inventariado todos los datos relevantes respecto a clima, vegetación, hidrografía, geología en detalle, geomorfología, etc., en base a los cuales se puedan detectar los blancos de información a cubrir y elaborar las hipótesis de trabajo, especialmente:

- ✓ El tipo de basamento.
- ✓ La ubicación de probables acuíferos y sus zonas de recarga, conducción y descarga.
- ✓ Mineralizaciones.
- ✓ Fallas, Paleocauces, etc.

La falta de estas investigaciones previas imposibilita la interpretación de la prospección geoeléctrica, ya que como se observó, el mismo valor de resistividad puede corresponder a un sedimento grueso saturado o a uno de menor granometría seco. La localización y orientación de los SEV debe seguir criterios geológicos tendientes a que las características geométricas de los terrenos a investigar, se ajusten lo más posible a las condiciones de contorno exigidas. Se debe tener en cuenta tanto el estilo estructural como las geoformas presentes en la zona problema; como por ejemplo: abanico aluvial, terraza aluvial, valles intermontanos con basamentos diferentes a ambos lados.

1.2. Mediciones de apoyo

Se realizan por medio de sondeos eléctricos denominados patrones y paramétricos. Los primeros son sondeos eléctricos verticales ejecutados a escasos metros de algún pozo del cual se conoce su descripción litológica o por lo menos sus niveles acuíferos, con la finalidad de comparar luego el corte geoeléctrico obtenido, con la información del pozo. Esto permite obtener resistividades de las capas del subsuelo y del o los acuíferos captados por la perforación. Los sondeos paramétricos son sondeos eléctricos verticales realizados sobre unidades aflorantes, a los fines de tener una medida de su resistividad y luego observar, si en otra posición, se identifica esas unidades en el subsuelo.

1.3. Ubicación de los SEV

Debe hacerse una exploración preliminar, mediante un reticulado amplio abarcando toda el área de investigación, para obtener un panorama general. Esta primera diagramación permite establecer la distancia entre SEV consecutivos, longitud de OA y orientación de sus alas.

1.4. Densidad

La densidad de SEV (distancia entre centros de SEV), dependerá del carácter de la investigación (sí es de reconocimiento o de detalle) y de los condicionamientos geológicos de la zona. Se puede lograr el máximo distanciamiento de SEV, siempre y cuando exista entre ellos una correlación segura.

1.5. Longitud

La longitud final de OA es muy difícil de establecer, sobre todo cuando la zona no se conoce por ello es conveniente realizar un sondeo lo suficientemente largo y ubicado en un lugar estratégico, con la finalidad de tener una visión más clara de la longitud a alcanzar por los restantes SEV. Las longitudes normales de los sondeos oscilan entre los 100 y los 1000 metros de longitud de OA.

1.6. Orientación

La orientación de los SEV, es muy importante y dependerá del entorno geológico en donde se ejecutan, así por ejemplo, si se trabaja en un área donde existen afloramientos o subafloramientos su orientación debe ser paralela al rumbo de las estructuras. Si se trabaja sobre un cono aluvial, la orientación dependerá, de que si se quiere o no identificar variaciones laterales de facies.

1.7. Dispositivo a emplear

La elección del método se hace teniendo en cuenta, las características del entorno geológico y del dispositivo que más se ajuste a esas condiciones.

6. Operación de campo para la ejecución de SEV

1.1. Equipamiento básico

Un equipo de prospección eléctrica en corriente continua se trata, en esencia, de dos módulos; un microamperímetro y un microvoltímetro, que pueden registrar centésimas de miliamperios el primero y centésimas de milivoltios el segundo. Ambos poseen filtros, que permiten estabilizar las lecturas, eliminando los "ruidos", es decir señales que no corresponden al estímulo de corriente inducida. A su vez, el módulo de potencial posee un compensador del potencial natural del terreno. Esta compensación se efectúa algunos equipos en forma manual, antes de conectar la fuente de corriente al circuito, se mide el potencial natural y mediante este dispositivo se lo anula, aplicando una corriente provista por el equipo, de igual magnitud y signo contrario.



Foto 1: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (1970 – 1980).

En equipos más modernos, un microprocesador se encarga de efectuar la autocorrección de los potenciales naturales, basado en el mismo principio de enviar una corriente de intensidad similar pero de signo contrario. En estos casos, se puede observar en forma constante en el display del aparato, los valores de autopotencial y efectuar correcciones si es necesario.

También es posible determinar y medir la resistencia de contacto de cada electrodo antes de iniciar la inyección de corriente, valor que puede ser visualizado en tiempo real en el equipo para efectuar correcciones y mejorar el contacto electrodo – suelo.

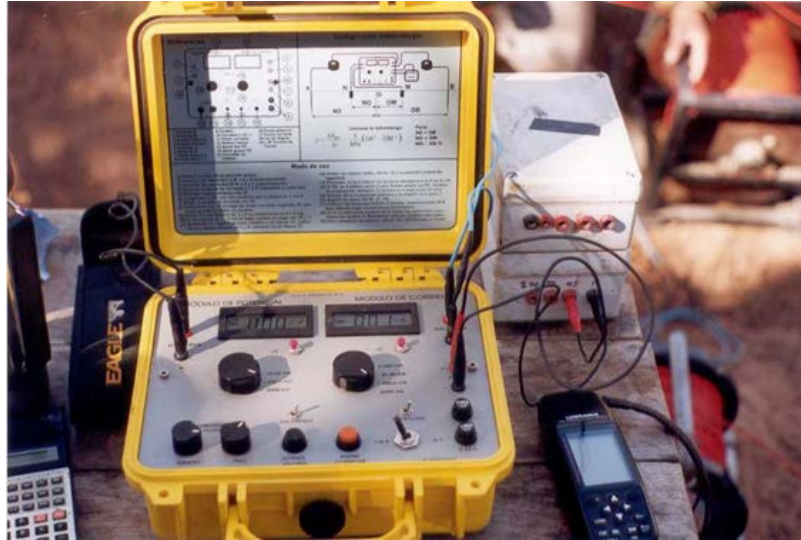


Foto 2: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (1990).



Foto 3: Equipo de prospección eléctrica en corriente continua (2010).

1.2. Electrodo

Se utilizan electrodos de corriente (AB) de acero inoxidable de 60 a 80 cm de longitud y de unos 15 mm de diámetro, que se clavan mediante mazas en la superficie. Para disminuir la resistencia de contacto entre el electrodo y el terreno, se utiliza una salmuera, con la que se satura el entorno del electrodo.

Los electrodos de potencial son de cobre, y están insertos en vasos con base porosa, que contienen un conductor electrolítico: una solución saturada de sulfato de cobre. Este tipo de electrodos impide el fenómeno de la polarización, que produce "ruidos" debido a los potenciales que se generan en conductores metálicos en contacto con el suelo. El paso de la corriente se produce a través de la base porosa, que absorbe solución de sulfato de cobre y se convierte en conductora. Los electrodos se entierran en el suelo a 10 cm de profundidad, saturando con agua dulce el entorno del electrodo.

1.3. Cables

Normalmente se utilizan cables de cobre aislado, de un 2 mm de sección, que poseen marcas de colores identificando las distancias estandarizadas a las que se clavan los electrodos y se efectúan las mediciones. El equipo se completa con mazas de 1 a 2 kg., picos, palas, cintas métricas, material de gabinete, etc.

1.4. Separación de electrodos AB y MN

Para los electrodos AB se debe tener en cuenta que al graficar en papel bilogarítmico (OA en las abscisas) la distancia oscile en los 10 mm entre punto y punto. Para la metodología Schlumberger, normalmente se emplea las siguientes aberturas de OA en metros: 1.0, 1.3, 1.6, 2.0, 2.5, 4.0, 5.0, 6.5, 8.0, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 65, 80, 100, 130, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 650, 800, 1000, etc. En cuanto a la abertura de MN se deberá tener en cuenta los requisitos que tiene el método. Se suele utilizar, en metros: 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10, 20, 50, 100 y 200.

Tabla 3: Modelo de planilla para SEV.

OA	MN	K	ΔV	I	pa	Observaciones
2.0	1	11.8	80	29	32.5	45 Volts.
2.5	1	18.8	75	33	42.7	
3.2	1	31.4	60	40	47.1	
4.0	1	49.5	56	56	49.5	
5.0	1	77.8	45	65	53.8	
6.5	1	131.9	32	88	47.9	

Los gráficos se irán confeccionando en el campo, en papel bilogarítmico: la ordenada corresponde a los valores de resistividad aparente y en las abscisas las distancias OA. De este graficado, resulta la curva geoeléctrica de campo.

1.5. Empalme

Cuando se trabaja con el dispositivo Schlumberger, sucede frecuentemente en un SEV que la abertura MN resulta ser demasiado pequeña con respecto a la abertura AB, esto se ve reflejado en la lectura de diferencia de potencial que baja hasta rangos muy pequeños como para tener confianza en el valor.

Antes esa situación se debe efectuar un empalme, que consiste en dar una mayor separación a los electrodos de potencial MN, a los fines de aumentar el valor de lectura de diferencia de potencial.

En la curva de campo es visible cada empalme por la discontinuidad de la misma y también por los “saltos” producidos en la misma abertura de OA pero de distinto MN, aunque cuando se trata de un terreno homogéneo los empalmes pueden no mostrar estos “saltos”.

Como ejemplo se puede decir que si la abertura de MN es igual a 1 metro y la lectura de diferencia de potencial es de 1 mv, es necesario efectuar un empalme llevando MN = 5 metros, manteniendo OA en la misma posición, la lectura de diferencia de potencial aumentará aproximadamente unas cinco veces.

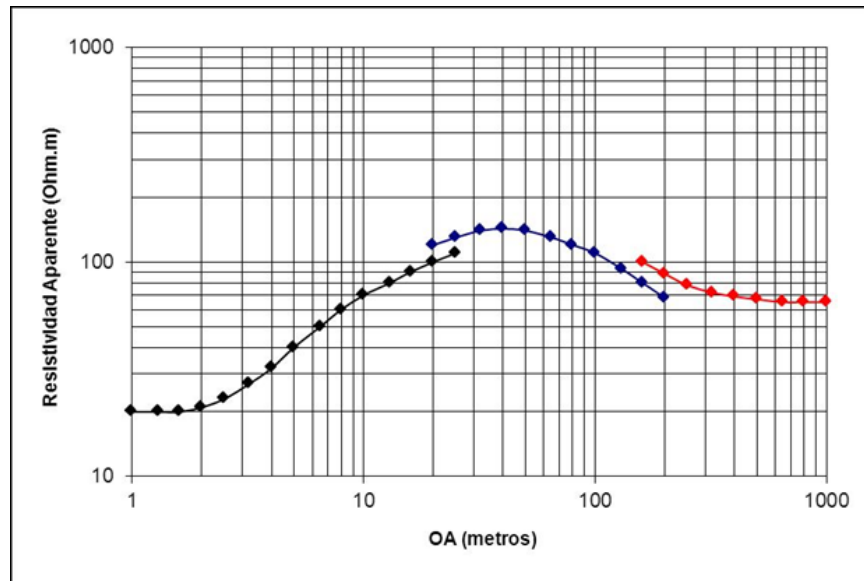


Gráfico 2: Curva de resistividad aparente con empalmes (método Schlumberger).

En el método Wenner, estos saltos o empalmes no aparecen ya que los electrodos MN se mueven al mismo tiempo que los electrodos de corriente AB, por lo que la representación de los datos de resistividad aparente en un gráfico bilogarítmico presentan una curva continua. Por esta razón, se representan los datos de resistividad aparente versus a y no versus OA o $AB/2$, como en el método Schlumberger.

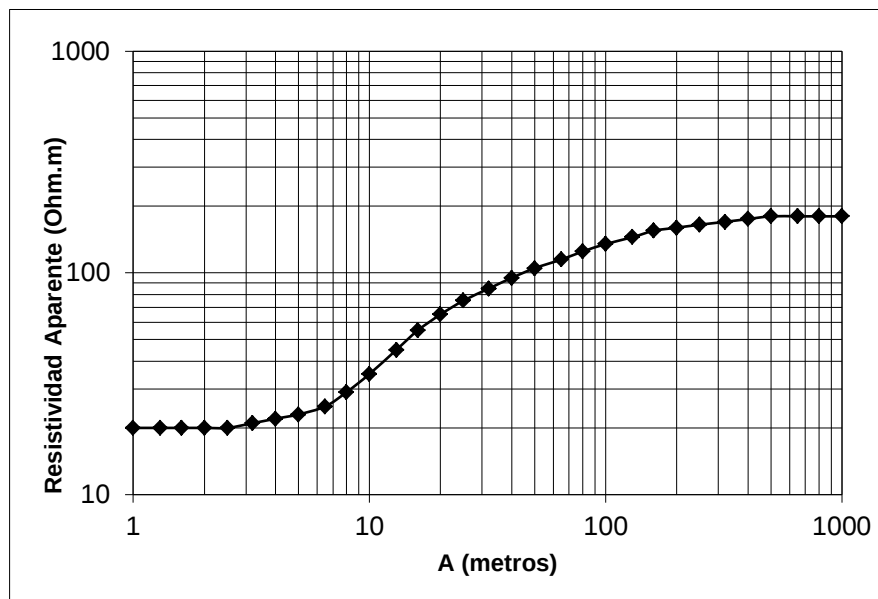


Gráfico 3: Curva de resistividad aparente (método Wenner).

7. Curvas de SEV

Resultan de graficar en un papel bilogarítmico, las resistividades aparentes en las ordenadas y las distancias de OA o AB/2 correspondientes en las abscisas. Las curvas pueden ser:

❖ *Curva de una capa*

Cuando el medio es homogéneo e isótropo y con un espesor suficientemente grande como para considerarlo infinito, la resistividad aparente permanece constante a lo largo de toda la serie de mediciones y la resistividad aparente es igual a la verdadera.

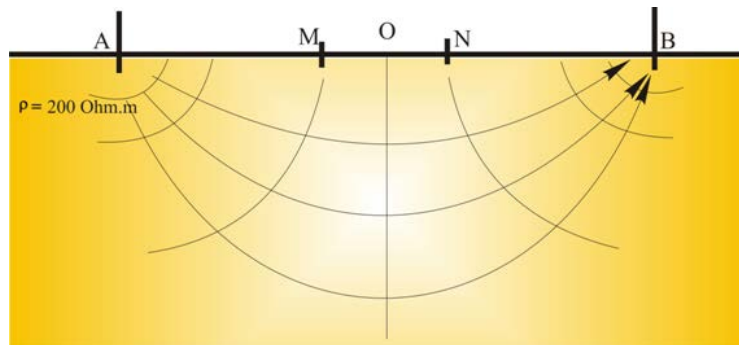


Ilustración 22: Sondeo eléctrico en una capa de espesor infinito, homogéneo e isótropo.

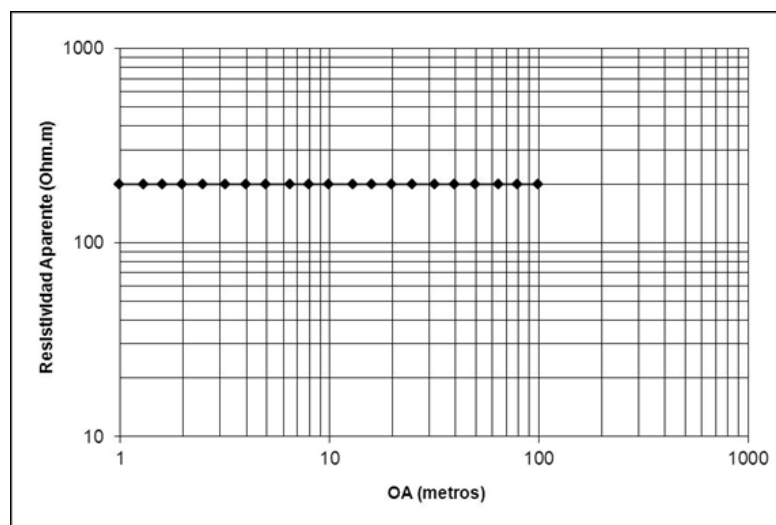


Gráfico 4: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de una capa.

❖ **Curvas de dos capas**

Cuando el subsuelo está conformado por dos materiales de resistividades diferentes y el límite entre ambos es un plano paralelo a la superficie, la curva de resistividades aparentes comienza con un valor igual al de la resistividad verdadera del primer estrato, siempre que tenga un espesor suficiente para no estar influenciada por la capa infrayacente. A medida que se separan los electrodos de corriente y el circuito involucra espesores crecientes de subsuelo, las líneas de corriente comienzan a circular por el estrato inferior de menor o mayor resistividad que el suprayacente. En los puntos del terreno en el que el circuito involucre a ambos estratos, la resistividad aparente será un promedio entre las resistividades verdaderas. A medida que la separación entre los electrodos A y B siga aumentando, la proporción de espesor de la capa inferior será mayor, por lo tanto la resistividad aparente se irá aproximando más al valor de la resistividad verdadera de la capa infrayacente. Por último, si la distancia entre los electrodos es lo suficientemente grande, el espesor de la primera capa puede considerarse despreciable y, la curva de resistividades aparentes se hará asintótica respecto al valor de la resistividad real de la capa infrayacente.

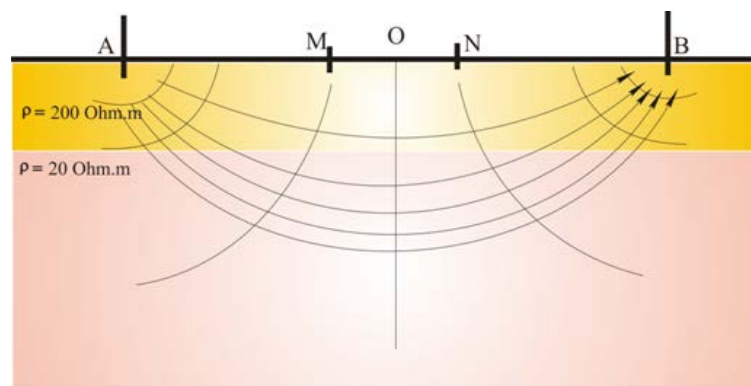


Ilustración 23: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de dos capas; una superior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E_1 y, una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.

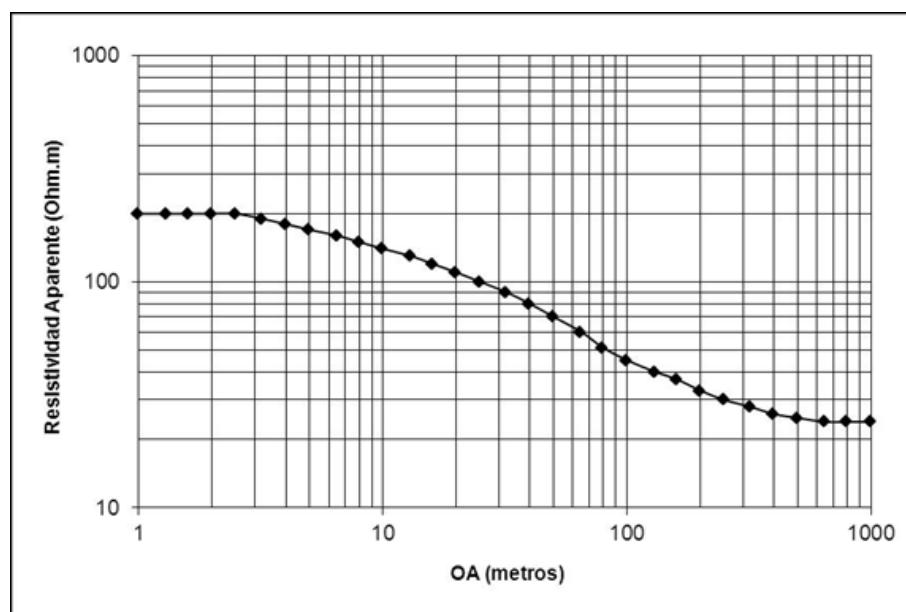


Gráfico 5: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de dos capas.

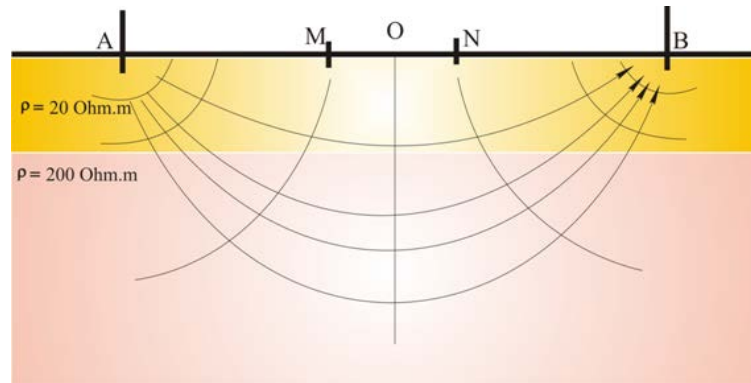


Ilustración 24: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de dos capas; una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E_1 y, una inferior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor infinito.

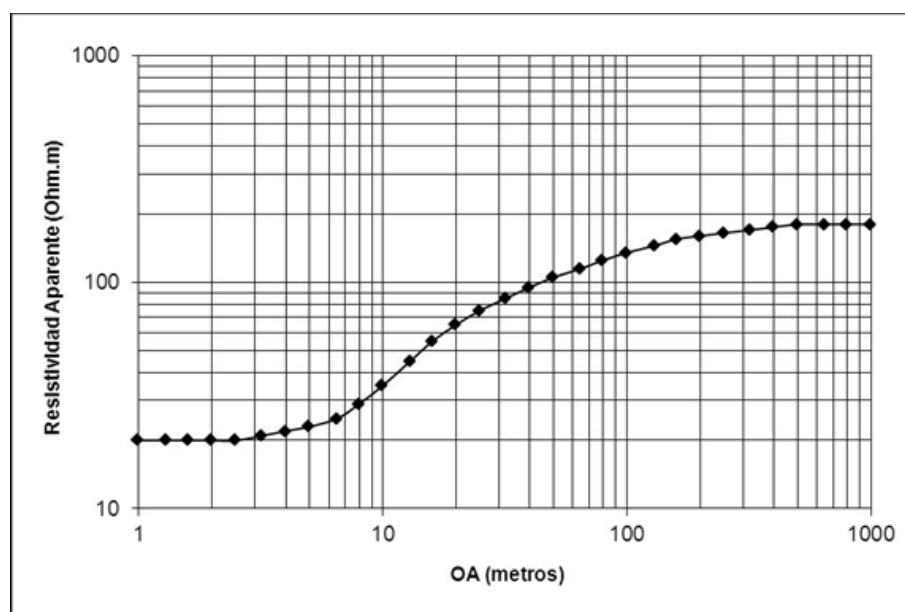


Gráfico 6: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de dos capas.

❖ Curvas de tres capas (H, K, Q y A)

Cuando el subsuelo está conformado por tres materiales de resistividades diferentes y el límite entre ellos es un plano paralelo a la superficie, la curva de resistividades aparentes comienza con un valor igual al de la resistividad verdadera del primer estrato, siempre que tenga un espesor suficiente para no estar influenciada por la capa infrayacente. A medida que se separan los electrodos de corriente y el circuito involucra espesores crecientes de subsuelo, las líneas de corriente comienzan a circular por el estrato inferior de menor o mayor resistividad que el suprayacente y el resultado es que el valor de esta capa se encuentra influenciado por la presencia del horizonte superior. Si se continúa abriendo los electrodos, las líneas de corriente también comienzan a circular por el estrato inferior (que presenta un espesor suficientemente grande) y el valor de resistividad resultante de esta capa está influenciado por la primera y segunda.

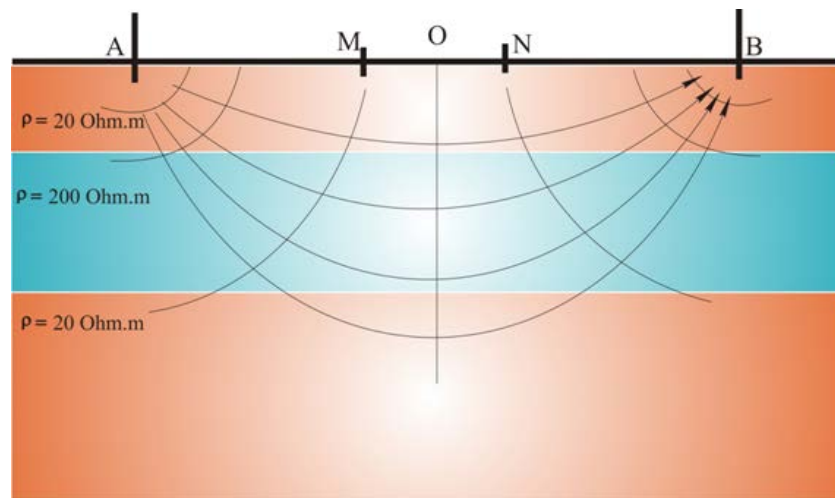


Ilustración 25: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo K); una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E_1 , una intermedia resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E_2 y una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.

