

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA Y
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

CURSO REGIONAL DE CAPACITACIÓN EN LA PROSPECCIÓN DE URANIO

BUENOS AIRES, 8 de septiembre - 31 de octubre 1969

III. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN URANÍFERA

~~7.0.~~ LA PROSPECCIÓN ELÉCTRICA DEL SUBSUELO

ING. RAIMUNDO J.A. JEMEA

LA PROSPECCION ELECTRICA DEL SUBSUELO

RAIMUNDO J. A. JEMMA

Comisión Nacional de Energía Atómica

INTRODUCCION.

En las investigaciones geofísicas que se efectúan para localizar cuerpos mineralizados o determinar estructuras regionales o locales, se dispone hoy en día de numerosos métodos de prospección cuya aplicación puede resultar de gran utilidad al geólogo y al técnico de minas.

Para este propósito la geofísica aprovecha en algunos casos ciertos fenómenos naturales, tales como el magnetismo terrestre, los potenciales eléctricos naturales del terreno, las corrientes telúricas, la radiactividad y la fuerza de la gravedad, cuyas anomalías están vinculadas muy a menudo con la estructura del subsuelo o con la presencia de determinados materiales que producen