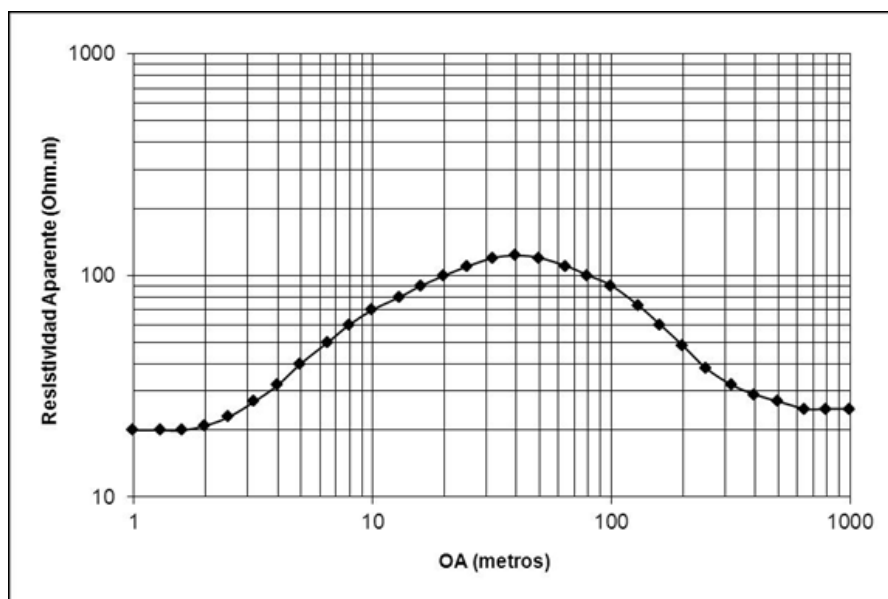


Gráfico 7: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo K.

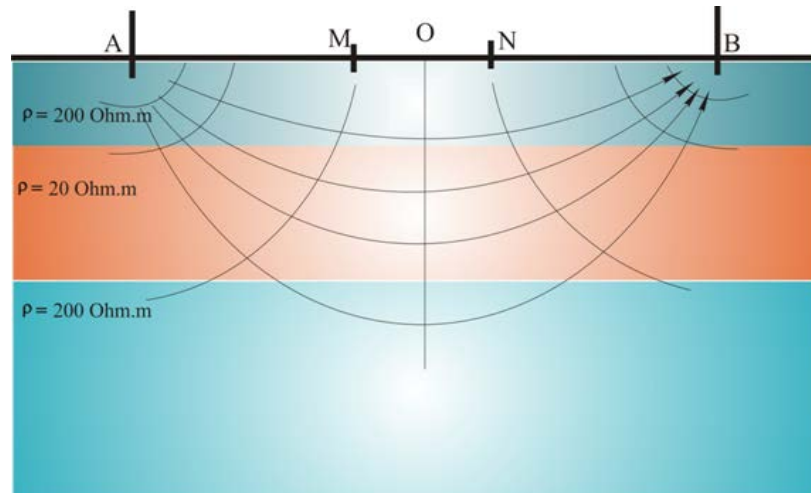


Ilustración 26: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo H); una superior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor E_1 , una intermedia conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E_2 y una inferior resistiva (200 Ohm.m) y de espesor infinito.

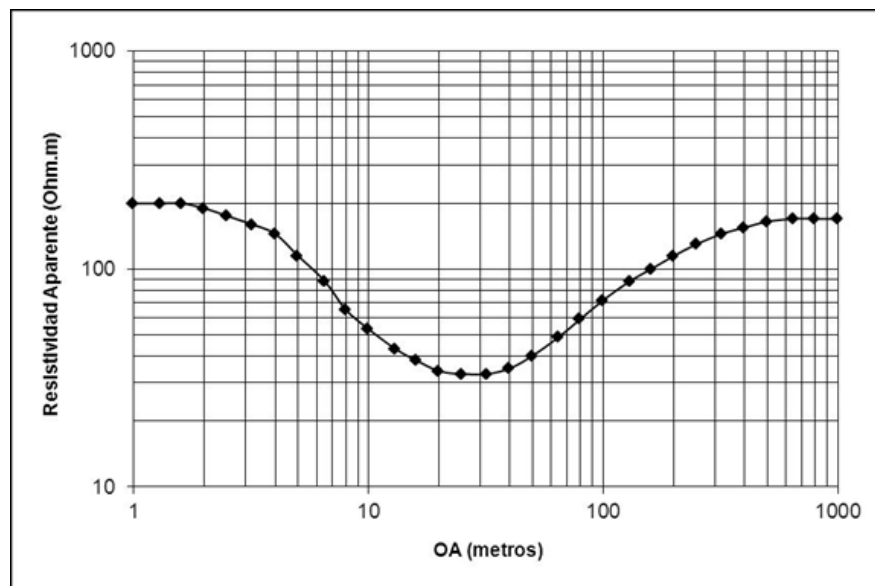


Ilustración 27: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo H.

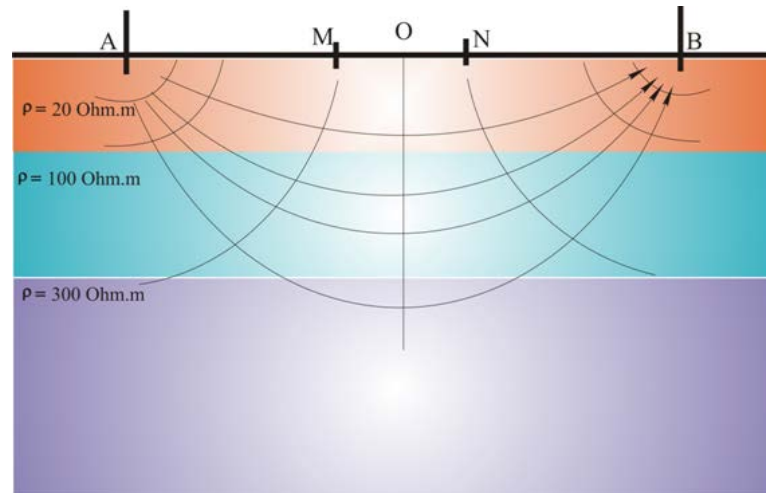


Ilustración 28: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo A); una superior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor E_1 , una intermedia medianamente resistiva (100 Ohm.m) y de espesor E_2 y una inferior resistiva (300 Ohm.m) y de espesor infinito.

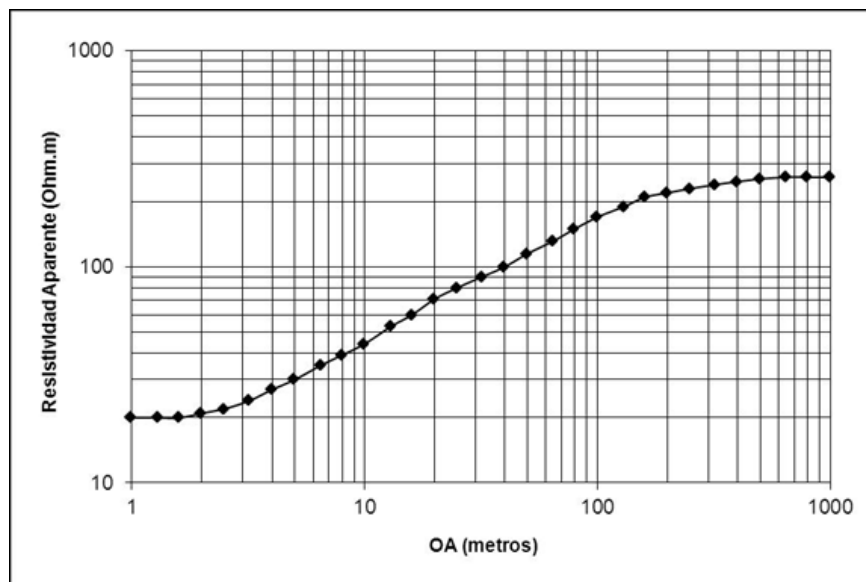


Gráfico 8: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo A.

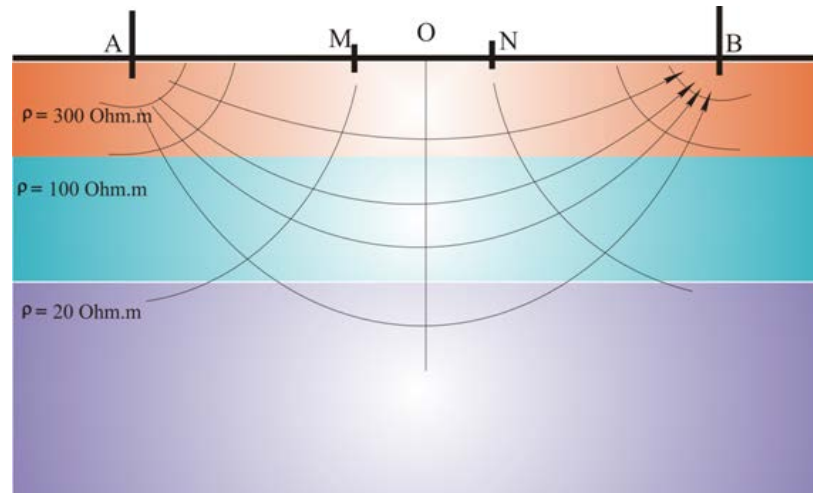


Ilustración 29: Sondeo eléctrico mostrando la sucesión de tres capas (curva tipo Q); una superior resistiva (300 Ohm.m) y de espesor E1, una intermedia medianamente resistiva (100 Ohm.m) y de espesor E2 y una inferior conductiva (20 Ohm.m) y de espesor infinito.

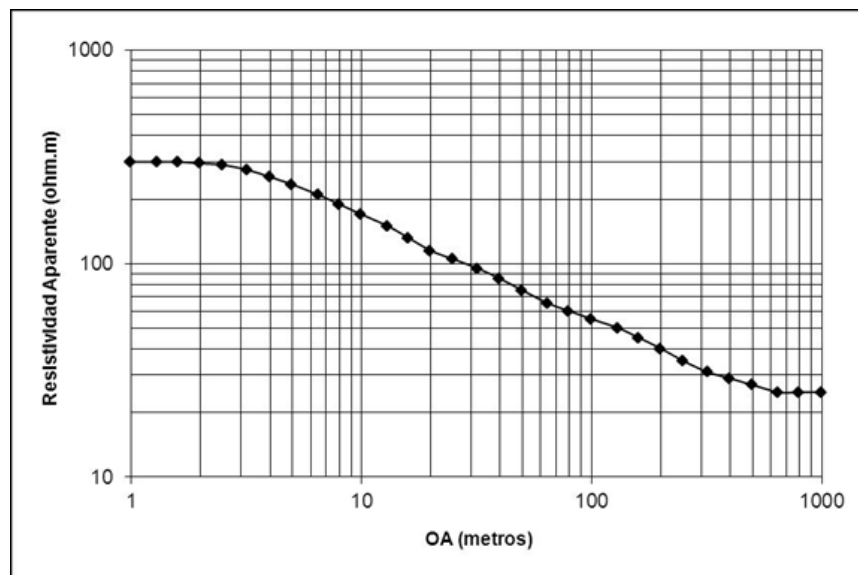


Gráfico 9: Representación bilogarítmica, mostrando una curva de tres capas, tipo Q.

- ✓ Curvas de cuatro capas: Pueden ser; **QQ, AA, HK, KH, HA, KQ, AK, QH** (ocho combinaciones posibles).
- ✓ Curvas de cinco capas: Pueden ser; **HKH, KHK, QQQ, AAA,** (dieciséis combinaciones posibles).

8. Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales

La interpretación de un sondeo eléctrico, consiste en que, partiendo del diagrama de variación de las resistividades aparentes, en función de la separación $AB/2$, se llega a conocer las **resistividades verdaderas y espesores** de los distintos estratos involucrados. Existen diferentes procedimientos interpretativos que han sido desarrollados para los SEV. La mayoría de estos métodos son empíricos. El método de superposición tiene una base teórica física con supuestos claramente definidos.

Uno de los métodos más usados es el de superposición ábaco - curva de campo, y cuenta con los ábacos patrones de Orellana - Mooney (in Orellana, 1982) que se complementan con los gráficos auxiliares de Ebbert - Kalenov (in Orellana, 1982), todos ellos impresos en módulo bilogarítmico de 62,5 mm. Para establecer los valores verdaderos de resistividad y sucesión de espesores, se deben seguir los siguientes pasos:

1) La curva de campo dibujada sobre papel bilogarítmico del mismo módulo que la de los ábacos, se debe transformar en una curva llamada de gabinete, eliminando los empalmes (llevando los distintos tramos a un mismo MN).

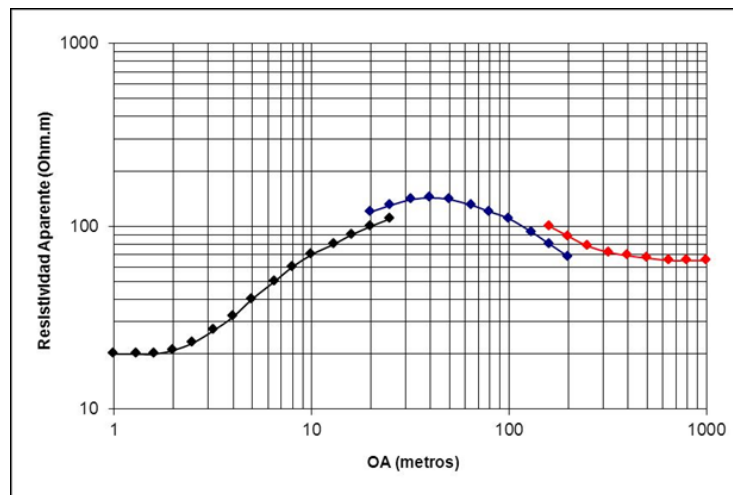


Gráfico 10: Curva de campo con valores de resistividad aparente obtenidos con el método Schlumberger (con empalmes).

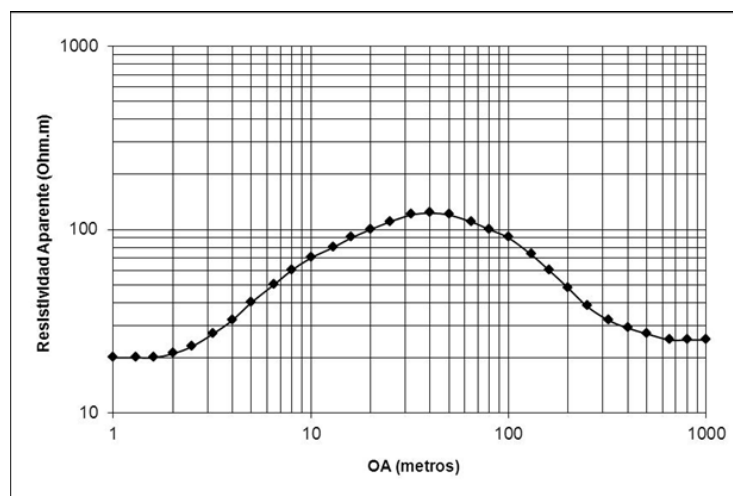


Gráfico 11: Curva de gabinete con valores de resistividad aparente (empalmada).

2) El papel transparente que contiene la curva dibujada se superpone a la lámina de curvas patrones (ábacos). La superposición debe hacerse desplazando un papel respecto al otro, manteniendo el paralelismo entre los ejes del transparente y los del ábaco, hasta que se encuentra coincidencia total o parcial de curvas. Logrado este paso, se marca con una cruz la intersección de los ejes del ábaco y las señales numeradas que aparecen sobre el eje vertical (llamadas marcas de resistividad) y que corresponden a las resistividades verdaderas de las capas.

3) El paso siguiente se realiza con una planilla de cálculos donde se deberá anotar:

- a) N° de SEV.
- b) Tipo de curva de superposición y relaciones de resistividad.
- c) Relaciones de espesores.

4) A continuación el transparente se superpone luego al papel bilogarítmico donde se encuentra graficada la curva de campo, para obtener los valores de resistividad y espesor que corresponden a la primera cruz. En este único caso, el valor de la cruz entrega directamente los valores de resistividad y espesor de la primera capa. La resistividad de la segunda capa se debe calcular multiplicando el valor de resistividad de la primera capa por la relación segunda de resistividad de la curva superpuesta. Luego, se puede calcular el valor tentativo de la tercera capa multiplicando el valor de resistividad de la primera capa por la tercera relación de resistividad de la curva superpuesta. En cuanto al espesor, ya se conoce el espesor de la primera capa y se debe calcular el tentativo de la segunda capa, multiplicando el valor del espesor de la primera capa por la relación de espesores que le corresponde a la curva de superposición. Lo expuesto hasta aquí, es lo que se hace para interpretar una curva de dos capas o de tres cuando hay coincidencia total en la superposición, caso contrario, sirve para interpretar el primer tramo de una curva de tres o más capas.

5) Para interpretar el segundo tramo de la curva se combinan los ábacos patrones con los gráficos auxiliares de Ebbert – Kalenov (in Orellana, 1982); estos últimos permiten dibujar el camino, por donde debe desplazarse el transparente para lograr la coincidencia en el segundo tramo.

6) Desplazando el camino auxiliar del transparente por la intersección del eje de coordenadas de los ábacos (manteniendo siempre el paralelismo con los ejes cartesianos) se busca por superposición, la coincidencia del segundo tramo de la curva y una vez lograda se marca la segunda cruz y a partir de allí se procede de la misma forma que lo enunciado anteriormente.

Programas de computación: Actualmente existen numerosos programas de computación que operan en sistema Windows para la interpretación de sondeos eléctricos verticales. Algunos de los programas pueden analizar el problema inverso, es decir, una vez interpretada la curva de campo y obtenidos los valores de resistividad y espesores verdaderos, se alimenta con estos datos y el programa resuelve a aquellos, dibujando la curva de resistividad aparente o curva de campo, que por supuesto, si la interpretación es la correcta, la curva de campo y la curva obtenida por programa deben ser idénticas. Otros programas analizan el problema directo, es decir se cargan los datos de resistividad aparente obtenidos en el campo y se ingresa el número de capas y espesores tentativos hasta que se obtiene una curva similar.

Con suficiente experiencia en interpretación puede obviarse el uso de ábacos y utilizar los programas directamente, ingresando una primera aproximación del modelo geoelectrico, con resistividades y espesores tentativos. El ajuste se realiza luego por aproximaciones sucesivas, hasta lograr una superposición aceptable.

9. Elaboración de Cortes Geoeléctricos y Cortes Geológicos

La interpretación de la curva de resistividades aparentes, con especificaciones de resistividades y espesores verdaderos de cada capa identificada en el subsuelo recibe el nombre de corte geoeléctrico (Modelo 1D).

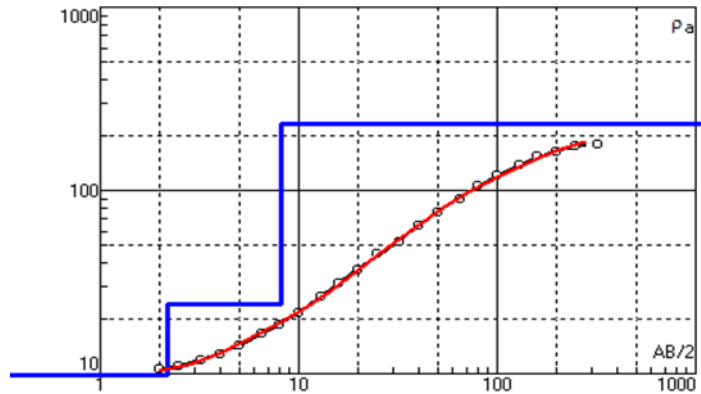


Gráfico 12: Curva de resistividad aparente (curva de campo en puntos), curva interpretada (rojo) y profundidades y resistividades verdaderas que corresponden al modelo (azul).

Corte Geoeléctrico	
10	2.2
24	8.2
229	

El corte geoeléctrico está conformado por una sucesión de tres electrocapas. La primera es conductiva (10 Ohm.m) hasta una profundidad de 2,2 metros. La segunda capa es semiresistiva (24 Ohm.m) hasta los 8,2 metros. La sucesión estudiada culmina con una electrocapa resistiva (229 Ohm.m). El error de ajuste es de 1.23 %.

El corte geológico correspondiente al corte geoeléctrico, es la interpretación y la asignación de una litología a los valores de resistividad verdadera lo que, definitivamente, estará en función del ambiente geológico en donde se realiza la prospección. En el caso anterior, teniendo en cuenta el ambiente geológico donde se realizó el estudio geofísico, el valor de resistividad verdadera de 10 Ohm.m corresponde a una arcilla que conforma el suelo del lugar; el valor de 24 Ohm.m es asignado a una secuencia de arenas arcillosas y los 229 Ohm.m, corresponden a facies de gravas y arenas secas. En este caso, se pudo observar una muy buena correspondencia entre los valores de resistividad verdadera interpretados y las profundidades de cada una de las capas involucradas ya que al lado, existía un pozo con datos de litología y perfiles geofísicos.

10. Aplicaciones en Investigaciones Geológicas

Las posibilidades de utilización de la prospección eléctrica en la exploración geológica dependen principalmente de las propias limitaciones que posee el método con relación a las condiciones del contorno geológico a investigar y en función de las características eléctricas de las capas existentes en el lugar de trabajo.

Este método adquiere su máxima utilidad cuando en un área determinada se ha realizado primeramente, una investigación geológica que permita elaborar hipótesis acerca del problema que requiere una solución. La prospección eléctrica es especialmente útil y eficaz en las fases preliminares de proyectos de distinta índole: hidrogeológicos, mineros, geotécnicos, etc. Entre otros alcances, a través de este método es posible ubicar y dimensionar reservorios de aguas subterráneas, detección y determinación de la profundidad de basamento, el tipo de basamento existente, el espesor de la zona no saturada, la zona saturada, la correlación de acuíferos y otras unidades litológicas, la comparación de densidad de fracturación en rocas cristalinas, presencia de fallas, paleocauces, etc. A continuación se muestran algunos ejemplos en donde la prospección eléctrica fue empleada como una importante herramienta en la exploración geológica.

1. Profundidad de Basamento
2. Identificación de Paleocauces
3. Correlación de unidades eléctricas y presencia de fallas
4. Determinación de Zona No Saturada y Zona Saturada

1.6. Prospección Geoeléctrica 2D y 3D

La Tomografía Eléctrica en dos y tres dimensiones, es una variante del método convencional de Resistividad. Su diferencia con el SEV radica en que los electrodos se disponen a una distancia constante a lo largo de la zona que se desea investigar y su número es mayor. Así, en vez de obtener un valor puntual del espesor de los materiales con la profundidad (SEV) se obtiene tanto la variación del espesor como el cambio de la resistividad de los materiales con la distancia horizontal siendo la profundidad de investigación un tanto menor que en el SEV pero la resolución horizontal es mucho mejor.

La Tomografía Eléctrica es un método de exploración no destructivo que analiza los materiales del subsuelo en función de su resistividad. La resistividad de las rocas como se sabe depende, además de su naturaleza y composición, de factores como la porosidad, la disposición geométrica de los poros, la proporción de poros con agua frente a huecos secos y la resistividad del agua de relleno. Por lo tanto, su textura más o menos alterada o más o menos porosa y el contenido en fluidos de sus poros o fracturas condicionan la concentración de iones, cuya mayor movilidad tiene como consecuencia una menor resistividad o, lo que es lo mismo, una mayor conductividad (Orellana, 1982). En cualquier técnica de investigación de esta naturaleza, el concepto fundamental es que exista siempre un contraste de resistividad entre los materiales que conforman el subsuelo.

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de un perfil, con una separación electródica determinada que estará condicionada por el grado de resolución que se necesite (a menor separación entre electrodos, mayor resolución) y la profundidad de investigación que se precise (a mayor separación de electrodos, mayor profundidad). Con todos los electrodos conectados al equipo de medida, y mediante un programa secuencial específico que se crea para cada objetivo, el aparato ordena cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición (Loke, 2000).



Foto 4: Equipo de registro de Tomografía Eléctrica.



Foto 5: Cables multielectrodos con nodos de contacto y electrodos.

Cada uno de los cuadripolos involucrados (electrodos A, M, N, B) hace una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman. Los perfiles de Tomografía Eléctrica son, en definitiva, secciones del terreno que reflejan la distribución de valores de resistividad a esas distintas profundidades correspondientes a diferentes capas de investigación.

Por su capacidad resolutoria al investigar hasta profundidades que pueden llegar a centenares de metros, la Tomografía Eléctrica es aplicable a cualquier estudio del subsuelo donde interese identificar todo tipo de accidentes o discontinuidades que representen un contraste suficiente en la distribución de resistividad del medio rocoso. Entre los objetivos más habituales a resolver mediante esta técnica cabe mencionar los siguientes:

1. Detección y caracterización de fallas determinando su zona de influencia, rumbo, buzamiento y extensión en profundidad.
2. Detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza, determinando la morfología y localización precisa de tales discontinuidades.
3. Detección y caracterización de cavidades y huecos, tales como accidentes kársticos, canalizaciones, depósitos, rellenos arcillosos, etc.
4. Determinación de unidades acuíferas, niveles freáticos, intrusión marina, etc.
5. Localización de restos arqueológicos.
6. Estudio de plumas de contaminación de agua subterránea.
7. Localización de cañerías enterradas y socavaciones.

Con la Tomografía Eléctrica es posible el uso de diferentes configuraciones o arreglos de electrodos, pero todas tienen en común que el espaciado entre los electrodos se mantiene constante, disponiéndose todos ellos a lo largo de una línea recta de manera tal que cuando las medidas de resistividad se realizan entre electrodos próximos, la profundidad de investigación es pequeña, pero cuando se realiza entre electrodos muy separados, la profundidad de investigación es mayor. De esta forma se obtiene un perfil bidimensional en el que se disponen los valores de resistividad en una malla uniforme o no, dependiendo del objetivo buscado. En función del espaciado entre electrodos puede establecerse una cierta relación entre profundidad de investigación y resolución. A mayor espaciado de electrodos, la profundidad alcanzada es mayor, pero la resolución disminuye.

Los valores de resistividad se transforman de esta manera en un perfil mediante un proceso conocido como **Inversión** y consiste en obtener un modelo matemático cuya resistividad teórica sea la que mejor se ajuste a la resistividad observada (es decir, que minimice el error cuadrático medio entre ambas), lo que se logra mediante un proceso iterativo.

La siguiente Tomografía Eléctrica se realizó, en la zona del pueblo de El Cogoik, en la zona noreste de la provincia de Formosa. Esta región queda incluida en lo que García et al., 2010 denominaron Complejo Acuífero Interfluvio que es una unidad hidrogeológica que se extiende en la zona de interfluvio de los ríos Bermejo y Pilcomayo y entre el actual Bañado la Estrella y el antiguo cauce del río Pilcomayo. La característica sobresaliente de este complejo acuífero es la producción de agua salada a extremadamente salada (salmueras) en casi toda su extensión y la presencia de agua dulce (conductividades eléctricas menores a $2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$) en forma localizada, normalmente asociada a sistemas de paleocauces del río Bermejo o del río Pilcomayo que aún presentan recarga efectiva.

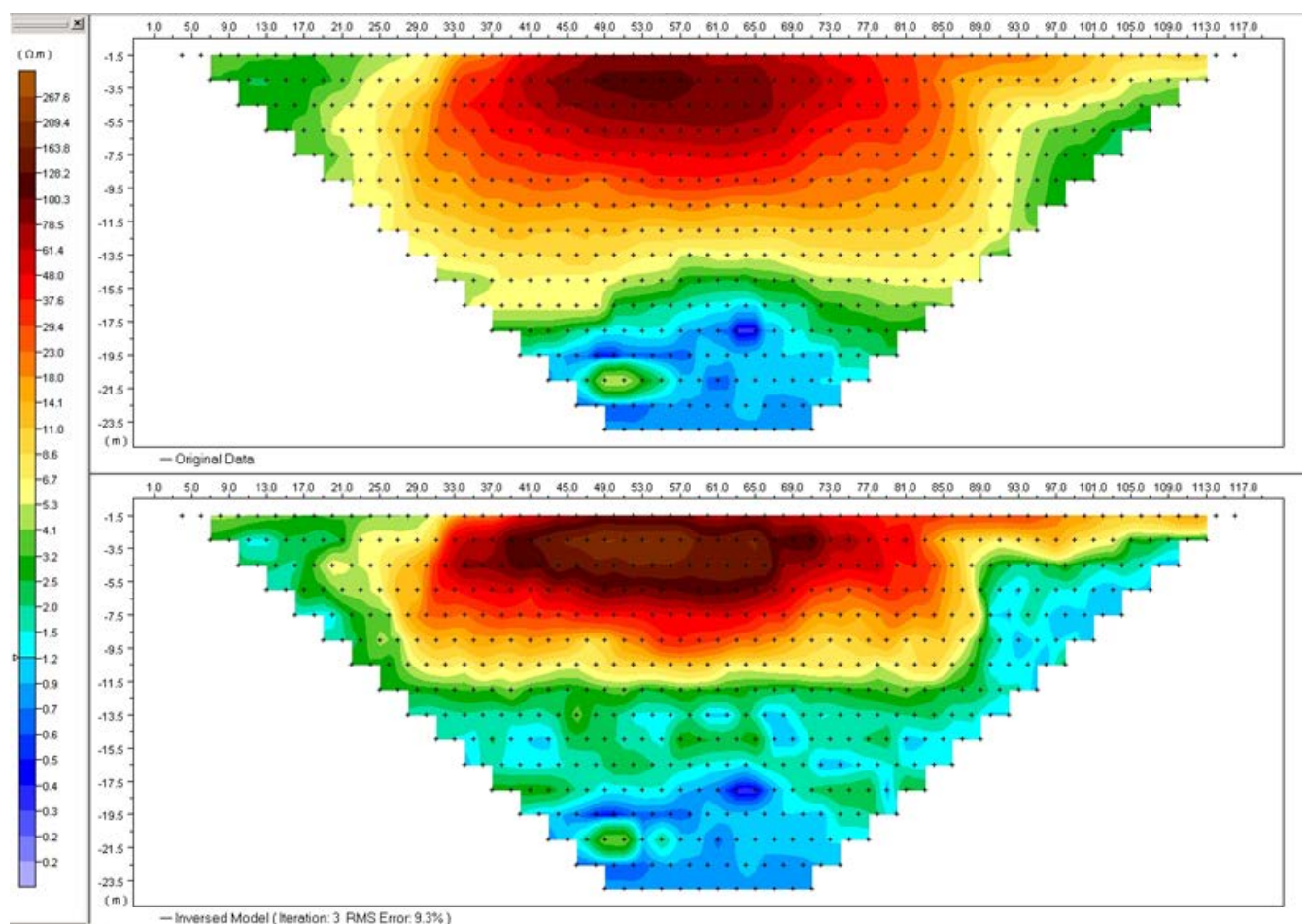


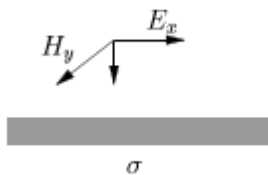
Ilustración 30: Ejemplo de determinación de paleocauces con tomografía eléctrica (Conhidro, 2010).

1.7. Prospección Magnetotelúrica (MT)

En el método MT se utilizan mediciones de campos electromagnéticos (EM) naturales para estudiar la estructura de la conductividad del subsuelo. Las fuentes naturales de los campos MT son esencialmente originadas en la ionósfera y magnetósfera, solamente para las frecuencias más altas hay un efecto atmosférico relacionado con las tormentas eléctricas.

En el método MT se asume que los campos en la superficie pueden ser considerados como ondas planas. La mayor parte de la energía es reflejada y una pequeña porción se propaga en el interior de la Tierra. Los campos EM que se generan en respuesta a las ondas primarias incidentes proveen información indirecta de las propiedades eléctricas de la Tierra a profundidades desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros, dependiendo de la conductividad del suelo y del rango de frecuencias en el que se registra la señal. Distintas consideraciones pueden ser asumidas para evaluar la repuesta del subsuelo, la aproximación más simple que se puede analizar es la interacción de estos campos naturales con una Tierra perfectamente homogénea.

La base de este método es esencialmente la observación de cómo se propaga una onda plana en un medio de conductividad (σ) uniforme. Para este caso la ecuación de propagación es obtenida de las ecuaciones de Maxwell:



$$\nabla \times \bar{E} = i\omega\mu_0 \bar{H} \quad y$$

$$\nabla^2 \bar{E} + i\omega\mu_0 \bar{E} = 0$$

donde no aparece el término de la corriente de desplazamiento porque se desprecia debido a que se satisface que $\epsilon\omega^2 \ll \omega\sigma$

La solución para este caso es:

$$E_x = Ae^{-ikz}$$

$$H_y = A \frac{k}{\omega\mu} e^{-ikz}$$

siendo: x e y direcciones horizontales perpendiculares entre sí (indistinguibles para este caso) y

$$k = (-i\omega\mu\sigma)^{\frac{1}{2}} = \frac{1-i}{\delta}$$

La velocidad de fase está dada por:

$$V = \omega\delta \quad y \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Donde ω es la frecuencia en Hz, ε es la constante dieléctrica en F/m, σ es la conductividad en S/m, μ es la permeabilidad magnética en H/m y δ es la longitud de penetración de la onda en metros que disminuye al aumentar la conductividad del medio y la frecuencia de la onda incidente, esta profundidad de penetración ("skin depth") es la que se utiliza para estimar una penetración promedio de la señal, de tal manera que para obtener información más profunda se necesita procesar periodos más largos y mayor tiempo de medición por sitio.

Dado que los campos medidos en superficie contienen la contribución del campo incidente y aprovechando la simplificación que brinda la hipótesis de onda plana, se define la impedancia Z (o tensor de impedancia magnetotélúrico), que depende de las características del subsuelo. Para evitar la dependencia con la amplitud del campo incidente se define la impedancia como el tensor que resulta del cociente entre los campos eléctrico y magnético de forma tal que:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (1)$$

Siendo $Z_{xy} = Z_{yx}$ para el caso homogéneo. O equivalentemente definimos la resistividad aparente como:

$$\rho_{xy} = \frac{Z_{xy}Z_{xy}^*}{\mu\omega} \quad \rho_{yx} = \frac{Z_{yx}Z_{yx}^*}{\mu\omega} \quad (2)$$

Donde el * indica que se ha tomado el complejo conjugado y en el caso homogéneo es simplemente $\rho = 1/\sigma$.

Es una práctica usual referirse a resistividad aparente (ρ) y fase (ϕ) en lugar de impedancia. La fase de la impedancia es la diferencia de fase entre E y H . Se utilizan ϕ_{xy} y ϕ_{yx} , para dos ejes horizontales perpendiculares (x , y) orientando los sensores de E y H en lo posible en las direcciones geomagnéticas NS y EO.

En el caso que el subsuelo puede ser considerado como homogéneo ϕ será

$\frac{\pi}{4}$ y los valores de ϕ_{xy} y ϕ_{yx} serán coincidentes y las respectivas fases con una diferencia de π .

Si el subsuelo se interpreta como un conjunto de capas horizontales de diferente conductividad y espesor se tendrá una interpretación 1D de tal manera que la resistividad aparente y fase variarán con la frecuencia de acuerdo a los valores de resistividad y espesor de las sucesivas capas. La componente vertical del campo magnético es cero y la capacidad de inferir las propiedades de cada capa, más allá de la no unicidad de los modelos, es muy dependiente de los contrastes de conductividad y del espesor de las mismas. Cuando existe variación lateral de la resistividad y una dirección de simetría de la estructura, el subsuelo se considerará 2D y el tensor de impedancia se rota de manera tal que una componente del campo E sea paralela a esta dirección y otra perpendicular. En el caso 2D, también se mide otra función transferencia, entre las componentes vertical y horizontal de H , a la que usualmente se refiere como vector de inducción.

La onda incidente en la superficie de la Tierra lo hace con un ángulo de 90° (incidencia normal), a partir de un cálculo simple utilizando la ley de Snell se puede inferir que la onda transmitida será también aproximadamente normal a la superficie.

1. Operación de Campo

Diagramación de campaña, número de estaciones, separación etc.

Elección de lugares y obtención de permisos para la ubicación de las estaciones MT.

Instalación de estaciones MT.

Control de los datos in-situ, bajar datos a notebook y procesado en el campo.



Foto 6: Equipo EMI. A la izquierda con conexiones a las barras magnéticas X, Y, Z y a los electrodos MN. A la derecha, conexión al sistema de GPS y PC. Gentileza del INGEIS.



Foto 7: A la izquierda barra magnética X. A la derecha, barra magnética vertical (Z). En todos los casos las tres componentes del campo magnético se encuentran enterradas.

2. Operación de Gabinete

Procesamiento de datos.

Inversión de datos.

Comparación de los modelos con la geología y los datos de pozos.

Hay un gran número de técnicas para el procesamiento de los datos de MT, donde se pretende transformar las series temporales en información espectral en el dominio de la frecuencia. Si bien el resultado de todos los métodos converge en dar las componentes de Fourier del registro, en la práctica hay diferencias importantes que se deben considerar debido a la característica de la de la señal y la naturaleza de los datos.

Los campos eléctricos y magnéticos naturales entre 10^{-4} y 10^3 Hz son procesos estocásticos. Los registros son series temporales de los cuales se toman muestras (segmentos de la serie). En general, para representar el registro temporal en el dominio de la frecuencia se utiliza el análisis armónico de Fourier. La hipótesis fundamental es que para una serie de longitud T_0 se supone que la señal es periódica de periodo fundamental T_0 lo cual impone una restricción sobre el espaciamiento entre armónicos y presupone una buena representación utilizando un número finito de los mismos.

Dado que en los registros hay ruido junto a la señal, lo que se debe hacer es obtener muchos segmentos de las series temporales para establecer un comportamiento promedio que reduzca el efecto del mismo. Las series tienen un comportamiento estocástico y consecuentemente su promedio irá a cero, por lo tanto se prefiere el uso del espectro de potencia donde los coeficientes se multiplican por el conjugado. De esta manera, cada segmento deberá ser observado detalladamente y su longitud determinada, dependiendo de la banda.

Cada segmento de los campos eléctrico y magnético es convertido al dominio de la frecuencia utilizando algún método que utiliza FFT (en general decimación en cascada es la técnica más usada) y se obtienen preferentemente unos 6-10 periodos por década en intervalos equiespaciados en escala logarítmica y $(N-1)/2$ frecuencias como máximo, la frecuencia mínima depende de la longitud de la serie elegida y la frecuencia máxima depende del intervalo de muestreo.

El espectro final es esencialmente suavizado promediando con los vecinos con la función de Parzen los espectros de potencia de cada segmento se almacenan. Si bien el espectro de potencia brinda información de la fase, si se puede hallar la expresión del módulo de Z y la resistividad aparente.

Una vez procesadas las series temporales, se obtienen las resistividades aparentes y fases en el dominio de la frecuencia, se calcula la coherencia entre ellas lo cual permite corregir problemas derivados de la calibración de los instrumentos. Pomposiello et al., 2004, utilizaron este método para resolver los resultados sesgados (bias) en los datos MT cuando no es posible establecer una referencia remota (dos estaciones registrando simultáneamente).

El método MT permite hallar modelos donde la conductividad del suelo presenta contrastes. Es más sensible a la detección de conductores que aislantes y la resolución dependerá de la resistividad eléctrica y la profundidad de investigación.

Con programas específicos se puede realizar la inversión de los datos y obtener un Modelo 1D o un modelo 2D.

En la provincia de Formosa, entre la ciudad de Clorinda (Noreste) e Ingeniero Juárez (Sudoeste), a lo largo de un perfil de aproximadamente 350 km, se realizó un relevamiento de estaciones de MT de largo período. En todos los casos primeramente se realizó la inversión 1D tanto en el modo TM o TE, en función del registro de mayor determinación y menor ruido.

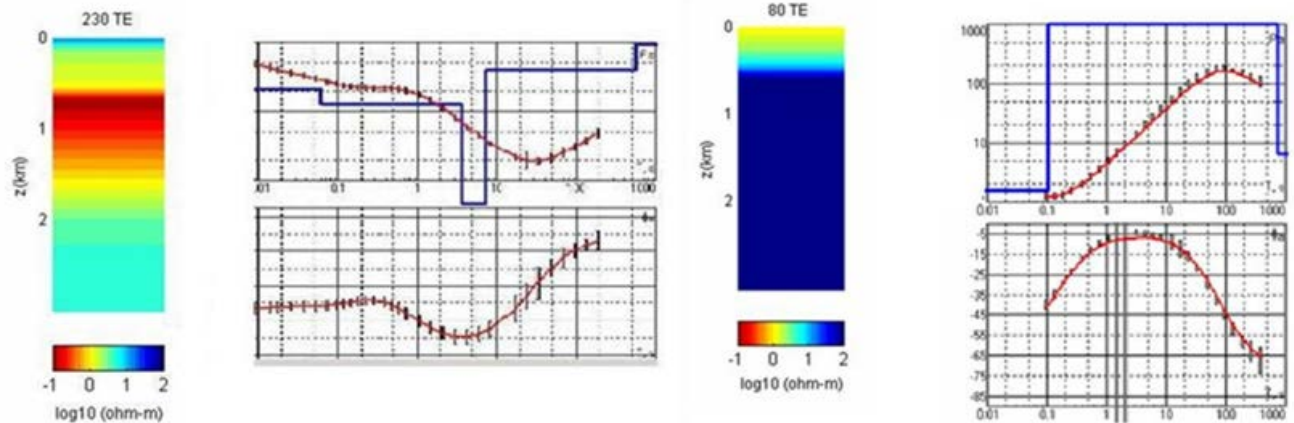


Ilustración 31: Modelo 1D de las estaciones Ingeniero Juárez (izquierda) y Clorinda (derecha), provincia de Formosa (García, et al., 2008).

El modelo 2D obtenido a partir de todas las estaciones involucradas muestra la presencia de una secuencia extremadamente conductiva (colores rojos y amarillos) a lo largo de todo el perfil, que hacia el sector oeste (Estación Ingeniero Juárez), se extiende hasta los 2.000 metros de profundidad aproximadamente; en la Estación Laguna Yema (225) hasta los 1.600 metros; en la Estación Las Lomitas (220) hasta los 1.100 metros; en la Estación Laguna Blanca (130) hasta los 750 metros aproximadamente; en la Estación Palma Sola (120) aproximadamente 400 metros y en la Estación Clorinda (80) 300 metros. Este nivel extremadamente conductivo incluye a facies sedimentarias de la Formación Chaco que está conformada en el sector oeste por una potente secuencia de areniscas, limolitas y arcilitas varicolor, con intercalaciones de niveles de yeso y carbonatos, que disminuyen de espesor notablemente hacia el este de la provincia.

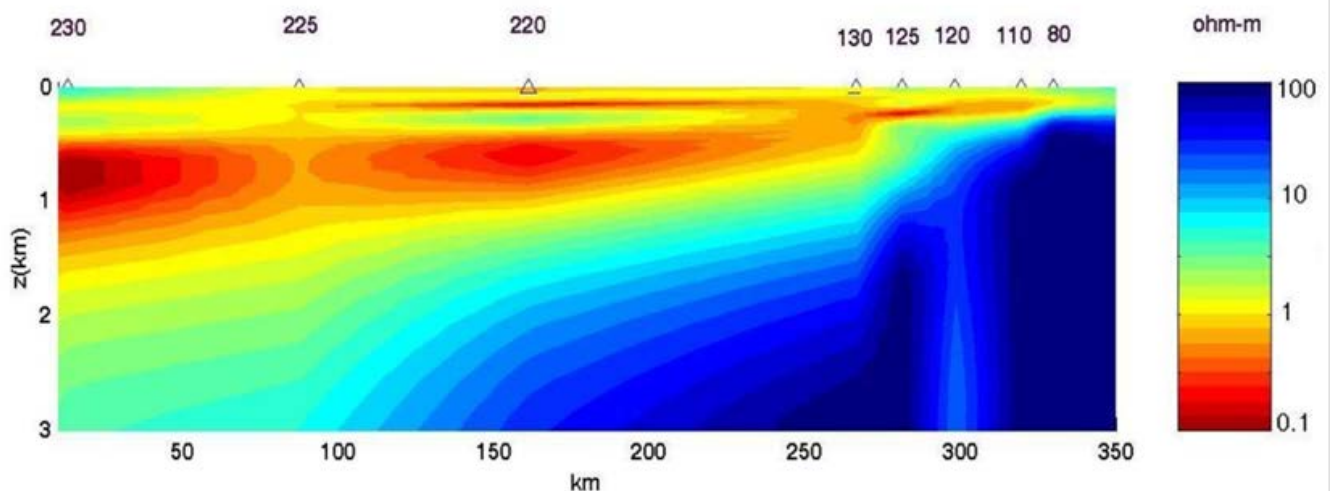


Ilustración 32: Modelo 2D, MT entre Ingeniero Juárez y Clorinda, provincia de Formosa (García, et al., 2008).

1.7. Prospección Audio Magnetotelúrica (AMT)

El método Magnetotelúrico y Audiomagnetotelúrico, mide de modo pasivo los campos electromagnéticos del subsuelo generados por fuentes naturales externas. Las señales del campo electromagnético (EM) son generadas en la atmósfera y magnetosfera. Las variaciones en tiempo de los campos eléctrico y magnético inducen corrientes en la tierra y océanos los cuales producen señales magnetotelúricas (MT), dichas señales son medidas por medio de sistemas de adquisición de AMT y MT. Las señales electromagnéticas (EM) de baja frecuencia (< 1 Hz) se generan por la interacción entre la magnetosfera de la tierra y el viento solar. Las señales en el rango de audio de alta frecuencia (>1 Hz) son generadas por tormentas eléctricas que ocurren de manera global. Los métodos geofísicos de AMT y MT combinan mediciones de campos eléctricos y magnéticos adquiridas por medio de dipolos y sensores magnéticos sobre un amplio rango de frecuencias. Las bajas frecuencias están asociadas a grandes profundidades; mientras que las altas frecuencias (**AMT**) lo están con profundidades más someras.

Un aspecto que debe señalarse es que, muchas veces, las señales naturales no están disponibles en el momento de adquisición con las frecuencias y amplitudes requeridas para un proyecto de investigación determinado, por lo que habría que generarla. El sistema Stratagem de fuente híbrida ayuda a solucionar este problema. La fuente híbrida significa que se utiliza una combinación de señal MT natural y una señal transmitida por el hombre. Cualquier señal natural disponible de fondo se utiliza en toda la banda de frecuencias mientras el transmisor del Stratagem es usado para proporcionar altas frecuencias adicionales en el rango de 1k Hz a 70k Hz en donde las señales naturales son débiles. El Stratagem estándar puede operar utilizando frecuencias desde 10 Hz a 100k Hz. La opción de baja frecuencia puede utilizar señales tan bajas como 0.1 Hz para mayores profundidades de investigación.



Foto 8: Equipo de prospección geofísica para adquisición AMT.

MÓDULO 2. Perforación de pozos. Método de Percusión. Principios. Equipos y herramientas. Metodología de perforación. Método de Rotación: Rotativo Directo. DDH (Diamantina). Aire Reverso. Principios. Equipos y herramientas. Técnicas de perforación.

2. PERFORACIÓN DE POZOS

Un pozo es un laboreo minero vertical que tiene por objeto poner en contacto una capa productiva de fluidos (gas, petróleo o agua), con la atmósfera. Esta definición, con los progresos actuales, no es del todo absoluta puesto que se pueden realizar pozos inclinados u horizontales (pozos dirigidos).

A diferencia de los pozos excavados, éstos son de pequeño diámetro y de profundidades variables (desde unos pocos hasta miles de metros).

Actualmente existen varios métodos de perforación de pozos; cada uno de ellos presenta ventaja y desventajas en lo que respecta a la facilidad de construcción, factores de costos, carácter de la litología a atravesar, profundidad de la perforación, desarrollo y terminado, etc. En la actualidad también se utiliza cada vez más el método de rotopercusión que, como el término lo señala, combina ambos métodos. Entre los métodos rotativos se pueden mencionar el rotary o rotativo directo, el de aire reverso, diamantina (DDH); aquellos que usan como fluidos de perforación un lodo a base de agua y bentonita, lodos biodegradables, los que utilizan el aire y combinaciones como espuma. En este curso se describirá rápidamente el sistema de percusión (usado hasta hace poco tiempo) y el de rotación directa con empleo de lodo de inyección (ampliamente difundido en la industria del agua).

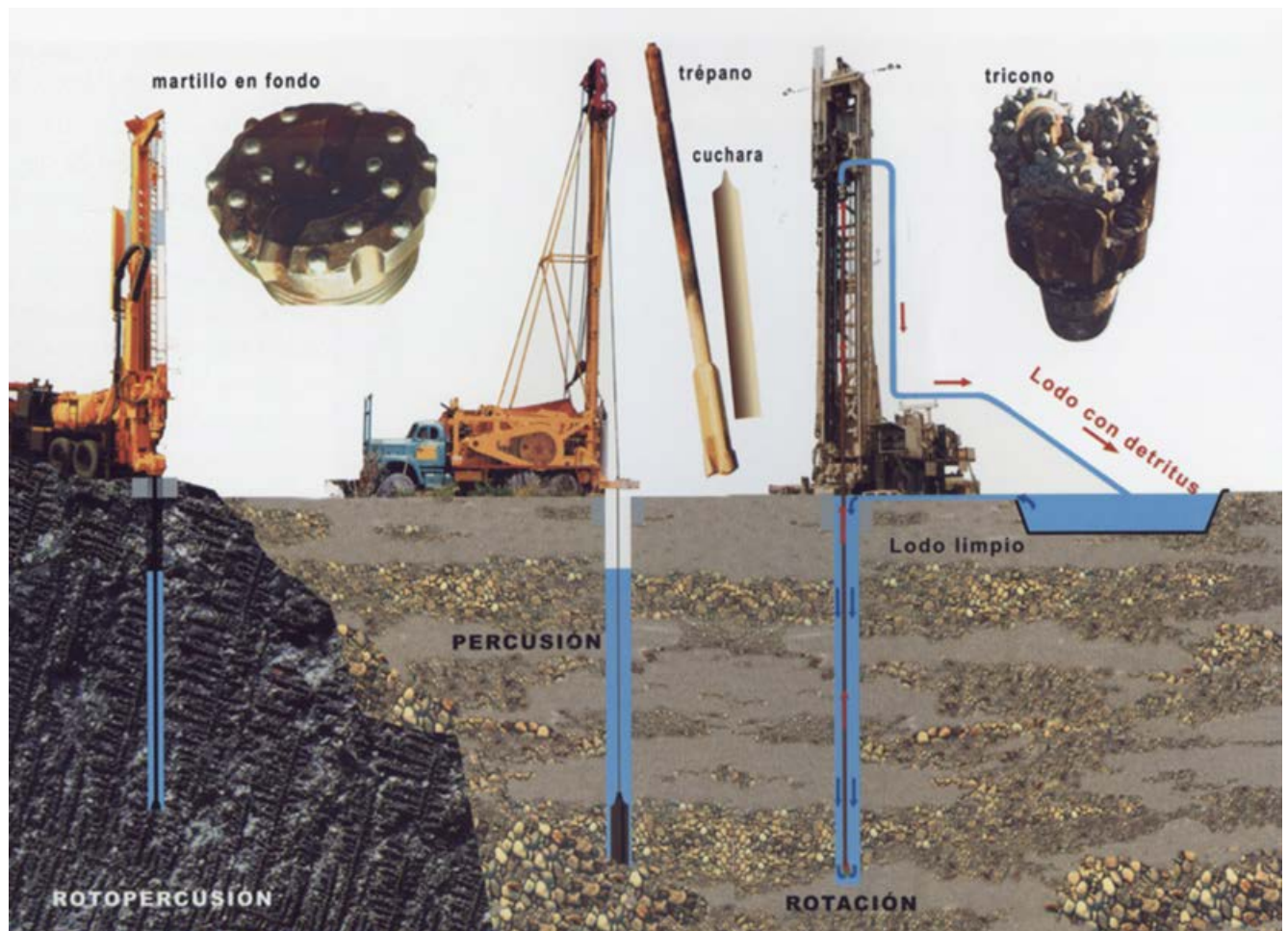


Ilustración 33: Equipos de perforación de distintas características y métodos.

2.1. Método de Percusión

Es el tipo de perforación más sencillo, consiste en levantar y dejar caer una sarta de herramientas por transmisión mediante un cable o barra rígida. Al caer, en caída libre, simultáneamente se produce una ligera rotación provocada por la torsión del cable. Los fragmentos de rocas o cutting resultantes de la tarea de perforación son extraídos mediante herramientas especiales llamadas cucharas. El elemento activo de la perforación es el trépano, que debe ser pesado y macizo. Otra característica singular del sistema de percusión es que la misma se realiza prácticamente "en seco", esto es, con la presencia de una columna de agua que no suele superar los 2 metros de altura. Una vez que la perforación se ha iniciado y se produce el avance en el terreno, al no contar con una columna de inyección estabilizadora de las paredes del pozo, es necesario que estas se mantengan con tubos de acero, que constituyen la llamada tubería de revestimiento o cañería de maniobra. La parte inferior de esta cañería termina en un ángulo cortante llamada zapata. En la parte superior esta cañería suele tener una costura reforzada que soporta el golpeo para su penetración.

Los elementos fundamentales en el método de percusión son:

- ❖ El elemento mecánico, máquina, que con su motor proporciona el movimiento a la sarta
- ❖ La sarta o columna de perforación
- ❖ El cable o varillas, según el sistema utilizado

✓ La máquina

Consta esencialmente de dos cuerpos: el bastidor y el mástil. En el bastidor se encuentran el motor, que por medio de correas trapezoidales, que a su vez accionan a una manivela y biela, consiguen dar un movimiento de vaivén al balancín, que se lo imprime a la sarta. El tambor que enrolla el cable cuyo giro se consigue también por correas trapezoidales. El mástil es una viga de celosía, generalmente abatible, para el transporte, en su parte más alta lleva un sistema de poleas, con suspensión de muelles o gomas para amortiguar la tensión y aumentar la elasticidad del cable en el movimiento de vaivén. El resto de las poleas se destina al cable de limpieza, donde puede ir suspendida la válvula y el cable para entubaciones, bien sean auxiliares o definitivas.



Foto 9: Equipo de percusión y herramientas (en primer plano se observa la cuchara).

✓ Sarta de perforación

Está constituida de abajo a arriba por los siguientes elementos: trépano, barra, tijera o destrabador y montera o giratoria.

Trépano: Es el elemento de corte, realiza un movimiento de vaivén y una ligera torsión provocando la trituración del material perforado.



Foto 10: Trépano de un equipo de percusión.

Barra: Se sitúa a continuación del trépano. Es una barra de acero de forma cilíndrica. Su función es darle peso a la sarta durante la perforación. Al mismo tiempo consigue la estabilidad en la columna que se traduce en la guía de la perforación. Tiene longitudes y pesos diferentes, entre 2,5 a 6 metros y 200 a 1.400 Kilogramos.

Tijera: También llamado destrabador. Se utiliza como elemento de seguridad en los agarres del trépano o sarta. Gracias a su articulación, la tijera permite golpear hacia arriba, destrabando toda la herramienta. Su uso es, pues, optativo, aunque la experiencia indica que siempre se debe usar durante la tarea de perforación, no así durante el trabajo de entubado.

Montera o Portacable: Se localiza en la parte terminal de la sarta y se emplea para hacer la unión con el cable. Los sistemas de unión son diversos, el más empleado es el del bulón con metal fundido, generalmente, cinc.

✓ Los cables

Se utilizan normalmente el cable de perforar, el cable de limpieza, donde se engancha la válvula, y el cable para entubaciones. El primero es el más importante por estar sometido a una gran tensión, el alma de éste puede ser de cáñamo o polivinilo. El giro del cable tiende hacia la izquierda, favoreciendo de esta forma el apriete de las roscas. El cable de limpieza suele ser normal o anti giratorio. Cada tipo de cable viene de fábrica con sus especificaciones técnicas y características constructivas.

Técnica de Perforación

Es normal iniciar la perforación realizando primeramente un ante pozo de varios metros de profundidad. A continuación se vierte agua y se inicia el golpeteo de vaivén; la velocidad inicial será al principio pequeño hasta que el avance sea de varios metros, alcanzándose unos 50 golpes/minuto. Al aumentar el detritus en el fondo del pozo, disminuye el número de golpes por efecto de amortiguación. En ese momento hay que proceder a la limpieza del pozo con una herramienta especial que consta de un tubo con una válvula en su parte inferior (la cuchara). La cantidad de agua vertida en el pozo es importante ya que hay que tener presente que una cantidad excesiva puede producir la precipitación de los materiales sueltos; por el contrario, pequeñas cantidades o falta de agua, consiguen consistencias altas en el lodo que se forma, amortiguando el efecto de corte del trépano y con ello la efectividad en el avance de la perforación.

La altura de caída del trépano también es muy importante. Normalmente, en terrenos duros la carrera de vaivén es corta, de 10 a 15 cm. Sin embargo, en terrenos no consolidados la carrera suele ser alrededor de los 40 cm.

Ventajas e inconvenientes de los sistemas a percusión

❖ Ventajas

1. El mecanismo es sencillo, el equipo y las herramientas son de fácil fabricación y poco costosas.
2. La potencia energética necesaria es pequeña, aún para orificios de gran diámetro.
3. El estudio de los terrenos atravesados es exacto debido a que puede haber un muy buen muestreo.
4. Permite un buen reconocimiento de las capas acuíferas pues se localizan las entradas de agua y se miden exactamente los niveles piezométricos.
5. El consumo de agua en obra es prácticamente nulo.
6. La perforación es posible en terrenos de gran permeabilidad o fisurados, donde las pérdidas de inyección de lodos son importantes.

❖ Desventajas

1. La perforación requiere limpieza frecuente.
2. El avance es lento, sobre todo en terrenos arcillosos.
3. La potencia está limitada a 1000 metros, por debajo de esta profundidad el procedimiento ya no es rentable.
4. No permite perforar en terrenos con desprendimientos.

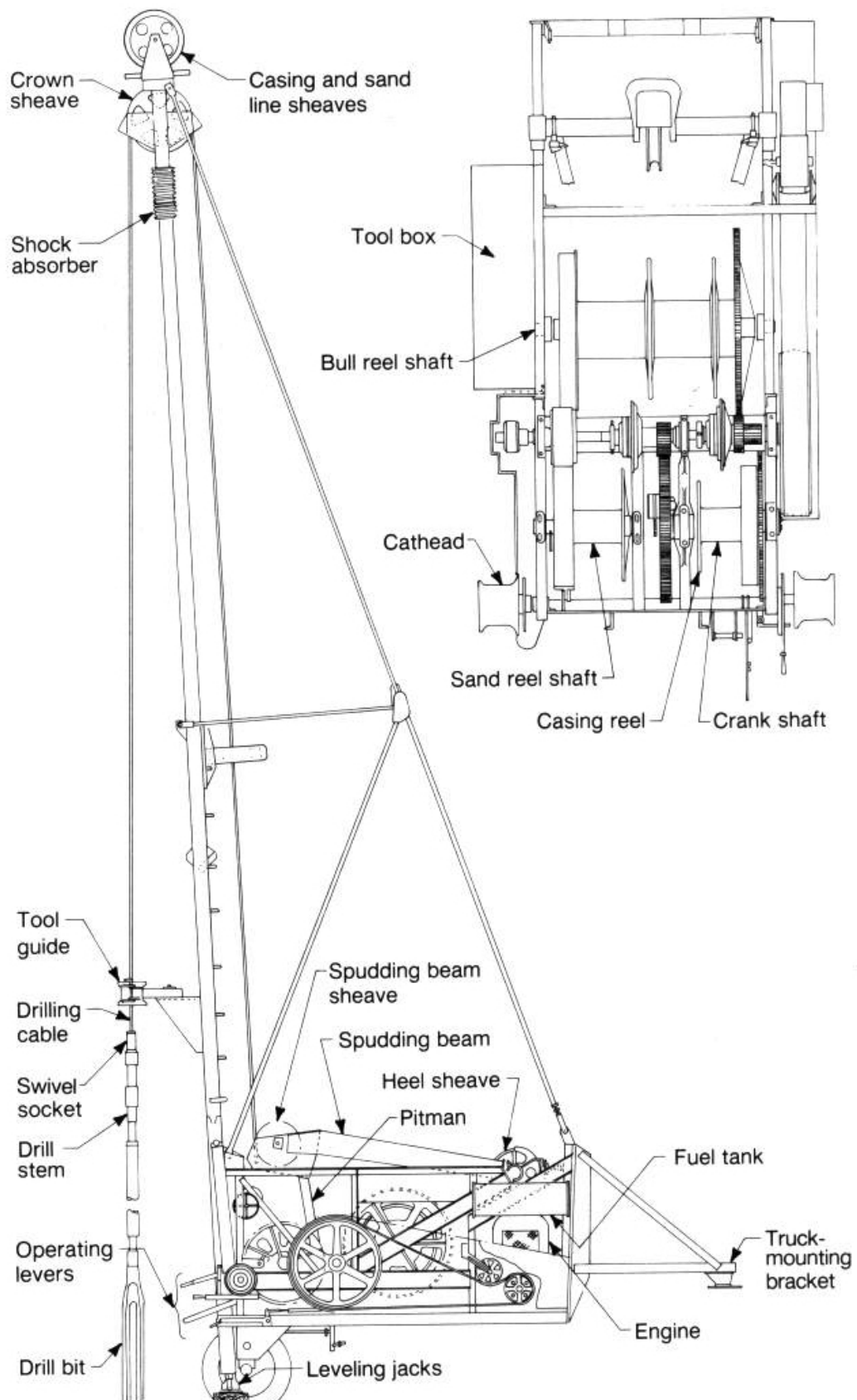


Ilustración 34: Esquema de un equipo de perforación de percusión.

2.2. Método a Rotación Directa o Rotary

Consiste en perforar mediante la acción rotatoria de un trépano y remover los fragmentos que se producen con un fluido o lodo que circula continuamente. El trépano se fija en el extremo inferior de una sarta de herramientas por cuyo interior circula el lodo y fluye verticalmente hacia la superficie a través del espacio anular. Los principales elementos del sistema son:

- ❖ De suspensión y transporte, corresponde a la torre y motores de accionamiento en general montados en un camión.
- ❖ De perforación, constituidos por una cabeza de inyección, vástago, mesa de rotación, barras de sondeo, portamechas y trépano.
- ❖ De circulación, compuesta por el reservorio del lodo de inyección, bomba y mangueras flexibles.

✓ *Suspensión y Transporte*

La torre de perforación es una estructura metálica de diferente altura y características, en función de las especificaciones técnicas y constructivas de la torre, se desprende la capacidad de perforación del equipo. La torre suele estar montada sobre un camión y es rebatible para su transporte. La parte mecánica está constituida por el motor mismo del camión, donde está montada la torre. La altura o longitud de la torre de perforación también determina el largo de barras de sondeo a utilizar; sean de 4, 6 o 9 metros entre las más usuales. La estructura de la torre de perforación soporta todo el peso de la sarta de herramientas.



Foto 11: Equipos de perforación con sistema rotativo.

✓ **Sarta de perforación**

Trépano: Es el elemento activo de la perforación. Todos los trépanos están provistos de orificios que lanzan un chorro de lodo a fuerte presión sobre la parte activa de la herramienta que de este modo se lubrica, limpia y refrigera. Hay de varios tipos pero en la actualidad los más usados son:

- ✓ Triconos: Son trépanos que tienen tres conos que giran cada uno sobre un eje individual, sobre cada cono se insertan o tallan dientes de diferentes aleaciones, según el tipo de unidad geológica a perforar. Estos trépanos se utilizan para perforar prácticamente cualquier tipo de litología.
- ✓ Trépanos de lámina o cola de pescado: Son trépanos cuyo principal accionar es escariar el orificio del sondeo, son utilizados perforar secuencias sedimentarias blandas, como por ejemplo arcillas.
- ✓ Trépanos de diamantes o coronas: Para terrenos muy duros, se utilizan estos tipos de trépanos, que utilizan diamantes artificiales que actúan por abrasión.

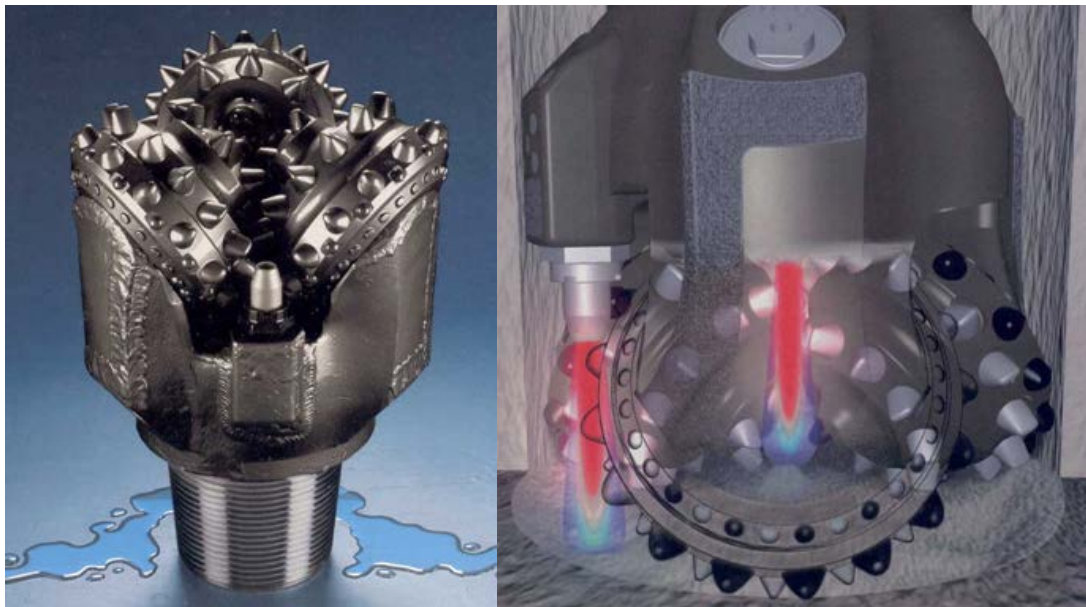


Foto 12: Trépano tricono. Se observa rosca cónica, boquilla y dientes insertos. A la derecha, esquema del flujo del fluido de perforación o inyección.

Portamechas: El peso en la perforación a rotación, es un parámetro fundamental. Para lograr este objetivo se usa esta herramienta. Son barras huecas de pared gruesa cuyo objeto es proporcionar, al trépano, el peso necesario para obtener el mejor avance y la verticalidad de la perforación. Normalmente, un portamechas tiene un peso que puede variar entre los 600 y 2.500 kg, dependiendo de su diámetro y su longitud.



Foto 13: Trépano y Portamechas o barra de peso.

Barras de sondeo: Son barras de acero huecas y de pared delgada permiten, por su interior, que la inyección circule y llegue a las boquillas del trépano. Estas barras se van añadiendo sucesivamente, a medida que se avanza en la perforación. Su diámetro, espesor, longitud y volumen interno están establecidos según normas.



Foto 14: Barras de sondeo. Se observa rosca macho y hembra, cónica.

Vástago o barra Kelly: Es una barra de sección cuadrada, hexagonal u octogonal (la más usada es la cuadrada), que tiene la cualidad de ir introducida en la mesa de rotación. Se desliza por el interior de la mesa de rotación. Lleva en su parte superior la cabeza de inyección y en la inferior las barras de sondeo. La longitud de la barra suele ser variable, entre 4 y 9 metros, de acuerdo a la altura de la torre.



Foto 15: En el mástil o torre, se observa suspendido el vástago y el cuadrante que se inserta en la mesa.

Mesa de rotación: El vástago recibe el movimiento de rotación por medio de la mesa de rotación. Esta es una plataforma horizontal, en cuyo interior existe una sección igual a la del vástago, con el objeto de adaptarse perfectamente a ella y transmitirle el movimiento que recibe a través de un motor.



Foto 16: Mesa rotativa vista desde el frente (izquierda) y mesa rotativa vista desde atrás, con vástago y cuadrante (derecha).

Cabeza de inyección: La cabeza de inyección permite que el fluido de circulación pase a través del varillaje y llegue a la batería de perforación. Está roscado en la extremidad superior del vástago y lleva una unión que sirve de conexión entre la manguera de inyección y el vástago, esta conexión es flexible, lo que asegura la inmovilidad del sistema durante el giro de esta unión.

✓ **Sistema de Circulación**

El sistema de circulación está compuesto por:

Bombas loderas: La bomba lodera se encarga de succionar el fluido de perforación desde la pileta, y conducirlo a través de mangueras flexibles, la cabeza de inyección y la sarta de herramientas a las boquillas del trépano. Una bomba de lodo consta esencialmente de dos o tres cilindros horizontales. Estos cilindros o pistones llevan camisas desmontables con un diámetro variable entre 3 y 8 pulgadas. La carrera de los pistones, en el caso de las bombas de mayor importancia es del orden de unas 15 pulgadas.



Foto 17: Bomba de lodo de dos pistones.

Piletas de inyección: Cerca del lugar de perforación se encuentran los depósitos del lodo de inyección, estos pueden ser realizados en el suelo de manera tal que contengan un volumen suficiente de inyección. Se debe tener por lo menos, dos depósitos de lodos; uno de succión y otro de retorno, con un paso intermedio donde pueda ocurrir la sedimentación de los materiales finos arrastrados por el fluido de perforación. La descarga del lodo de inyección de retorno, cargado de cutting, se produce sobre una zaranda vibratoria.



Foto 18: Piletas de inyección y circuito de inyección.

Las funciones de los lodos de perforación son:

1. **Refrigerar** la herramienta de corte (trépano): Durante la perforación se produce calor debido a la fricción del trépano con la formación, a la que debe sumarse la temperatura normal de gradiente geotérmico. Debido a esto, el lodo debe tener suficiente capacidad calorífica y conductividad térmica para permitir que el calor sea recogido desde el fondo del pozo para ser transportado a la superficie y dispersado a la atmósfera.
2. **Lubricar** la línea de perforación: El lodo también ayuda a la lubricación de la barrena mediante el uso de emulsionantes o aditivos especiales que afectan la tensión superficial. Esta capacidad lubricante se demuestra en la disminución de la torsión de la sarta, aumento de la vida útil del trépano, reducción de la presión de la bomba, etc.
3. **Mantener**, por su propia presión hidrostática, las paredes del pozo: El lodo tiene la propiedad de formar una película o revoque que se forma en las paredes del pozo, lo cual ayuda a minimizar los problemas de derrumbes y atascamiento de la herramienta, además de consolidar a la formación. Así mismo, este proceso evita las filtraciones del agua contenida en el lodo hacia las formaciones permeables y reduce la entrada de los fluidos contenidos en la formación al ejercer una presión sobre las paredes del pozo por la propia presión hidrostática. La presión hidrostática está en función de la densidad del lodo y de la profundidad del pozo. La densidad del fluido de perforación debe ser adecuada para contener cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo.
4. **Por su viscosidad y tixotropía**, elevar y/o mantener el detritus (cutting) de perforación en superficie: La eficiencia con que el lodo eleva y/o mantiene el cutting depende de la velocidad del lodo en el espacio anular que está en función del caudal de la bomba lodera, el diámetro del pozo, la velocidad de bombeo y el diámetro exterior de la tubería de perforación. Cuando la circulación se interrumpe por un tiempo determinado, los recortes de roca (cutting) quedan suspendidos debido a una característica del lodo llamada "tixotropía o gelanitosidad" la cual evita que los cortes caigan al fondo y causen problemas de rellenos y/u obstrucción sobre las barras de sondeo y trépano al reanudar la perforación.
5. **Transmisión** de potencia hidráulica al trépano: El fluido de perforación es el medio para transmitir la potencia hidráulica requerida a través de las salidas del lodo en el trépano (toberas o boquillas), donde

gran parte de esta potencia producida por las bombas loderas se utiliza para mover la columna del lodo existente en el espacio anular y así establecer una circulación correcta; ayudando a perforar la formación y limpiar el fondo del Pozo. Las propiedades químicas del flujo del lodo (viscosidad plástica, densidad), ejercen una considerable influencia sobre las propiedades hidráulicas y deben ser controladas.

Las principales características reológicas principales de un lodo de perforación utilizados normalmente en la industria del agua son: densidad, viscosidad, filtrado, revoque y pH.

Densidad: Se define como la relación de masa dividida por unidad de volumen. Su función es el mantener a los fluidos contenidos dentro del pozo. Las unidades comunes de densidad son las libras por galón (lb/gal), libras por pie cúbico (lb/ft³), kilogramos por centímetro cúbico (kg/cm³) y gramos por centímetro cúbico (gr/cm³). Los lodos pueden tener un rango de densidades de 1.07 a 2.50 gr/cm³ lo que permite una óptima velocidad de penetración al contrarrestar la presión de formación, sin provocar pérdidas de circulación.

Viscosidad: Es una medida de resistencia interna que presenta un fluido al desplazarse en función directa a la presión y temperatura. Los lodos tienen características de flujos no lineales (tixotrópicos) y requieren de más de un término de viscosidad para definir su comportamiento viscoso. La viscosidad se expresa en medidas relativas (viscosidad aparente o de embudo), o en medidas absolutas (viscosidad plástica, punto cedente y gelanitosidad). La medida de viscosidad utilizada es con el embudo (viscosímetro Marsh) que se determina en segundos y en un rango normal puede ser de 45 a 75 segundos para los lodos base agua y de hasta 160 segundos para lodos de emulsión inversa. Esta viscosidad aumenta a medida que los contaminantes son introducidos y/o que el contenido de sólidos se incrementa, por lo que la viscosidad aparente también aumenta. Por el contrario, la viscosidad suele decrecer al aumentar la temperatura y por lo tanto la viscosidad aparente también disminuye.

Filtrado: También conocido como pérdida de agua, es la cantidad de agua proveniente del lodo que se filtra hacia la formación permeable, y que debe mantenerse lo más bajo posible para tener una buena estabilidad del pozo y evitar daños a la formación. Básicamente hay dos tipos de filtración: estática y dinámica. La estática ocurre cuando el fluido no está en movimiento, mientras que la dinámica sucede cuando el lodo fluye a lo largo de la superficie filtrante. Durante el proceso de filtración estática, el revoque aumenta de espesor con el tiempo mientras que la velocidad de filtración disminuye, por lo que el control de este tipo de filtración consiste en prevenir la formación de revoques muy gruesos. Por otro lado, la filtración dinámica se diferencia de la anterior debido a que el flujo de lodo a medida que pasa por la pared del pozo tiende a raspar el revoque a la vez que se va formando, hasta que el grosor se estabiliza con el tiempo y la velocidad de filtración se vuelve constante. El control de este tipo de filtración consiste en prevenir una pérdida excesiva de filtrado a la formación. La medida del filtrado se realiza mediante la prensa de filtrado a temperatura ambiente, colocando el lodo dentro de la prensa con una presión de 100 psi durante 30 minutos. El líquido filtrado resultante se mide en centímetros cúbicos.

pH, (potencial Hidrógeno): Es el grado de acidez o de alcalinidad del lodo. Los valores del pH van de 1 a 14, cuya solución neutra es el agua destilada con un pH de 7. El valor del pH para un fluido de perforación depende de su tipo, pero normalmente debe estar entre 8.5 a 10.5 para obtener un pH estable y duradero; para lo cual puede utilizarse hidróxido del potasio. La medida del pH en el campo en general se determina colorimétricamente por medio del papel indicador de pH (tornasol) que muestra la variación del color al mojarlo con la solución. En el caso del lodo, se utiliza el líquido del filtrado resultado del mismo.

Existen numerosos tipos de lodos de perforación, dependiendo de los alcances y tipos de desafíos geológicos que se pueden encontrar en un lugar determinado. En la industria del agua suelen utilizarse más comúnmente los lodos bentoníticos (bentonita + agua) y lodos orgánicos (agua + polímeros).

La bentonita es una arcilla natural que tiene propiedades reológicas muy importantes, razón por la cual se las utiliza para formar lodos de base acuosa en muchos ambientes geológicos donde se realizan pozos. La bentonita reacciona convenientemente cuando se utiliza agua dulce como base, pero empieza a perder sus propiedades cuando se la mezcla con agua salobre o salada ya que, el incremento de sodio de las aguas más saladas (cloruro de sodio) degenera y dispersa la bentonita, haciéndole perder sus propiedades.

Los lodos de base acuosa más polímeros, tienen la ventaja de que éstos pueden utilizarse aún con agua salada e incluso salmueras que no pierden sus propiedades reológicas.



Foto 19: Lodo orgánico (polímeros) preparado con salmueras.

2.3. Método a Rotación DDH (Diamantina)

El principio del equipo es el mismo que el rotativo tradicional. La única diferencia es parte de la sarta de herramientas. En efecto, de abajo hacia arriba se encuentra la broca o corona, luego el tubo sacatestigos, barras de sondeo y la mesa rotativa.



Foto 20: Equipo de diamantina con torre tradicional (perforación a 90°).



Foto 21: Equipo de diamantina con torre rebatible (perforación con ángulo distinto a 90°).

La perforación diamantina utiliza un cabezal, broca o corona diamantada, que rota en el extremo de las barras de perforación (o tubos). La abertura en el extremo de la corona diamantada permite cortar un testigo sólido de roca que se desplaza hacia arriba en la tubería de perforación y se recupera luego en la superficie.



Foto 22: Diferentes tipos de coronas (brocas) con diamantes insertos.

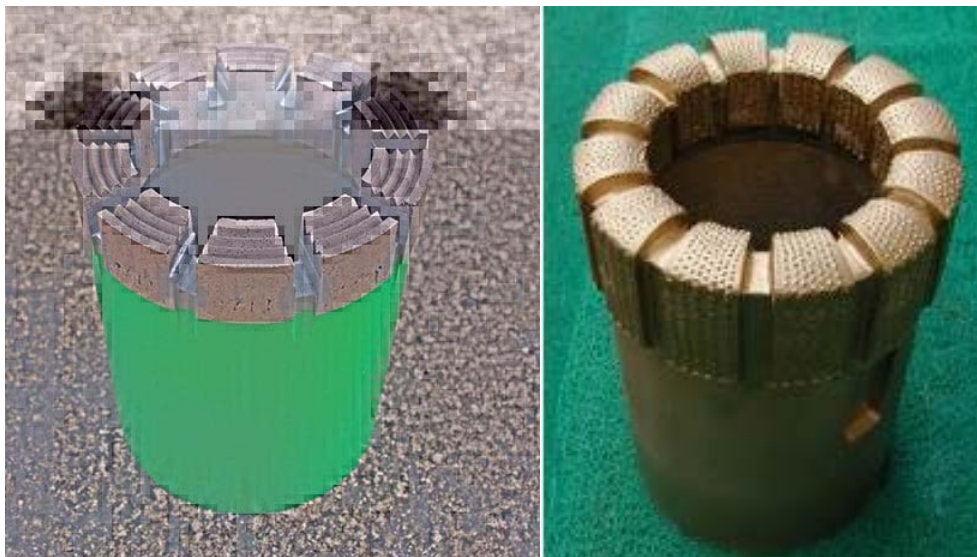


Foto 23: Detalle de diferentes tipos de coronas diamantadas.

La mayoría de las barras o tubos de perforación son de 10 pies de largo (3,048 m). Después de los primeros 10 pies de perforación, se enrosca una nueva sección de tubo o cañería en el extremo superior de la sarta de herramientas y así, sucesivamente. Los tamaños estándares básicos de barras de perforación son reconocidas con símbolos de identificación como BQ, NQ, HQ y PQ. El diámetro de la barra BQ es 60 mm, el de la barra NQ es de 75,7 mm; en de la barra HQ es 96 mm y el de la barra PQ es de 122,6 mm. El testigo de roca que se obtiene son: 36,5 mm; 47,6 mm; 63,5 mm y 85 mm, respectivamente.



Foto 24: barras o tubos de perforación de diamantina.



Foto 25: Barra de perforación en primer plano. Atrás equipo de perforación en funcionamiento.

La técnica de perforación consiste en ir ajustando la velocidad de rotación, la presión y la circulación de inyección para diferentes tipos de roca y las condiciones de perforación con el fin de evitar problemas, tales como que la corona o broca quede atascada o se produzca un recalentamiento del cabezal diamantado. Las rocas muy fracturadas (a menudo encontradas cerca de la superficie), además del riesgo que las barras se atasquen, pueden originar pérdidas de inyección, con el consiguiente recalentamiento de la corona y, con ello, el daño de la misma. El problema se reduce al mínimo mediante la inyección de un lodo de perforación en la perforación para sellar las fracturas y evitar la fuga de fluidos.



Foto 26: Preparación (izquierda) y circulación de lodo (derecha) en la perforación de diamantina.

Dentro de la tubería de perforación hay otro tubo interno (denominado barril), que tiene un mecanismo de cierre conectado a un cable de acero. Al final de cada serie de 10 pies (3,048 metros), el cable se utiliza para izar el tubo que contiene el testigo de roca a la superficie donde se puede recuperar.



Foto 27: Arpón y barril para recuperación de corona testigo.



Foto 28: Extracción de la corona testigo del barril y almacenamiento en cajas de logeo.

El testigo se almacena en cajas especialmente diseñadas que contienen compartimentos para mantener las secciones del testigo o corona recuperada. Las cajas estándar son de 2,5 pies de largo (0,762 m) y contienen cuatro compartimentos, así que permiten almacenar tres metros de testigo en cada caja, pero también hay cajas de 3,3 pies de largo (1 metro) con 3 compartimentos.



Foto 29: Cajas de logeo y almacenamiento estandarizadas de 0,762 metros.

El testigo de perforación primero se lava y se registra (logueo) por un geólogo calificado, y luego se divide por la mitad para obtener una muestra para los análisis geoquímicos, si es que se requiere este tipo de estudio. Para obtener un testigo o corona de sondaje se requiere gastar mucho tiempo, esfuerzo y dinero, por lo que su estudio y registro debe hacerse con mucho cuidado.

Se utiliza un formulario de logueo o registro normalizado que suele contener columnas para cada uno de los tipos de información que se registra, con marcas de graduación indicando el metraje. La información necesaria generalmente incluye el % de recuperación, litología, alteración, mineralización, los datos de calidad de la roca (RQD) y detalles estructurales.

El % de recuperación es el cociente entre la longitud del testigo real comparado con el intervalo de perforación indicado. Los huecos y zonas de fractura pueden causar una pobre recuperación. Por ejemplo, si una perforación de 3 m obtiene 2,4 m de testigo, la recuperación es del 80 %. Los logueos de sondajes se utilizan para construir las secciones de perforación, las que ilustran la geometría del subsuelo del yacimiento. La tendencia actual es la creación de registros de perforación en formato digital o de hoja de cálculo, lo que facilita la construcción de tramos de perforación mediante computador.

Existen numerosos y diferentes tipos de equipos:

Portátiles: Estos equipos tienen la ventaja de llegar a donde otros equipos no pueden, al menos no, sobre los hombros de un equipo de personas; lo cual lo convierte en los equipos ideales para llegar a las plataformas de perforación más inaccesibles para las unidades motorizadas. Trabajan con herramientas y accesorios ligeros de menores diámetros que los tradicionales HQ y NQ y pueden alcanzar profundidades hasta 600 metros.

Livianos: Dentro de esta gama de equipos se encuentran aquellas máquinas que pueden tanto montarse sobre patines, sobre un camión u orugas, y algunos diseñados para desmontarlas de una forma rápida para su movilización con helicóptero y que pueden alcanzar profundidades en promedio de entre 200 y 500 metros de profundidad con HQ y 500 a 800 metros con NQ, eventualmente se usa también el diámetro BQ para mayores profundidades o dependiendo de las condiciones del terreno.

Medianos: Se pueden considerar a los equipos que pueden superar las profundidades señaladas anteriormente, con un mejor desempeño que las livianas.

Pesados: Son los equipos de gran potencia, con capacidades de perforación de mayor diámetro, tal como el PQ (muchos equipos medianos también pueden hacerlo). Estos equipos tienen capacidades de perforación superiores a los 1000 metros y, en algunos casos, pueden hacer pozos de más de 2000 metros de profundidad.

2.4. Método a Rotación Aire Reverso

La perforación con aire reverso es muy diferente a la de diamantina, tanto en términos de equipamientos y herramientas, como así también en la toma de muestras. La principal diferencia es que la perforación de aire reverso crea pequeños fragmentos de roca en lugar de un testigo sólido.



Foto 30: Equipo de aire reverso, con ciclón a la izquierda.

La perforación con aire reverso requiere de un compresor de aire de alta capacidad, usualmente montado en un camión. El aire comprimido es inyectado hacia una cámara exterior de un tubo o barra de perforación de doble pared y regresa por el interior del conducto central de las barras de doble pared, arrastrando hasta la superficie los fragmentos o cutting. Las barras de perforación para aire reverso son por lo general de 6" (15,2 cm) y 8" (20,3 cm) de diámetro y 20 pies de largo (6,096 m).



Foto 31: barras dobles o barras de doble pared para aire reverso.

El cutting viaja a una velocidad tan alta que es preciso disminuirla utilizando un ciclón. La tubería de retorno dirige el flujo de fragmentos de roca a deslizarse por la pared interior de la cámara del ciclón y luego hacia abajo en espiral hasta la parte inferior del ciclón, perdiendo velocidad en el proceso. El cutting se recoge continuamente a medida que avanza la perforación y constituyen la muestra del subsuelo.



Foto 32: Ciclón, con bolsa para recoger el cutting.

Los cabezales de perforación de aire reverso también son diferentes a las brocas diamantadas. Un tipo de cabezal se llama martillo, que pulveriza las rocas golpeándolas repetitivamente (percusión). Este tipo de cabezal funciona bien en condiciones de perforación en seco (es decir, por encima del nivel freático) y en las formaciones rocosas que son densas y duras. Por debajo del nivel freático, el agua subterránea actúa como amortiguador y hace mucho menos eficaz la fragmentación de las rocas mediante este tipo de cabezal.



Foto 33: Martillos o cabezales de fondo para aire reverso.

Otro tipo de cabezal, llamado tricono, cuenta con tres conos dentados rotatorios que giran juntos. Los triconos son más lentos para perforación en formaciones duras, pero son muy eficaces en formaciones blandas y en condiciones de perforación húmeda.



Foto 34: Cabezal tipo tricono o trépano tricono para aire reverso.

Las muestras de cutting proveniente de la perforación se recogen generalmente en intervalos de 1,5 o 2 metros. El gran diámetro de la perforación crea un gran volumen de material para cada muestra, que suele ser dividida en el terreno para obtener un volumen razonable de manejar y enviarla al laboratorio para su análisis.

En condiciones de perforación en seco (por encima del nivel freático) se utiliza un cuarteador para dividir la muestra en terreno. Por lo general, se separa un 1/8 del total recogido. El cuarteador se compone de niveles, cada uno de los que divide la muestra a la mitad. Después de la división tercer nivel 1/8 de la muestra total original permanece, que se recoge en un recipiente o un cubo. Cuando la perforación llega a la profundidad del nivel freático, se puede utilizar un cuarteador rotativo "húmedo". El separador húmedo gira y divide la muestra utilizando una serie de aletas, de forma similar a las aletas de una turbina. Estas dirigen los materiales a una tubería que los canaliza hacia un balde. Pequeñas muestras representativas de los cuttings se recogen de forma continua durante el proceso de muestreo, se lavan en un colador y se colocan en cajas de plástico. Los cuttings son observados y registrados por un geólogo.

2.5. Método Odex

El método ODEX (Overburden Drilling with the Eccentric) es un sistema de perforación de rotopercusión diseñado para perforar materiales no consolidados. El método combina en forma simultánea la perforación propiamente dicha, con el uso de una cañería de recubrimiento o entubación. Se basa en la utilización de una broca o martillo provista de botones de alta resistencia que, girando en un sentido o en el opuesto puede tomar dos posiciones: una para perforar con entubación y otra sin ella.

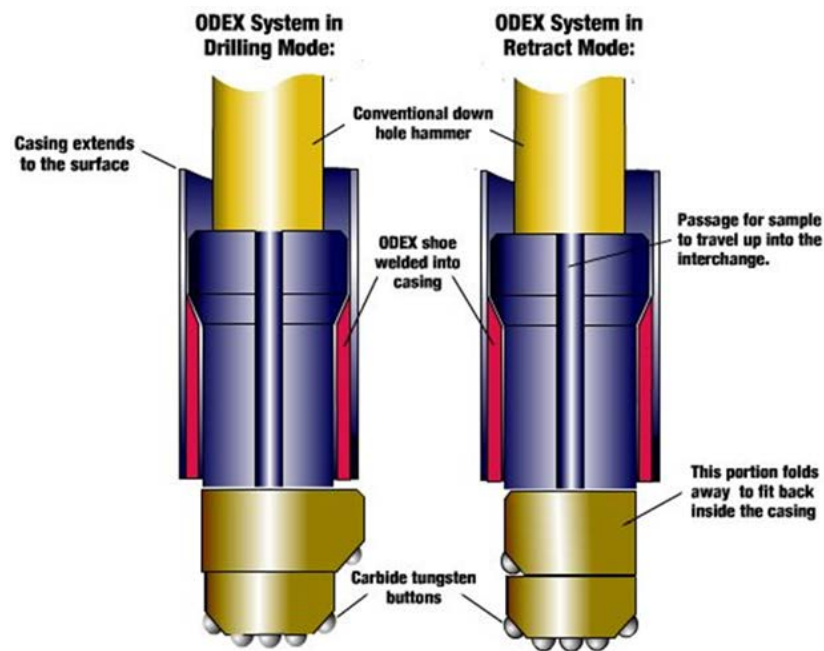


Foto 35: Sistema Odex en modo perforación (izquierda) y en modo de entubación (derecha).

Cuando se necesita entubación, la broca o martillo toma una posición excéntrica y actúa como elemento escariador, agrandando ligeramente el diámetro de la perforación. De este modo la cañería de entubación puede descender sin resistencia del terreno a medida que avanza la perforación.



Foto 36: Broca o martillo del sistema Odex.

El método ODEX puede aplicarse con martillos en fondo o en cabeza, arrastrando en ambos casos el detritus por el interior de la entubación mediante aire comprimido. Sin embargo, en taladros de profundidad superior a 15 metros es recomendable el empleo de espumas que evacuan los residuos más eficazmente y además lubrican las paredes del taladro, lo cual facilita el descenso de la entubación.

MÓDULO 3. El Pozo Exploratorio. Perfilajes durante y posteriores a la perforación exploratoria: Perfil de cronometraje, perfil litológico, comportamiento de la máquina. Perfilajes eléctricos (potencial espontáneo, resistividad y gamma). Cálculo de Tiempo de Retorno. Interpretación de electroperfilajes.

3. EL POZO EXPLORATORIO

Luego de haber realizado el montaje del equipo en el lugar seleccionado, la perforación se **inicia primeramente** con la rotación del trépano unido directamente al vástago, al tiempo que el fluido de perforación (inyección) es succionado por la bomba lodera y conducida por el sistema de mangueras flexibles hasta la cabeza de inyección y luego, a través del vástago y boquillas del trépano, al pozo. En forma simultánea al ingreso de inyección al pozo, el trépano se encarga de escariar los sedimentos formando un detrito (cutting) que es removido hacia la superficie por el espacio anular entre la pared del pozo y la sarta de perforación, por las propiedades que tiene el fluido de inyección. Una vez que el vástago es introducido en su totalidad en el pozo, se suele detener la rotación y extraer tanto el vástago como el trépano; en ese momento se coloca sobre el trépano la barra de peso o portamechas (que debe tener una longitud menor o igual a la del vástago) dentro del pozo y se acopla la parte superior del portamechas al extremo inferior del vástago y se comienza nuevamente la perforación haciendo rotar todo el sistema. A medida que se avanza en la perforación, el vástago va ingresando dentro del pozo, y así se continúa hasta que el extremo superior del vástago se encuentra sobre el nivel de la mesa de rotación. Una vez que se ha perforado toda la longitud del vástago, se levanta la sarta de perforación (formada por el trépano, el portamechas y el vástago) y se desenrosca nuevamente el vástago del portamechas; en ese momento se agrega una barra de sondeo al extremo superior del portamechas y se hace ingresar al pozo la barra de sondeo (en ese momento se encuentra dentro del pozo el trépano, el portamechas y la barra de sondeo) y se enrosca su extremo superior a la parte inferior del vástago y se inicia nuevamente la perforación. Cuando el vástago entra en su totalidad en el pozo, se vuelve a repetir la última operación, agregando una barra de sondeo cada vez que se perfora toda la longitud del vástago; de esta forma se avanza y se alcanza la profundidad requerida. Durante toda la operación de perforación el lodo (inyección) circula, desde las piletas de inyección por el interior de la sarta de perforación hasta el fondo del pozo, y desde allí por el espacio anular hasta la superficie (boca de pozo) levantando los fragmentos (cutting) producto de la rotación del trépano.

3.1. Tiempo de retorno

El Tiempo de retorno de un fluido o de cutting, se puede calcular conociendo el volumen anular del pozo (diámetro de pozo versus diámetro de herramienta) y el caudal de la bomba lodera. Para determinar el volumen anular de las diferentes secciones del pozo, se procede de la siguiente manera:

Volumen de pozo abierto en 1ª sección – Volumen de sarta de herramienta en 1ª sección = V1

Una vez calculado el volumen de cada una de las secciones del pozo, el volumen anular, es la sumatoria de los volúmenes de cada sección.

Volumen Anular (m^3) = V1 + V2 + V3

$$TR = \frac{\text{Volumen Anular}}{q}$$

q= caudal de la bomba lodera (m^3/min)

TR= tiempo de retorno (minutos)

Toda la etapa de perforación se conoce con el nombre de **pozo exploratorio**, ya que durante este trabajo **se puede explorar** (estudiar y analizar) los distintos tipos de sedimentos y/o rocas que han sido atravesadas y, eventualmente las propiedades, de los fluidos que podrían estar presentes. Para ello se aplica una serie de técnicas y metodologías específicas que se conocen con el nombre de perfilajes de pozos.

3.2. Perfilajes de Pozos

Bajo esta denominación se incluye una serie de procedimientos y técnicas destinadas a obtener la mayor cantidad de información del material atravesado durante una perforación exploratoria y, eventualmente del tipo y calidad del fluido que pueda ocupar los poros interconectados del material que conforma el subsuelo. Existen numerosos tipos de perfilajes o registros de pozos

El cutting originado por el accionar del trépano, una vez recogido en la zaranda vibratoria debe sufrir una serie de procesos antes de ser observado a la lupa para determinar sus características litológicas. Una vez que se ha recogido la muestra en un recipiente conveniente, esta debe ser lavada repetidamente a fin de eliminar la parte contaminante que le acompaña y que tiene su origen en el lodo de inyección. Sin embargo, se debe recordar que cuando se perforan secuencias litológicas de fracciones finas y se utiliza un lodo bentonítico, el lavado debe ser más cuidadoso a fin de no descartar la verdadera fracción fina que representa la secuencia que está siendo perforada. El cutting ya lavado debe colocarse en un vidrio de reloj lo bastante amplio y luego ser llevado a la lupa donde podrá ser analizado. La observación se debe efectuar tanto en mojado como en seco, es por ello que siempre una fracción de muestra recogida debe secarse en una mufla. Una vez secada y analizada la muestra, ésta debe guardarse en recipientes convenientemente rotulados (bolsas o cajas) que indiquen la profundidad de la que proviene la muestra.

La descripción del cutting, deberá seguir las pautas que permitan caracterizar el tipo de roca y sus características más sobresalientes, a saber: Nombre, tamaño de grano, color, redondez, forma, selección, matriz y/o cemento, grado de compactación. En pelitas, además indicar color en fractura fresca, compactación, fisilidad, etc. El intervalo de muestreo, está directamente vinculado al conocimiento de las secuencias que se esperan atravesar y al detalle de trabajo que se quiere efectuar. En pozos de agua es conveniente realizar el muestreo cada 1 metro y en cada cambio litológico. Se puede decir que existen los perfilajes durante la perforación exploratoria y los posteriores a ella.



Foto 37: Muestreo y descripción de cutting proveniente de una perforación.

3.3. Perfilajes durante la perforación exploratoria

1. Cronometraje

El perfil de cronometraje está estrechamente ligado al litológico. Consiste en ir tomando el tiempo neto que se tarda en perforar el metro de formación, de esta manera es posible correlacionar las caídas de tiempo con materiales friables y no muy coherentes, mientras que los registros altos se corresponden con formaciones más coherentes. Siempre que se habla de perfil de cronometraje se hace referencia al tiempo neto, por supuesto, esto quiere decir que se deben tomar en cuenta los tiempos que se tarda en avanzar un metro de perforación, siempre bajo las mismas condiciones de perforación.

2. Litológico

Al mismo tiempo que se está analizando el cutting, es posible ir construyendo el perfil litológico del pozo, sobre la base de las descripciones litológicas efectuadas. Por lo tanto, un perfil litológico muestra la secuencia de unidades o formaciones geológicas atravesadas por la perforación.

Debe tenerse presente también para la construcción del perfil litológico el porcentaje de cada una de las fracciones descritas, por ejemplo: 70 % de arena pardo amarillenta, fina a mediana, clastos redondeados a subredondeados de cuarzo; 30 % arcilla pardo rojiza. De esta forma se construye el perfil con la secuencia y el porcentaje de cada una de las unidades, por último se debe hacer perfil interpretado.

3. Comportamiento de la Máquina

Anotar el comportamiento de la máquina, es decir si la perforación va suave, si la máquina se mueve y golpea, si la inyección cambia de color, densidad o se pierde inyección, etc., es una tarea más que importante y, muchas veces, puede ayudar a comprender alguna situación geológica particular que, de otra forma, es casi imposible de analizar.

Estos tres perfiles son de suma importancia, ya que para llevar un buen control litológico cada metro o cada cambio litológico, el cambio estará seguramente marcado o evidenciado en una variación en alguno de los otros dos perfiles. Por ejemplo si se está perforando a 150 metros de profundidad una secuencia de arcillas a razón de 20 minutos por metro y de pronto el tiempo de avance de la máquina cambia a 1 minuto el metro ello, seguramente, puede indicar un cambio litológico, que se evidenciará en el muestreo en forma retardada en función del tiempo de retorno, pero la variación en el registro de cronometraje permite en forma inmediata determinar la profundidad exacta del cambio y prepararse para buscar “algo distinto” (litológicamente hablando) en la zaranda o canaleta.

También puede ocurrir que el tiempo de avance no varíe pero la máquina, que estaba trabajando en forma suave, de pronto comience a “golpear y zapatear”, lo cual también puede estar indicando un cambio de la secuencia perforada.

Algo que debe tenerse en cuenta y que puede llevar a malas interpretaciones es que tanto el tiempo de avance como el comportamiento de la máquina estarán muy influenciados por el tipo y calidad de la herramienta con que se está perforando. A modo de ejemplo se puede señalar que si se quisiera conocer la dureza de dos tablas de madera distintas, habrá que perforarlas con un mismo taladro e igual mecha, ya que si se usa una mecha desafilada para una tabla y una afilada para la otra, los resultados pueden indicar conclusiones erróneas.

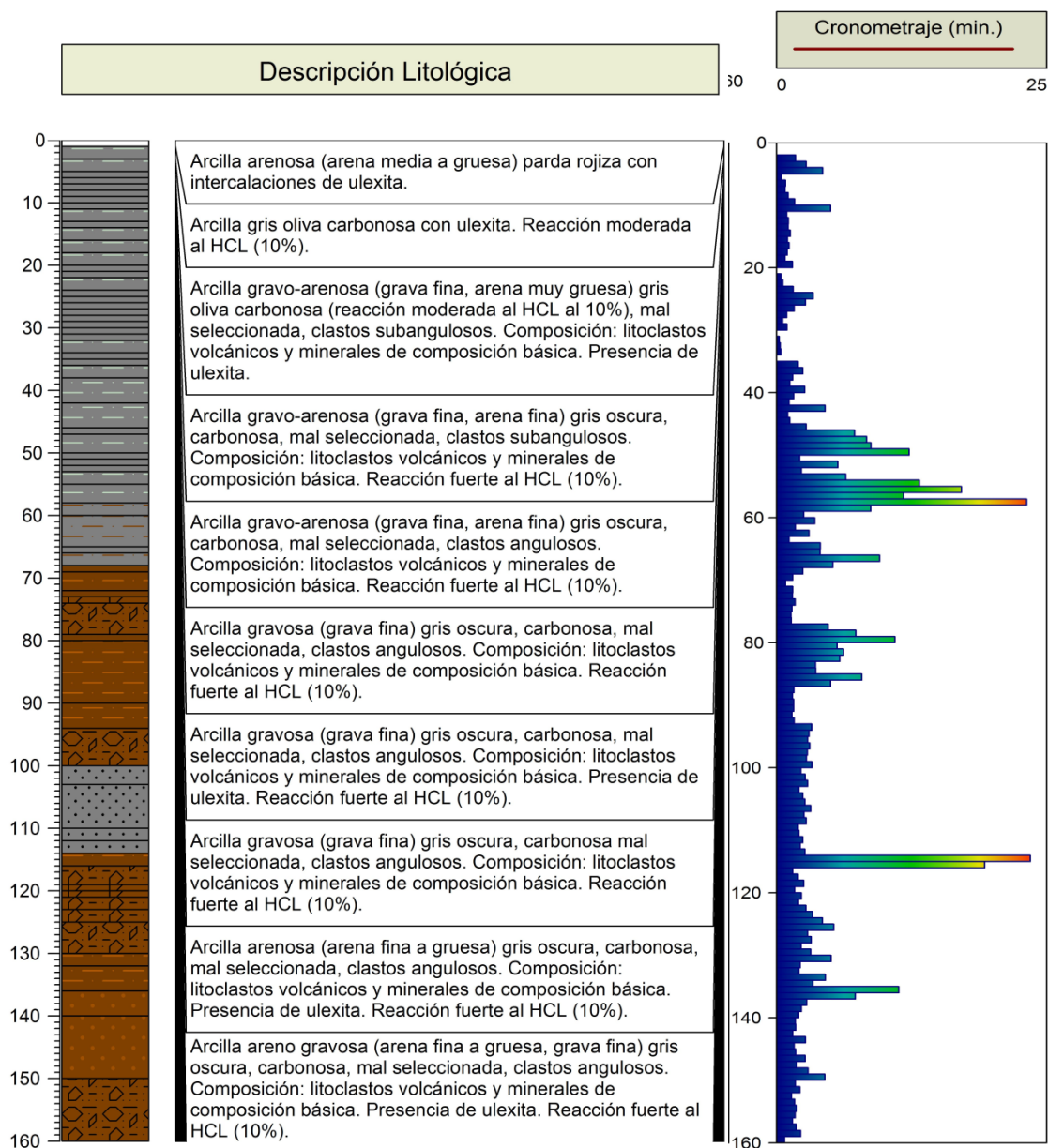


Ilustración 35: Perfil, descripción litológica y perfil de cronometraje en un pozo exploratorio.

3.4. Perfilajes posteriores a la perforación exploratoria

Previo a introducirse en los distintos perfilajes que se realizan dentro del pozo exploratorio (pozo abierto) se debe aclarar o advertir sobre cuáles son los cambios o alteraciones que se producen alrededor de un pozo cuando este se perfora y se utiliza un fluido de perforación.

En la actualidad, la enorme mayoría de los pozos se realiza por el sistema rotary (por lo menos en nuestra región y en general, en nuestro país). Este sistema utiliza un lodo de perforación. El lodo genera un revoque o pared dentro del pozo y una zona que se denomina invadida, que es hasta donde el lodo se filtra dentro de las capas perforadas.

La distancia radial hasta donde el lodo se filtra estará en función del tipo de lodo y de la permeabilidad de la capa. Este concepto es importante porque existen perfilajes que miden las propiedades del revoque, otros dentro de la zona invadida y otros en la zona virgen o no invadida.

Dentro de los perfilajes más comunes de aplicación en hidrogeología se tiene:

1. Perfilaje de Potencial Espontáneo

Este tipo de perfilaje es uno de los más antiguos. Usa un equipamiento sencillo para realizar el registro, pero su interpretación puede ser muy compleja, particularmente en ambientes con acuíferos de agua dulce. Esta complejidad ha llevado a que en muchos casos el registro no sea tomado en cuenta o que haya producido falsas interpretaciones. El perfil de potencial espontáneo ha sido ampliamente usado en los pozos de petróleo para obtener información sobre la litología y la salinidad del agua intersticial, pero este perfilaje no es universalmente aplicable en ambientes de acuíferos con agua dulce.

La curva de SP registra el potencial eléctrico (voltaje) producido por la interacción del agua de formación, el fluido o lodo de perforación y ciertas rocas (lutitas o arcillas). Se la utiliza en forma cualitativa. La medición resulta de la diferencia de potencial que se genera por el movimiento de iones tales como Cl^- y Na^+ entre el agua de formación, el lodo y las arcillas. Tanto los iones de Na^+ como los iones de Cl^- se moverán de las soluciones más concentradas a las menos concentradas. Este movimiento de iones cargados constituye una corriente eléctrica, y la fuerza que causa que se muevan, constituye un potencial a través de las arcillas, que es el medido por la herramienta. El equipo para la medición del potencial espontáneo consiste de un electrodo que se introduce en el pozo y que se conecta, a través de un milivoltímetro, a otro electrodo fijo, clavado en la superficie del terreno. Cuando se baja el electrodo dentro del pozo, el cual es un sistema roca - agua, se registran pequeños cambios de potencial usualmente en el rango de los milivoltios que conforman el perfil de potencial espontáneo. Las fuentes principales del potencial espontáneo en un pozo son el potencial electroquímico y el potencial electrocinético.

El potencial electroquímico es probablemente el más significativo y puede dividirse en potencial de membrana y potencial de difusión o de contactos de líquidos. Ambos efectos son el resultado de la migración de iones desde una solución más concentrada hacia una más diluida. Para comprender este fenómeno supóngase una capa de arena acuífera cuyo techo y base está limitada por capas de arcilla. El lodo de perforación y el agua de formación en la arena son cloruradas sódicas. Debido a su estructura laminar y a las cargas existentes sobre las láminas de las arcillas, estas son sólo permeables a los cationes de Na^+ e impermeables a los aniones de Cl^- . Cuando una arcilla separa dos soluciones de distinta concentración de ClNa , los cationes de Na^+ se desplazan a través de la arcilla desde la solución más concentrada hacia la menos concentrada. Este movimiento de iones con cargas constituye una corriente eléctrica y la fuerza que hace que se muevan corresponde a una diferencia de potencial a través de la arcilla y es lo que se denomina potencial de membrana. El otro componente del potencial electroquímico, es el potencial de difusión o de contacto de

líquidos, que se produce frente a la capa permeable de arena, en el borde de la zona invadida donde el filtrado del lodo y el agua de formación están en contacto directo. Aquí los iones de Na^+ y Cl^- pueden pasar de una solución a otra. Como los iones de Cl^- son más móviles que los de Na^+ el resultado es un flujo de las cargas negativas desde la solución más concentrada hacia la menos concentrada. Esto equivale a un flujo de corriente convencional en la dirección opuesta al flujo de cationes. El potencial de difusión es cinco veces menor al de membrana y ambos se suman. Si la formación permeable no contiene arcilla el potencial electroquímico $E_c = -K \log (a_w/a_{mf})$ donde a_w y a_{mf} son las actividades químicas del agua de formación y filtrado del lodo respectivamente, K es un coeficiente de proporcionalidad a la temperatura absoluta que vale 71 para soluciones de ClNa a 25 °C.

El potencial electrocinético E_k se produce al haber un flujo de un electrolito a través de un medio poroso no metálico. Entre los factores que determinan su magnitud está la presión diferencial que provoca el flujo y la resistividad del electrolito en el medio poroso. El potencial electrocinético es normalmente menos importante que el electroquímico aunque bajo ciertas condiciones puede llegar a cambiar la magnitud y dirección del potencial espontáneo. En pozos de agua el potencial electrocinético puede ser sustancial en los intervalos profundos donde el agua se mueve desde o hacia el pozo.

En conclusión el perfil de potencial espontáneo da una idea cualitativa de si el agua de formación es de mayor o menor salinidad con respecto al lodo de perforación. Por ello es **imprescindible medir la conductividad del lodo** para poder analizar el registro de potencial espontáneo. La norma es que cuando la curva de SP se desvía hacia la izquierda de la línea base de las arcillas, o sea hacia el negativo, el agua de formación es más salada que la del lodo de perforación y cuando se desvía hacia la derecha, o sea hacia el positivo, el agua de formación es más dulce que la del lodo. En caso de que el lodo y el agua de formación sean de igual salinidad, la curva de SP no muestra desviación. Por ello es muy importante, en ambientes hidrogeológicos donde se conoce que existen zonas con acuíferos salinos, trabajar con un lodo de perforación con salinidad aproximada al valor límite de la conductividad de un agua apta para consumo (2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ya que, si por ejemplo, se perfora con lodos muy dulces, es posible que aún acuíferos con agua de salinidad apta para el consumo, muestren deflexiones hacia la izquierda de la línea base de las arcillas.

El SP permite:

- ✓ Diferenciar espesores permeables.
- ✓ Correlación de capas.
- ✓ Proporcionar indicación de arcillosidad.
- ✓ Ayuda a identificar litologías (arena-arcillas).
- ✓ Determinar resistividad del agua de formación (con limitaciones).

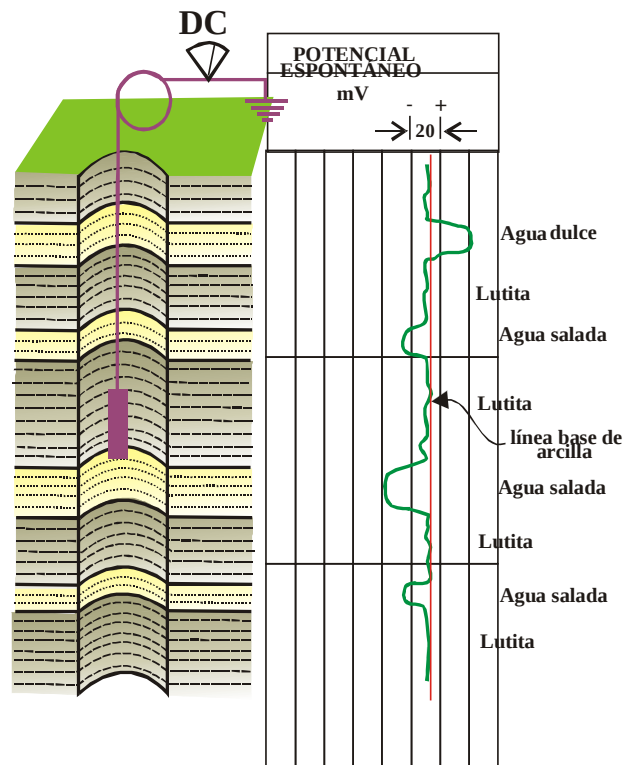


Ilustración 36: Perfil litológico y de SP mostrando línea base de arcillas y deflexiones a la derecha (agua dulce) y a la izquierda (agua salada), respecto a la conductividad del lodo (Vitulli, 2010).

2. Perfilaje de Resistividad

Los registros de resistividad miden los efectos producidos por una corriente eléctrica que, se transmite a la formación por medio de electrodos situados dentro del sondeo. Para la realización de estos registros se emplea un amplio número de configuraciones electródicas. La resistividad del sistema fluido - roca saturada depende de tres factores fundamentales: salinidad del fluido intersticial, porosidad de la roca y temperatura de la roca y del fluido. Otros factores a tener en cuenta son la mineralogía de los materiales sólidos y la geometría del espacio poroso. Las rocas compactas no porosas, tal como calizas por ejemplo, tienen altas resistividades. Por el contrario, los materiales altamente porosos, saturados con aguas salinas tienen resistividades bajas. Los minerales arcillosos reducen la resistividad, porque los iones que se agrupan en sus superficies aumentan considerablemente el carácter conductor de los sedimentos. Estos registros miden la resistividad de las capas atravesadas por el pozo. El principio es igual al método geoelectrico de superficie, basándose en la ley de Ohm. Lo que cambia es el dispositivo geométrico y por lo tanto la constante. La resistividad del sistema fluido - roca saturada depende de tres factores fundamentales: salinidad del fluido intersticial, porosidad de la roca y la temperatura de ambos. Otros factores a tener en cuenta son la mineralogía de los materiales sólidos y la geometría del espacio poroso.

La ecuación que expresa la relación entre alguna de estas variables fundamentales es la ley de Archie:

$$F = R_0/R_w \text{ y } F = a/m^c$$

Donde **F** es el factor de formación, **R₀** es la resistividad verdadera de la roca, **R_w** la resistividad del agua que satura en un 100% la roca, **a** es un coeficiente que vale 1 para rocas sin arcilla, **m** es la porosidad y **c** es el factor de cementación que varía entre 1,3 y 2,8. Según el manual de Schlumberger, para una porosidad dada, la relación **R₀/R_w** es constante para cualquier valor de **R_w** que no exceda 1 Ohm.m, o sea para

conductividades de agua de formación mayor a 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con lo cual su aplicación a la hidrogeología queda restringida.

El dispositivo que más se utiliza es el denominado Normal, donde un electrodo de corriente **A** y de potencial **M** está en la sonda que se introduce en el pozo y el otro electrodo de potencial **N** se dispone en superficie, en la pileta de inyección y el segundo electrodo de corriente **B** puede instalarse en superficie, en la boca del pozo, o puede estar en el cable a 15 metros por encima de la sonda. Existen dos tipos comunes de resistividad Normal: Corta donde **A** se localiza a una distancia de **0,4** metros de **M** y Larga donde la distancia **AM** es de **1,6** metros. El instrumento es un Voltímetro y un Amperímetro, al igual que un equipo de geoeléctrica. El aparato brinda una lectura de Potencial e Intensidad de corriente cuyo cociente multiplicado por una constante geométrica es igual al valor de la resistividad aparente.

La constante geométrica para un dispositivo Normal vale 5 para la Corta y 20 para la Larga. El campo de investigación de una sonda Normal se asume que es una esfera cuyo diámetro vale **2AM**. Con ello se debe asumir que una sonda Normal Corta investiga hasta una distancia desde el centro del pozo de 0,4 m y una Normal Larga hasta 1,6 metros. Por lo expuesto, se asume que la resistividad Normal Corta corresponde a la resistividad de la zona invadida y la sonda Normal Larga da una resistividad influenciada tanto por la zona invadida como por la zona donde el agua de formación nativa está presente. Se debe tener presente que la resistividad medida es aparente y que puede transformarse en verdadera con el uso de ábacos especiales. El distinto radio de investigación en función de la distancia **AM** es importante y en muchos casos de suma utilidad para interpretaciones cualitativas de la salinidad del agua de formación. Es por ello que siempre es conveniente correr dos registros de resistividad.

En un caso común donde se hayan perforado acuíferos con agua dulce, siempre la resistividad Normal Corta es menor que la resistividad de la Normal Larga. Esto es debido a que el lodo principalmente bentonítico y conductivo, produce una baja de la resistividad de la zona invadida. Supóngase ahora el caso donde se ha perforado un acuífero con agua salada con un lodo de menor salinidad que la del acuífero; en este caso el remplazo en la zona invadida del agua de formación por la del filtrado de lodo va a producir un aumento de la resistividad en la zona invadida y por lo tanto la resistividad Normal Corta será superior a la resistividad de la Normal Larga. Esta inversión en la relación entre las resistividades de la Normal Corta y de la Normal Larga es muy importante para la detección de acuíferos que portan agua salada.

No se debe olvidar que como la resistividad Normal Larga tiene un radio de investigación superior, en el caso de capas de poco espesor, el valor de resistividad de la Normal Larga estará influenciado por la resistividad de la capa superior e inferior lo que también puede provocar una inversión entre ambas resistividades sin que esto signifique un problema de salinidad del agua de formación.

Generalmente se asume que para que el valor de resistividad no esté influenciado por las capas que la limitan, su espesor debe ser mayor a **5 veces AM**, esto significa espesores mayores a 2 metros para la resistividad de la Normal Corta y mayores a 8 metros para la Normal Larga. Es decir que en capas que presentan espesores entre los 2 y 8 metros puede ocurrir una inversión entre la resistividad Normal Corta y Larga.

3. Perfilaje Radiactivos

La radiactividad constituye otra base útil en los registros geofísicos. Los isótopos naturales, no estables, de elementos tales como el torio, el uranio y el radio se desintegran para dar elementos más estables. Durante los procesos de desintegración se produce emisión de radiaciones alfa, beta y gamma. Tanto la radiación alfa como beta están constituidas por partículas cargadas, que la materia frena con relativa facilidad. Por el contrario, la radiación gamma es muy penetrante y es la que se mide en los registros del subsuelo.

La radiación gamma natural la producen, principalmente, los isótopos no estables de uranio, torio y potasio. La radiactividad se mide mediante un instrumento que se desplaza lentamente y que alberga un detector de rayos gamma, que habitualmente es un scintilómetro, en donde los rayos que llegan se detectan por un destello luminoso, al destello lo intercepta un fotomultiplicador que transmite en forma de impulso eléctrico al aparato de registro. La corriente registrada es proporcional a la radiactividad que se manifiesta en el sondeo. Los registros de rayos gamma se emplean para establecer correlaciones entre varios pozos y como ayuda para la interpretación litológica. Estos registros son particularmente útiles en los sondeos ya entubados, puesto que la cañería influye muy poco en los resultados. En general, la máxima actividad gamma la presentan las arcillas organógenas, a las que siguen las tobas riolítica y ciertas areniscas. Las arcillas compactas, las calizas arcillosas y areniscas arcillosas tienen actividades moderadas, las areniscas, calizas y dolomías, en general, las tienen bajas y la sal y los carbones son de muy baja actividad.

Dado que el flujo natural de neutrones es muy bajo, para realizar registros neutrónicos conviene partir de la producción artificial de los mismos eliminando así el problema de las correcciones de la radiación de fondo natural. La fuente de neutrones artificial más adecuada está constituida por berilio y un emisor activo de rayo alfa, tal como plutonio, polonio o radio; la emisión de neutrones se produce cuando el berilio absorbe partículas alfa. Los neutrones rápidos, emitidos por la fuente, son frenados por el medio hasta que pasan a un estado energético en el que pueden ser capturados. Los núcleos de hidrógeno presentes en el agua, en los minerales o en los hidrocarburos son los que frenan a los neutrones de forma más efectiva. A raíz de la captura se produce la emisión de partículas gamma. El registro neutrónico mide o la radiación gamma inducida artificialmente o los neutrones lentos. Dado que la mayor parte del hidrógeno natural está presente en el agua, la actividad observada en el registro será inversamente proporcional al contenido de agua del medio en las proximidades del sondeo; si la formación está completamente saturada, la actividad es, además, inversamente proporcional a la porosidad. El registro neutrónico se utiliza para determinar los cambios de humedad en la zona no saturada.

4. Perfilajes de Salinidad y Temperatura

En un electrolito, como por ejemplo el agua, la resistividad depende de las sales disueltas y de la temperatura. Estos registros permiten conocer la variación de la temperatura y salinidad del agua a lo largo del pozo exploratorio. Son especialmente indicados para estudiar y controlar de forma rápida los procesos de penetración del agua marina, o procedente de yacimientos salinos. También permiten determinar sobre la marcha de la perforación, las aguas de los distintos acuíferos, siempre que su temperatura o salinidad sean diferentes. Los registros de temperatura sirven de apoyo a la interpretación de los de resistividad y potencial y, al mismo tiempo, constituyen un método importante para la localización de zonas cementadas (tiempo de fraguado del cemento) y de fugas de gas.

5. Perfilaje de calibrado o “Caliper”

El perfil de calibrado proporciona un registro continuo del diámetro del pozo, que es de utilidad para la interpretación de otros registros geofísicos y para la estimación de las necesidades de cemento y grava para la construcción del pozo. Las variaciones en el diámetro del pozo pueden deberse a la técnica de perforación y/o a la litología perforada. La herramienta común es una sonda con tres brazos separados en 120°, los brazos están conectados para mover un potenciómetro lineal por lo que cambios en la resistencia son transmitidos a la superficie como cambios de voltaje los cuales son traducidos a cambios en el diámetro del pozo.

6. Perfilaje Sónico

El perfil sónico mide la velocidad del sonido que se transmite por el fluido en el pozo hacia las formaciones próximas al pozo. Se usan distintos tipos de perfilaje sónico cuyas diferencias recaen en la frecuencia de onda que se emite. Los perfiles sínicos brindan información sobre la porosidad, litología, cementación y localización de fracturas.



Foto 38: Equipo de perfilaje de pozos. Registro de SP, SPR, RNC, RNL y Gamma en el Salar de Pozuelos (Provincia de Salta).

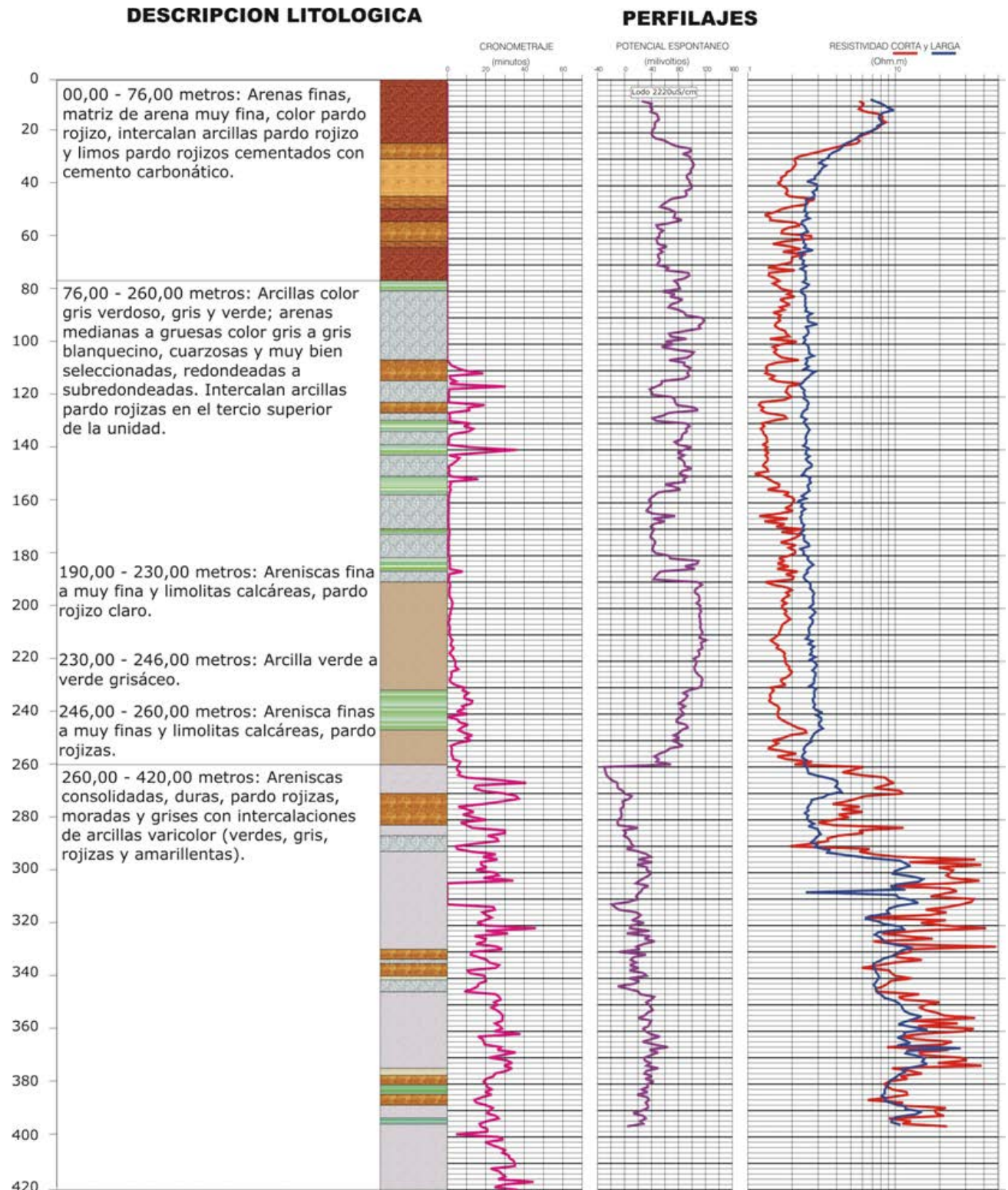


Ilustración 37: Perfil litológico, cronometraje, potencial espontáneo (SP), resistividad normal corta y larga (RNC y RNL), en un pozo exploratorio de la provincia de Formosa.

MÓDULO 4. El Pozo de Explotación: Diseño del pozo. Entubado. Relleno de prefiltro. Cálculo de tamaño y volumen de prefiltro. Determinación de abertura de filtro. Cementaciones. Lavado y Desarrollo. Equipos de bombeo. Video filmación de Pozos. Diagnósticos por imagen.

4. POZO DE EXPLOTACIÓN

Una vez finalizado el pozo exploratorio y realizado todos los estudios tendientes a determinar las características del suelo y subsuelo y de la posible calidad del recurso hídrico, empleando las técnicas mencionadas con anterioridad, se debe decidir la conveniencia o no de realizar una serie de nuevos estudios que conlleven a la ejecución del pozo de explotación; es decir de aquella obra que permitirá la extracción de la mayor cantidad de agua subterránea con la menor pérdida de carga posible y conducirla a la superficie para los múltiples propósitos que existen. Todas las operaciones que se realizan en esta etapa se conocen con el nombre de diseño del pozo. El **diseño de un pozo** implica escoger los factores dimensionales apropiados para la estructura de éste y de los materiales que se van a utilizar en su construcción. La eficiencia de un pozo está afectada principalmente por dos factores: de diseño; donde se puede considerar, insuficiente superficie filtrante, deficiente distribución de aberturas en el filtro y penetración parcial del acuífero y factores de construcción del pozo; donde se pueden citar, desarrollo incompleto, instalación de filtros enfrentados a lugares menos permeables, etc.

En esta etapa se decide la entubación, engravado, cementación y desarrollo del pozo.

4.1. Entubación

La entubación es el procedimiento por el cual se introduce en el pozo perforado una columna de tubos (Acero o PVC) unidos entre sí con roscas o soldadura eléctrica, con la finalidad de permitir el ingreso del agua desde los acuíferos a la estructura a través de una zona de admisión (filtros), estabilizar las paredes del pozo y actuar como conducción hidráulica (caños ciegos). La columna de entubación puede ser toda de un solo diámetro, o de varios, en orden decreciente de arriba abajo, llamándose entonces telescópica.

Independientemente de la elección del tipo de material que forma la tubería, principalmente teniendo en cuenta la agresividad de las aguas, es preciso considerar también el diámetro y el espesor de ésta. El espesor de la pared de la cañería ciega es importante ya que la mayoría de las veces, la tubería está sometida a esfuerzos significativos, principalmente los que actúan de afuera hacia adentro debido a los empujes del terreno y a las cargas hidráulicas por diferencias de nivel de agua entre el interior y el exterior del pozo.

Para la elección del diámetro de la tubería es preciso tener en cuenta dos factores; en primer lugar el diámetro mínimo deberá ser aquel que permita el paso del agua por las aberturas del filtro, a la velocidad adecuada para que las pérdidas de carga que se produzcan sean aceptables, es decir que no den lugar a un incremento excesivo en el descenso del nivel de agua en el pozo, y también para que esa velocidad no origine un régimen turbulento que, normalmente conlleva al desarrollo de corrosión o incrustación del filtro. En segundo lugar, si el tramo de cañería considerada debe alojar un equipo de bombeo para elevar el agua hasta la superficie, el diámetro de la cañería será como mínimo el de la bomba más una holgura razonable para el descenso y extracción de la bomba y para la circulación del caudal bombeado por el espacio anular entre la bomba y la pared interna de la cañería, con velocidades no superiores a las recomendadas para los filtros.



Foto 39: A la izquierda se observa una entubación con cañería de PVC, mediante roscas. A la derecha, columna de entubación (filtros y caño ciegos) en acero con conexión entre ambos tramos con soldadura eléctrica.

Los filtros corresponden a aquella parte de la columna de entubación cuya principal función es la de permitir la mayor entrada de agua posible al pozo, con un mínimo de pérdidas de carga y totalmente libre de arena. En la actualidad, se fabrican filtros con ranuras de distintos tamaños para adaptarlas a la granometría del acuífero.



Foto 40: A la izquierda se observan filtros de PVC común y especial (con prefiltro adherido a la superficie externa). A la derecha se aprecia un filtro ranura continua de acero galvanizado.

En pozos donde es posible un desarrollo directo sin engravado o prefiltro, se escoge una abertura que deje pasar el 40 % del material de formación, de manera de lograr un entorno del pozo de gran permeabilidad. Las perforaciones que necesitan de un prefiltro se diseñan de manera que ésta retenga todos los sedimentos del acuífero y luego la abertura del filtro se condiciona al 90 % retenido del material prefiltrante.

La longitud óptima de un filtro es función de la geometría y parámetros hidrogeológicos del acuífero a explotar, depende del espesor y del posible descenso dinámico del agua. Por ejemplo, en acuíferos libres, homogéneos y de espesor importante, el filtro se sitúa en la parte inferior de la zona saturada, cubriendo $1/2$ a $1/3$ de la misma. En acuíferos cautivos, es aconsejable colocar filtro sobre el 70 % u 80 % del espesor, con rejilla única o en varios tramos separados. En los acuíferos estratificados, como es natural, se deberá enfrentar los filtros con los estratos más permeables. En cuanto al tamaño de la ranura, se puede decir que en los pozos realizados en formaciones coherentes, serán en general, sólo razones de pérdida de carga. En acuíferos de materiales incoherentes habrá que atender, además de la pérdida de carga, que el agua que atraviesa la rejilla no arrastre partículas sólidas. Para diseñar adecuadamente la abertura del filtro deben realizarse análisis granulométricos del material acuífero, eligiendo según el resultado de este análisis, el tamaño de la abertura.

4.2. Rellenos de Gravas o Prefiltros

La colocación de material prefiltrante es un procedimiento que consiste en colocar grava o arena seleccionada entre el filtro y la pared del pozo frente al acuífero, aumentando el área de ingreso y obteniendo mayor eficiencia. Para hacer este prefiltro deberá perforarse con un diámetro mayor al del filtro a instalar, e introducir en el espacio anular el relleno.



Foto 41: A la izquierda material prefiltrante constituido principalmente por cuarzo. A la derecha, material prefiltrante procedente de fragmentos líticos.



Foto 42: Material prefiltrante altamente seleccionado y redondeado de cuarzo.

El material prefiltrante sólo se coloca en acuíferos compuestos de materiales inconsolidados, pues, colocados enfrente de formaciones consolidadas no tiene sentido, porque se introduce una pérdida de carga adicional. Es preciso aclarar, que no en todos los casos de acuíferos porosos es necesario colocar un prefiltro, las ventajas y desventajas han sido motivo de interminables discusiones. Se ha observado que dichos rellenos se justifican únicamente en los siguientes casos:

- ✓ En acuíferos pobres, constituidos por materiales de grano fino, de los que se requiere el máximo caudal.
- ✓ Para estabilizar acuíferos muy heterogéneos.
- ✓ En acuíferos de areniscas pobremente cementadas con importante permeabilidad por fisuración.
- ✓ En acuíferos de pobre espesor (lentes) incluidos dentro de un fuerte espesor de materiales impermeables.
- ✓ Casos en que sea necesario dar mayor abertura al filtro por problemas de aguas incrustantes.
- ✓ En ausencia de filtros adecuados.

Existen distintos métodos para seleccionar el material del relleno pero todos, comienzan con el análisis e interpretación de las características y gradación de los materiales que integran el acuífero, para ello es necesario realizar un análisis mecánico sobre las muestras obtenidas, mediante el **tamizado** de las mismas, es decir, la **curva granulométrica**. En este punto se debe recordar entonces que uno de los aspectos más sobresalientes para lograr el éxito en la elección del prefiltro es contar con una muestra representativa del acuífero, lo que señala claramente la importancia del muestreo litológico utilizando el concepto del tiempo de retorno.

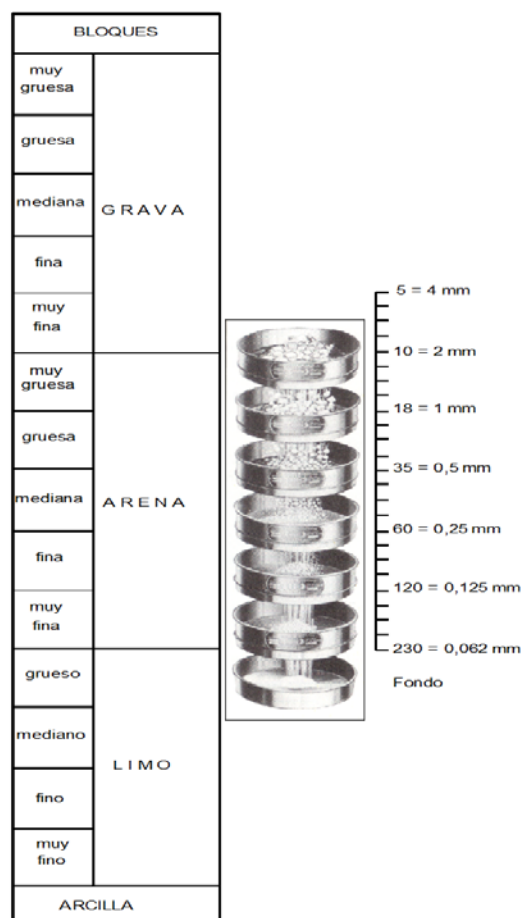


Ilustración 38: Tamizado de muestras de sedimentos para construcción de curva granulométrica.

Cuando la granometría del acuífero permite diseñar un pozo sin prefiltro, la práctica indica que las aberturas del filtro deben retener el 60 % del material acuífero dejando pasar el resto durante el desarrollo y creando, de esta manera, un entorno de gran permeabilidad en los alrededores del pozo.

Los distintos métodos de selección del prefiltro son varios: entre los más usados se mencionan el de Johnson, el del U.S. Bureau of Reclamation y el método de Arens. El **método Johnson** utiliza papel con escalas aritméticas; el eje de las abscisas representará las medidas de las mallas de los tamices, con origen cero y aumentando hacia la derecha, el de ordenadas representará los valores porcentuales acumulativos retenidos sobre los tamices, de 0 a 100 % aumentando hacia arriba. La unión de los puntos obtenidos con este procedimiento, da origen a la curva granométrica del sedimento.

La curva se obtiene de la siguiente manera:

- a) La medida en que la curva del sedimento corta a la ordenada del 70 % se multiplica por un factor entre 4 y 6 (4 para arenas finas uniformes y 6 para arenas más gruesas y de poca uniformidad). Se obtendrá un valor sobre las abscisas que será la medida del 70 % de la curva del material prefiltrante y constituirá el primer punto de la curva que se desea construir. Luego, por ese punto, se traza una curva suave con un coeficiente de uniformidad aceptablemente bajo, preferentemente menor que el CU de la curva del sedimento del acuífero y no mayor de 2,5.
- b) La ranura del filtro será la medida de las abscisas a la cual le corresponde el 90 % de granos retenidos. Recordar que en pozos con rellenos de material prefiltrante, el filtro debe retener el 90 %.
- c) Una vez trazada la curva de porcentajes acumulados, se eligen 3 ó 4 medidas de tamices comunes para zarandas y para cada una de ellas se lee el porcentaje correspondiente. Cada cifra tendrá una tolerancia de 8 % en más y en menos, es decir, si se leyera 46 % para un tamiz dado, el valor práctico oscilará entre 38 % y 45 %.
- d) Hay otro requisito para que el engravado resulte satisfactorio. Para evitar perturbaciones en el emplazamiento, independientemente de la gradación, los integrantes del prefiltro no deben ser mayores de 13 mm, también es conveniente que sean bien redondeados con menos del 10 % de componentes planares y menos del 5 % de blandos y terrosos.

El Coeficiente de uniformidad (CU) es la razón del tamaño d_{40}/d_{90} (Retenido). Este coeficiente tiene significación para materiales bien graduados, sin embargo, a los fines del diseño de las perforaciones un $CU < 3$ representa materiales de grano uniforme y si es mayor a sedimentos heterogéneos.

4.3. Cementación

Aparte de las cementaciones que se realizan con el objeto de formar un tapón de sellado en el fondo del pozo, o de las que se hacen en algunos casos durante la perforación para corregir desviaciones (o a veces para realizarlas), la principal finalidad de una cementación es la unión de la tubería con la pared del pozo. Con este procedimiento se consigue evitar que las aguas superficiales contaminen los acuíferos, aislar la comunicación entre dos acuíferos de distinta calidad física y química, aumentar la resistencia mecánica y a la corrosión de la cañería de entubación.

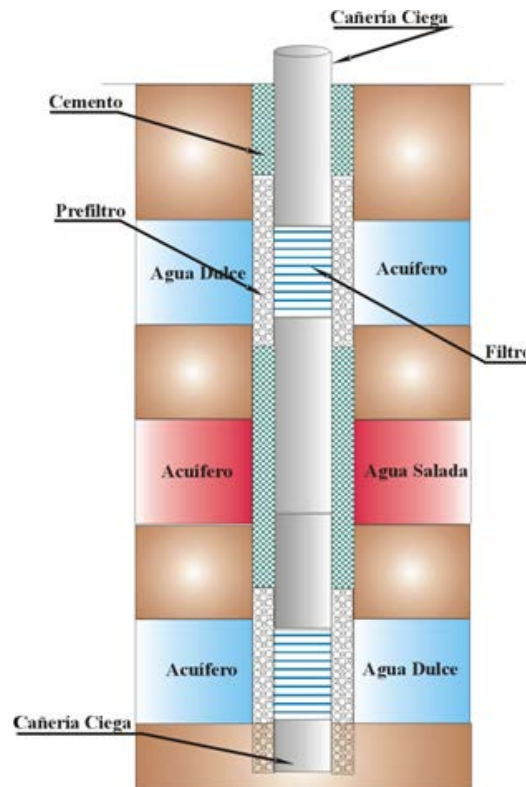


Ilustración 39: Esquema de aislación por cementación de un acuífero portador de agua salada, con acuíferos con agua dulce.

Para realizar la cementación, se usan suspensiones de cemento o bentonita y cemento, con agua. Las primeras son más estables que las que contienen bentonita y son más estables cuanto mayor es la dosificación de éste. Normalmente la adición de bentonita disminuye algo la resistencia, pero también reduce la retracción y favorece el manejo de la suspensión de cemento. A modo orientativo, para la cementación de pozos de agua, debe utilizarse una relación cemento/agua, comprendida entre 1,80 y 2,25, lo que equivale a emplear entre 22 y 27 litros de agua por cada 50 kilos de cemento. Cuando se añade bentonita, en general se utiliza una pequeña cantidad, entre 1,5 y 3,0 kilogramos por cada 50 Kg de cemento. Por último, debe tenerse siempre presente el tiempo de fraguado y la posibilidad de aumentar o disminuir la velocidad de fraguado. Los procedimientos usuales son:

- a) Introducción de la cañería de revestimiento con el pozo lleno de lodo o agua

Se llena el pozo con la suspensión de cemento, que puede hacerse por gravedad desde la boca de pozo, o con una cañería de cementación de 2" de diámetro hasta la zona a cementar, por la que se vierte el cemento. Si el pozo se encuentra lleno de lodo, el cemento desplazará a éste por su mayor densidad. Este procedimiento de cementación de tuberías está indicado fundamentalmente para profundidades relativamente pequeñas.

- b) Inyección a presión por el interior de la tubería con tapón perdido

En este procedimiento se cierra con una platina o chapa el extremo superior de la cañería de entubación y se la suspende en el aire unos 30 o 40 centímetros. Previamente se coloca un tapón de material fácilmente perforable (tapón de madera o caucho) y se inyecta el cemento mediante el accionar de una bomba, desplazando el lodo contenido en el interior de la tubería por el espacio anular, hasta que éste sale a superficie. Luego se continúa la inyección de cemento hasta el volumen previamente calculado y luego se inyecta agua o inyección de bentonita hasta que parte del cemento sale a superficie. Para realizar la cementación, se usan suspensiones de cemento o bentonita y cemento, con agua. Las primeras son más

estables que las que contienen bentonita y son más estables cuanto mayor es la dosificación de éste. Normalmente la adición de bentonita disminuye algo la resistencia, pero también reduce la retracción y favorece el manejo de la suspensión de cemento. A modo orientativo, para la cementación de pozos de agua, debe utilizarse una relación cemento/agua, comprendida entre 1,80 y 2,25, lo que equivale a emplear entre 22 y 27 litros de agua por cada 50 kilos de cemento. Cuando se añade bentonita, en general se utiliza una pequeña cantidad, entre 1,5 y 3,0 kilogramos por cada 50 Kg de cemento. Por último, debe tenerse siempre presente el tiempo de fraguado y la posibilidad de aumentar o disminuir la velocidad de fraguado.

4.4. Verticalidad y Alineación

La explotación de los pozos para agua se realiza mediante una bomba, en la mayoría de los casos con una electrobomba, es decir con el motor sumergido en el agua. Otras veces se puede utilizar una bomba con el motor en superficie (bomba de eje) y también mediante el accionar de un molino o manualmente. En los dos primeros casos, para que sea posible alojar la bomba o la cañería de impulsión dentro del pozo, es preciso que éste se encuentre vertical y sobre todo, rectilíneo. Las tolerancias en estos dos parámetros deben ser las que permitan la colocación de la bomba sin roces con la cañería de entubación. La experiencia indica que **es más importante la alineación** que la **falta de verticalidad**, puesto que esta última, siempre y cuando no sea muy acusada, no impide la introducción de la bomba y la cañería de impulsión. Por ello, mientras se perfora y si se sospecha que existe desviación se deberá corregirla de inmediato, sea entubando el pozo (cañería guía) o cementando todo o parte del pozo y reperforar nuevamente. Para la comprobación de la verticalidad y alineación se puede aplicar varios métodos.

4.5. Desarrollo

Las operaciones de desarrollo deben constituir parte integrante del proyecto y construcción de toda perforación. En terrenos incoherentes el desarrollo tiene por objeto eliminar las fracciones más finas del material acuífero en las inmediaciones del filtro; con ello se estabiliza la formación y se alcanza una granometría más gruesa y uniforme en dicha zona; de esta forma se obtiene una mayor capacidad específica del pozo y se favorece la vida útil.

El desarrollo tiene también por objeto corregir los daños y obstrucciones que se pudieran haber ocasionado en el acuífero durante las tareas de perforación. Este aspecto deberá tenerse en cuenta cuando se trabajó con el método rotary con el empleo de lodos de perforación. El objetivo último del desarrollo de un pozo, es entonces, lograr el máximo rendimiento posible, es decir, la mayor capacidad específica.

El caudal específico o capacidad específica (Q_e) de un pozo se define como la relación existente entre el caudal de bombeo (Q) y la depresión (s) originada en el pozo para ese caudal. Como el caudal se expresa en m^3/h y la depresión en metros; el caudal específico tiene dimensiones de $m^3/h/m$; es decir que hace referencia al caudal que se puede obtener en una unidad de tiempo, por cada metro de depresión de la columna de agua en el pozo.

$$Q_e = \frac{Q}{s}$$

En la práctica el desarrollo de pozos se puede realizar de diferentes maneras, habrá que tener siempre presente en el medio geológico en la que fue realizada la perforación. Esta puede ser efectuada en medios consolidados o inconsolidados. En un medio inconsolidado se puede realizar por:

1. Métodos Unidireccionales

- a) Autodesarrollo: Bombeo y recuperación o caudales crecientes.
- b) Bombeo intermitente: Bomba sin válvula de retención. Al parar la bomba el agua vuelve al acuífero.
- c) Sobrebombeo: Bombear a caudal elevado, creando un gran descenso y gradiente que produce el arrastre de partículas finas. Tiene algunas dificultades porque puede ocasionar derrumbes.
- d) Adición de CO₂ sólido: Tiene los mismos efectos que un sobrebombeo, produce una licuación rápida, se sublima y pasa a gas, lo que proyecta violentamente el agua al exterior.



Foto 43: Izquierda, inicio del desarrollo mediante sobrebombeo (agua turbia). Derecha, pozo desarrollado (agua clara). Localidad de Vaca Perdida, provincia de Formosa.

2. Métodos Bidireccionales

- a) Aire comprimido: Descargar y bombear con aire comprimido.
- b) Pistoneo: Obturar por encima del filtro; descargar y bombear repetidamente.
- c) Chorro horizontal de agua: Generalmente agua más polifosfatos o hipoclorito de sodio.



Foto 44: Desarrollo de pozo con aire comprimido. Izquierda, compresor con manguera de inyección de aire al pozo. Derecha, producción de agua. Salar del Hombre Muerto (provincia de Catamarca).

4.6. Bombas

Una vez finalizado el pozo y habiéndose cumplido todas las tareas de entubado, engravado, limpieza, desarrollo, ensayos de bombeo y acondicionamiento del lugar, deberá instalarse algún tipo de bomba para elevar el agua desde el pozo y conducirla hasta el punto en que la misma se utilizará, de acuerdo a las necesidades. Una bomba no desarrolla energía propia, simplemente transfiere la fuerza desde una fuente de energía cualquiera (energía eléctrica, eólica, solar, etc.), para poner en movimiento el líquido. Se debe tener presente que la aspiración que ejerce una bomba no depende de ninguna fuerza aplicada directamente al agua por la bomba misma, sino de la presión negativa que se desarrolla a la entrada de ésta (Johnson, 1975). Esta presión negativa o de succión consiste en la acción de atraer un fluido hasta una tubería o una cámara de bombeo, mediante la producción de un vacío parcial, es decir reduciendo la presión por debajo de la atmosférica. Dentro de un pozo, la presión atmosférica sobre la superficie libre del agua obliga a esta última a subir y a desplazarse hasta aquella parte de la bomba en que se ha desarrollado una presión menor (succión o aspiración). Existen varios tipos de bombas que pueden clasificarse en líneas generales en dos grandes grupos:

1. Bombas de desplazamiento constante: Suministran siempre la misma cantidad o volumen de agua, contra cualquier carga que esté dentro de su capacidad de funcionamiento. Dentro de este tipo se encuentran:
 - ❖ Bombas de émbolo
 - ❖ Bombas rotatorias
 - ❖ Bombas helicoidales
2. Bombas de desplazamiento variable: entregan agua en cantidades que varían inversamente con la carga contra la cual están operando. Dentro de este tipo se encuentra:
 - ❖ Bombas centrífugas
 - ❖ Bombas de eyector
 - ❖ Bombas de inyección de aire

En la actualidad, los equipos de bombeo más empleados en la producción de agua de pozos están conformados por las bombas de motor sumergido o electrobombas sumergibles. Este tipo de bomba consiste de una bomba centrífuga, acoplada a un motor eléctrico que puede funcionar sumergido en el agua (debidamente aislado y sellado). Las electrobombas sumergibles que, fundamentalmente consisten de dos partes: una inferior donde se encuentra en una unidad sellada el motor eléctrico (bobina eléctrica) y una superior donde se localizan los impulsores. La potencia de la bomba (HP) está determinada fundamentalmente por el motor eléctrico y éste, por las características de la bobina. De esta manera, existe en el mercado distintas marcas y cada una de ellas ofrece un variado número de equipos de bombeo, de acuerdo a las necesidades de cada situación.

En la actualidad las electrobombas sumergibles se ofrecen desde aquellas de pequeño diámetro y potencia (1 ½" hasta 10" o más de diámetro y elevados caudales de producción) a distinta profundidad. La electrobomba está conectada a la fuente de alimentación eléctrica a través de un cable especial y éste a un tablero o comando de protección y desde allí a la red eléctrica o grupo generador.



Foto 45: Electrobomba sumergible. A la derecha, esquema del motor (parte inferior) y de las turbinas (parte superior).

A diferencia de las bombas de eje, que constan igualmente de un cuerpo sumergido donde solamente se encuentran los impulsores (no tienen motor eléctrico), las electrobombas tienen la enorme ventaja de eliminar el largo impulsor (doble juego de caños) que necesitan las primeras y que, mediante la acción de un motor externo (transmiten el movimiento a las varillas o impulsor) y éste al sistema de turbinas o impulsores.

La otra notable ventaja de las electrobombas es que se ajustan mejor si es que en el pozo llegase a existir desviaciones en la verticalidad. Una bomba de eje necesita un pozo sin desviaciones; sin embargo una electrobomba puede ajustarse a esas situaciones siempre y cuando la falta de verticalidad no sea extremadamente grosera.

Las bombas de transmisión, a diferencia de las anteriores, la toma de fuerza se encuentra externa y se puede accionar mediante un sistema cardánico o con poleas desde un motor a explosión o motor eléctrico. Normalmente, las bombas de eje se utilizan para la etapa de desarrollo del pozo, cuando todavía se produce mucho ingreso de material sólido (arenas y limos) que suelen dañar rápidamente a una electrobomba, lo que significa una importante ventaja.



Foto 46: Bomba de eje. Se observa cabezal sobre el pozo y correas de distribución accionada por motor cardánico (atrás).

4.7. Video Filmación de Pozos y Diagnóstico por Imagen

Los estudios de pozos mediante la técnica de video filmación se ha constituido en los últimos años en una poderosa herramienta para el diagnóstico del estado general de un pozo. La video filmación permite observar, entre otros aspectos, si el pozo fue construido de acuerdo al diseño que se presenta en el legajo técnico, la profundidad final de la estructura, la posición de filtros, longitud de tramos filtrantes, estado general de la cañería, estado de soldaduras y uniones entre caños ciegos y entre caños ciegos con filtros, etc.

Existen numerosos equipos de video filmación de pozos, cada uno con características propias, ventajas y desventajas que deben ser convenientemente analizados antes de iniciar el proceso de adquisición. Existen equipos simples, que sirven para inspeccionar pozos relativamente someros (menos de 150 metros), pozos profundos (hasta 500 metros) y muy profundos (más de 1500 metros). A medida que se pretende inspeccionar pozos más profundos los precios de estos equipos se incrementan en forma casi exponencial, esto es debido fundamentalmente a las características de sumersión de la cámara de filmación, a la longitud del cable transmisor de la señal y por supuesto, a la estructura del carretel de superficie. Existen equipos que permiten tener únicamente una imagen de posición cenital y otros, más complejos, que permiten tener una visual cenital y otra de 360 °. En la actualidad, la gran mayoría de los equipos viene con un monitor incorporado a la consola de control y salidas para grabar la imagen en formato digital que luego puede ser editada.

La video filmación de pozos permite verificar y observar con mucha precisión si la etapa de limpieza y desarrollo de los tramos filtrantes se hizo convenientemente ya que, entre otros, es posible observar con mucho detalle si es que en los tramos filtrantes están parcial o totalmente obturados por restos de inyección usada en la perforación. Debido a esta razón, esta herramienta debería utilizarse siempre en forma inmediata a la terminación de un pozo, es decir antes de iniciar incluso un ensayo de bombeo. Por supuesto, también es posible advertir si los filtros se encuentran en buen estado mecánico o no (roturas).

La filmación de pozos es muy conveniente en aquellos pozos de los cuales se desconoce su diseño (sea porque no tienen legajo técnico, porque se extraviaron o porque fueron construidos por idóneos que no realizan esa tarea tan importante). Con esta herramienta entonces, es posible reconstruir un legajo ya que se pueden localizar los tramos de cañería ciega, los tramos y tipos de filtros, la ubicación de cada tramo filtrante, el nivel estático, el fondo actual del pozo y, en muchas ocasiones, también es posible advertir si existen elementos extraños dentro de la captación.

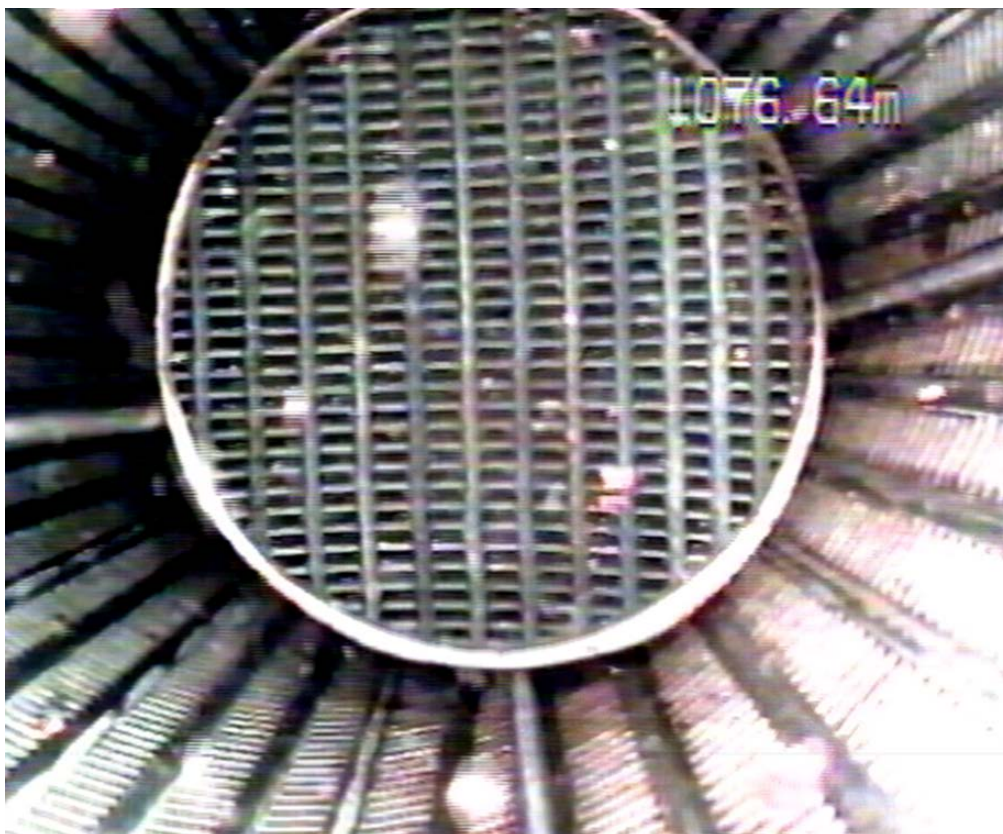


Foto 47: Estado de limpieza de filtros luego de finalizado el desarrollo y limpieza (filtros limpios).

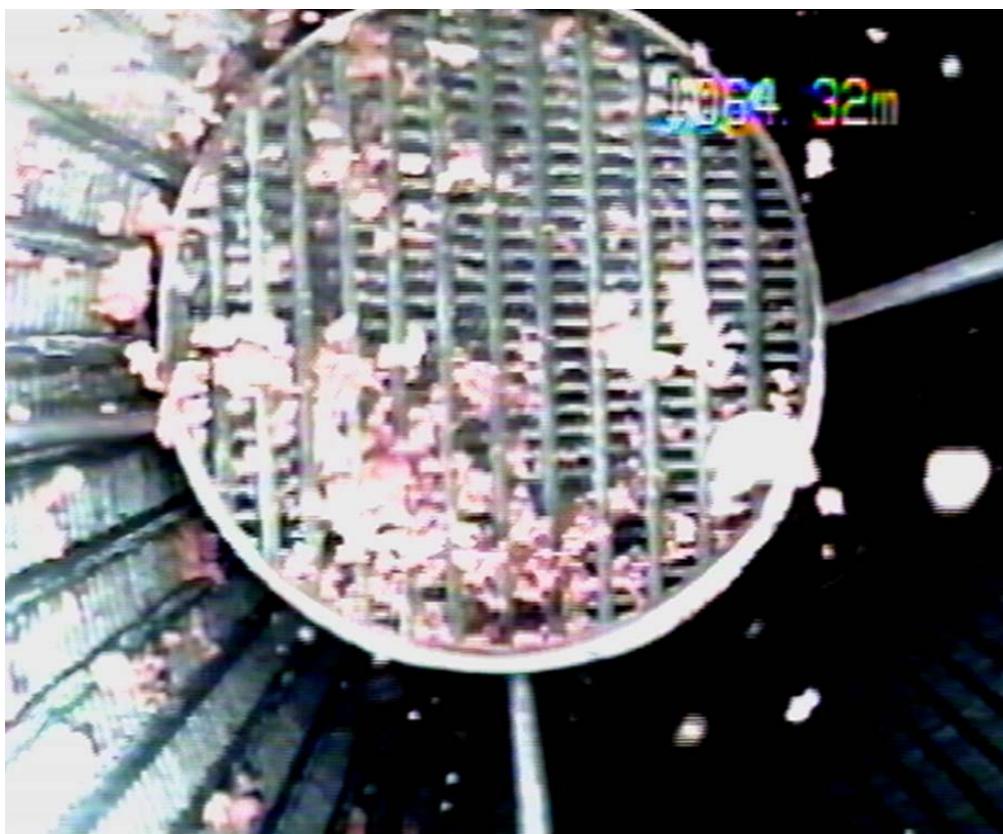


Foto 48: Estado de filtros luego del desarrollo y limpieza (se observan restos de bentonita).



Foto 49: Filtros totalmente obturados por precipitados de carbonato de calcio.

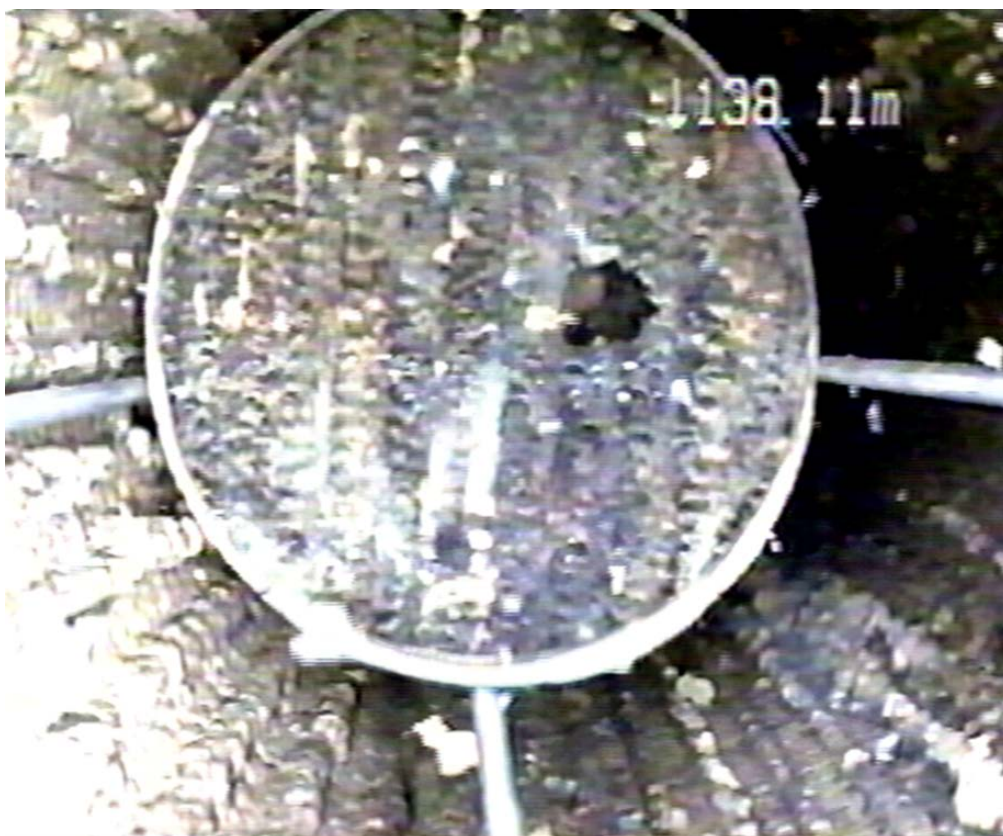


Foto 50: Filtro tapizado de carbonatos y roto.

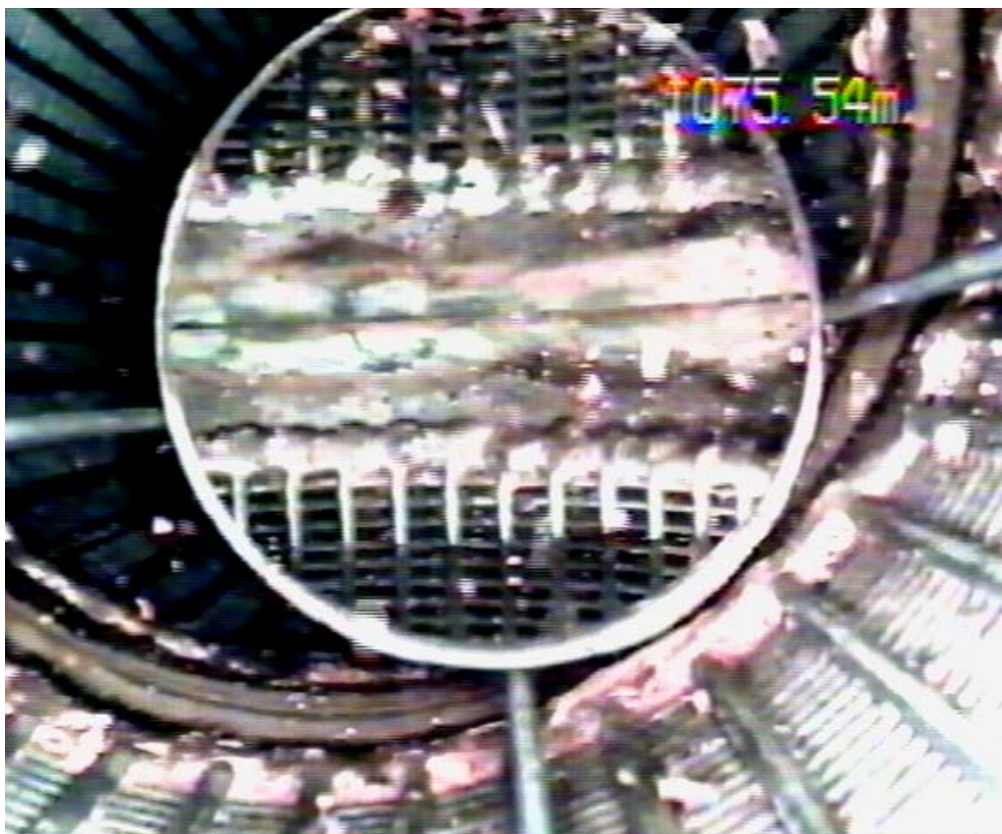


Foto 51: Observación del estado físico de la unión de soldaduras entre caños.

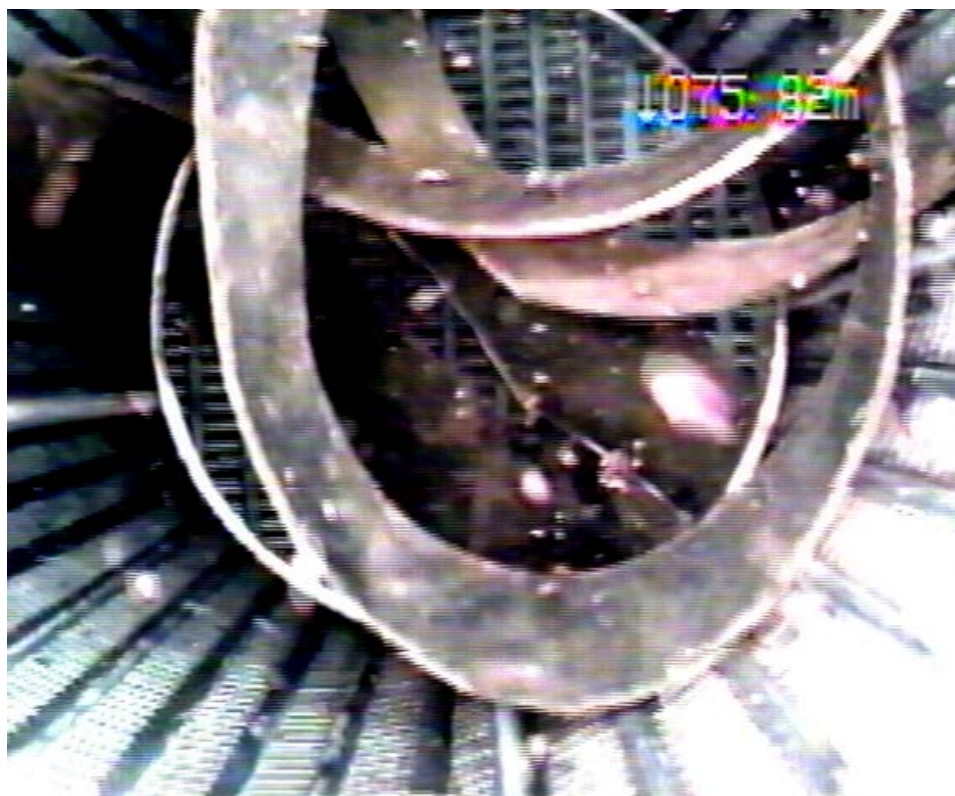


Foto 52: Elementos extraños dentro del pozo.

4.8. Actividad bacteriana en Pozos

Las características físicas - químicas del agua pueden favorecer la presencia de flora bacteriana y, específicamente, la presencia de bacterias reductoras de sulfatos y ferrobacterias, que pueden dar lugar a procesos de corrosión e incrustación dentro de pozos y conductos que transportan agua.

La **agresividad** de un agua depende de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Un agua poco conductora ocasionará que la actividad de las pilas de corrosión que se puedan formar en la misma sea pequeña, ya que el circuito eléctrico que se cierra a través de ella presenta una resistencia eléctrica elevada; mientras que en las aguas con conductividad eléctrica alta, la actividad de los procesos de corrosión es elevada, y en cortos periodos de tiempo se pueden originar fenómenos muy graves.

La acción del agua sobre algunos metales como el hierro puede provocar problemas de corrosión; asimismo, el equilibrio calcio - carbónico del agua proporciona a ésta, propiedades agresivas o incrustantes que se reflejan en las cañerías y sistemas de impulsión, efectos que pueden sumarse a los motivados por procesos microbianos.

Como puede observarse, las formas de corrosión pueden ser diversas. Entre los factores motivadores se encuentran las condiciones del flujo, la composición de los conductos y las características biológicas y físicas - químicas del agua.

La corrosión microbiana puede definirse como un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales, por lo tanto, la diferencia obvia entre la corrosión e incrustación bacteriana en perforaciones y conductos, con la corrosión electroquímica, es la presencia de bacterias involucradas en estos fenómenos.

Entre los diversos grupos bacterianos que pueden dar origen a procesos de bioensuciamiento en pozos y conductos, las más importantes son:

- Bacterias del hierro
- Bacterias del sulfato

Bacterias del hierro

Las bacterias del hierro (BPH) se pueden definir como un grupo de bacterias aeróbicas que utilizan la oxidación de iones ferrosos y/o manganosos como componentes esenciales de su funcionamiento, removiendo hierro de la solución y precipitándolo como hidróxido férrico insoluble en torno a sus células. Además de su capacidad de depositar óxidos e hidróxidos férricos en torno a sus células, muchas de estas bacterias son capaces de producir polisacáridos gelatinosos extracelulares de características adhesivas. Este material extracelular, reviste la superficie externa de la pared celular y sirve como sitio para la acumulación de hidróxido férrico.



Foto 53: Actividad bacteriana en cañería de impulsión de electrobomba.



Foto 54: Actividad de bacterias de hierro en un filtro.

Bacterias reductoras de sulfatos

Las bacterias reductoras de sulfatos (BRS) constituyen un grupo muy diversificado aunque con estrechas relaciones fisiológicas y ecológicas. Aparecen como las principales responsables de los fenómenos de corrosión asistida biológicamente. Su distribución en la naturaleza puede esperarse en cualquier lugar donde se encuentre materia orgánica descomponible, disponibilidad de sulfatos y ausencia de oxígeno.

Métodos para identificar los problemas de taponamiento, incrustación y bioensuciamiento

La combinación de datos operacionales con el conocimiento de los efectos de bioensuciamiento puede usarse para un diagnóstico precoz, el cual será confirmado por análisis posteriores de aguas. Uno de los síntomas que indican condiciones corrosivas en las perforaciones es la existencia de SH_2 (Sulfuro de Hidrógeno o Ácido Sulfhídrico) el cual puede detectarse por su olor.

En general, los grupos bacterianos que suelen estudiarse desde el punto de vista cuali-cuantitativo son los siguientes:

- Bacterias Aeróbicas Totales
- Bacterias Precipitantes del Hierro (BPH)
- Bacterias Reductoras de Sulfatos (BRS)

La confirmación de la Presencia/Ausencia de BRS y BPH se realiza mediante medios de cultivos apropiados para tal fin. Para el análisis cuantitativo de BRS y BPH se utiliza actualmente la técnica de la dilución por extinción que consiste en inocular una serie de frascos de tipo antibiótico que contienen el medio de cultivo de composición acorde al grupo bacteriano que se quiere cuantificar.

La manifestación del crecimiento bacteriano está dada por la turbidez del medio de cultivo que se observa comparando con un frasco sin inocular (blanco) y por los virajes de color que pueden presentar los medios selectivos:

Para la determinación de BRS

- Precipitado negro: debido a la precipitación de SFe (Sulfuro Ferroso).
- Espejado de superficie: ennegrecimiento de la superficie del frasco de cultivo.



Foto 55: Precipitado negro debido a la presencia de bacterias sulforeductoras.

Para la determinación de BPH

- Precipitado ocre y sobrenadante incoloro y turbio: debido a la precipitación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Hidróxido Férrico).



Foto 56: Precipitado ocre debido a la presencia de bacterias de hierro.

Tabla 4: Organismos y géneros más comunes en la actividad bacteriana de pozos.

ORGANISMO	REPRESENTANTES GENEROS	ACTIVIDAD	CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES
FERROBACTERIAS	Gallionella Sphaerotilus-Leptothrix Siderocapsa Sideronema Ferribacterium Sideromonas Naumanniella Ochrobium Crenothrix, Clonothrix	Formación de películas e incrustaciones por la precipitación de Fe y Mn.	Aeróbicos-microaeróbicos, el pH (6-8), Fe^{2+} , 8-16 de C, CO_2 , materia orgánica.
SULFOBACTERIAS	Thiobacillus Thiospira Thiobacterium	Utilizan azufre para producir H_2SO_4	Aeróbicos, el pH (2-5), 10-35°C
BACTERIAS SULFATORREDUCTORAS	Desulfovibrio Desulfotomaculum Desulfomonas	Oxidan H_2 o compuestos orgánicos para convertir el sulfato en sulfuro	Anaeróbicos, Eh reductor o medioambiente reductor, agua fresca o salina, pH (5.5-9), 25-65°C con etapas mesofílica y termofílica.
BACTERIAS CARBONATORREDUCTORAS	Methanobacterium Methanosarcina Methanococcus	Extraen su energía de la oxidación de sustratos orgánicos simples y también pueden utilizar el H_2	Anaeróbicos. Las temperaturas son mayores a 30°C.
BACTERIAS FERMENTATIVAS	Varios	Oxidan materia orgánica y la transforman en ácidos orgánicos.	Anaeróbicos
HONGOS	Varios	Oxidan materia orgánica y la transforman en ácidos orgánicos.	Aeróbicos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Aracil, E. 2002. La tomografía eléctrica como técnica versátil aplicable a la obra civil. En: IV Jornadas de Geotecnia. Vías de Comunicación. Burgos, 9-10 de Mayo de 2002. Servicio Publicaciones Escuela Politécnica Superior Universidad de Burgos.

Astier, J. L. 1975. Geofísica aplicada a la Hidrogeología. Editorial Paraninfo. Madrid.

Balke, K. D. 1994. Well Construction and Water Catchment. International Advanced Studies Course. Hydrogeology and Engineering of Tropical and Subtropical Regions. Institut fur Geologie und Palaontologie, Tübingen, Germany.

Balke, K. D. 1995. Hidrogeología de Regiones Tropicales y Subtropicales. Tomo I. International Advanced Studies Course. Hydrogeology and Engineering of Tropical and Subtropical Regions. Institut fur Geologie und Palaontologie, Tübingen, Germany. Cátedra de Hidrogeología. Universidad Nacional de Salta, Argentina.

Battayneh, A. T., Al-Biabat, A. A. 2002. Application of a two dimensional electrical tomography technique for Investigating landslides along the Amman-Dead Sea highway, Jordan". Environmental Geology, 5 March 2002.

Benítez, A. 1972. Captación de Aguas Subterráneas. Nuevos Métodos de Prospección y de Cálculo de Caudales. Editorial Dossat, SA. 2° Edición, revisada y aumentada. Madrid.

Bobachev, A. 2002. User's Guide of Ipi2win_MT (v. 2.0) Software. Department of Geophysics. Geological Faculty. Moscow State University y Geoscan-M.Ltd.

Castany, G. 1975. Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Conhidro S.R.L., 2006. Diagnóstico Hidrogeológico Finca San Pedro de Yacochuya. Departamento Cafayate. Provincia de Salta. Inédito.

Conhidro S.R.L., 2006 a. Estudio Hidrogeológico Para Abastecimiento de Agua Potable en la Región Oeste de la Provincia de Formosa. Vaca Perdida. Departamento Bermejo. Provincia de Formosa. Inédito.

Conhidro S.R.L., 2008. Estudio de Prefactibilidad Para la Inyección Profunda de Efluentes Salinos en el Yacimiento Caimancito. Caimancito, Departamento Ledesma. Provincia de Jujuy. Inédito.

Conhidro S.R.L., 2008 a. Evaluación Geofísica por el Método de Tomografía Eléctrica. Yacimiento Caimancito. Provincia de Jujuy. Inédito.

Conhidro S.R.L., 2010. Estudios Hidrogeológicos Para Abastecimiento de Agua Potable y la Producción, en Localidades de la Provincia de Formosa. Departamento Patiño – Zona Norte. Sector Este. Inédito.

Custodio, E y M.R Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda Edición Corregida. Editorial Omega. España.

Dahlin, T., Loke, M. H. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. Journal of Applied Geophysics, 38. 237-249 pp.

- Davis, S y R. De Wiest. 1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel. Barcelona, España.
- Driscoll, F.G. 1986. Groundwater and Wells. Johnson, 1089 pp.
- Egbert, G. and Booker, J., 1987. Robust estimation of geomagnetic transfer functions, Geophys. J. R. Astron. Soc. 87, 173-194.
- Fetter, C.W. 1988. Applied Hydrogeology. Second Edition. Macmillan.
- Freeze, R.A. y J.A. Cherry (1979). Groundwater. Prentice Hall. 604 pp
- García, R. F. 2003. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Tema 10. Cátedra de Geofísica. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.
- García, R.F. 2004. Estudio Hidrogeológico en la zona de Corralito – Las Conchas. Departamento Cafayate. Provincia de Salta. Secretaría de Obras Públicas. Gobierno de la Provincia de Salta. Inédito.
- García, R; Rocha V; Moya Ruiz F; Tálamo E; García Ortiz, M; Favetto, A, Pomposiello, C y J. Vargas Yegros. 2008. Hidrología Subterránea Profunda de la Provincia de Formosa. República Argentina. Modelo Geoeléctrico – Magneto Telúrico. IX Congreso AIHSUD. Quito. Ecuador.
- García, R. F.; Moya Ruiz, F.A; Rocha Fasola, M. V; Vargas Yegros, J. C. L; Gigli, M.M; García Ortiz, M.F y E. Tálamo. 2010. El Agua Subterránea en Formosa. El Programa Esmeralda. ISBN 978-987-27407-3-3.
- García Maurizzio, R. F. 2013. Geología de los Recursos Hídricos. 1° Edición, Salta. Asociación Civil Grupo Argentino. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. AIH. Grupo Argentino. Universidad Nacional de Salta. ISBN: 978-987-27407-2-6.
- García, R. F. 2014. Captación de Aguas Subterráneas. Maestría en Ciencias Hídricas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. Curso de postgrado.
- García, R. F. 2015. Hidráulica de Captaciones. Maestría en Ciencias Hídricas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa. Curso de postgrado.
- García, R. F. 2017. Exploración y Captación de Aguas Subterráneas. Doctorado en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Curso de postgrado.
- Issar, A and R Passchier. 1990. Hydrogeologic Provinces. Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. International Association of Hydrogeologists. Hense GmbH & Co KP. Hannover.
- Johnson, Screens. 1975. El Agua Subterránea y Los Pozos. Wheelabrator Clean Water Inc. St. Paul.
- Kliméntov, P.P y V.M. Kónonov. 1982. Metodología de las Investigaciones Hidrogeológicas. Editorial Mir. Moscú.
- Loke, M. H. 1994. The inversion of two-dimensional resistivity data”. Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.

Loke, M. H. 2000: Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham web site, downloads: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html

Orellana, E. 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2ª ed. Madrid. Paraninfo. Vol.1.

Paredes Davis, M. D. 2017. Aplicación y Comparación de los Principales Dispositivos Electrónicos en la Prospección Geoeléctrica. Tesis Profesional. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. (Inédito).

Pomposiello, M.C., Booker, J and Favetto A. 2004. A discussion of bias in MT response, Geophysics.

Pulido Carrillo, J. L. 1978. Hidrogeología Práctica. Editorial Urmo, SA. Bilbao. España.

Smith, J.T., Booker, J. 1991. Rapid inversion of two - and three dimensional magnetotelluric data. J. Geophys. Res. 96, 3905–3922.

Tóth, J. 1970. A Conceptual Model of the Groundwater Regime and the Hydrogeologic Environment. Journal of Hydrology 10: 164 – 176.

Vilela, C. R. 1970. Hidrogeología. Universidad Nacional de Tucumán. Fundación e Instituto Miguel Lillo. Opera Lilloana XVIII (Op. Lill). Tucumán. República Argentina.

Vitulli, N. V. 2004. Perfilaje de Pozos. Principales Perfilajes de Pozos Abiertos y Pozos Entubados. Principios, Objetivos e Interpretación. Unidad 15. Cátedra de Geofísica. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.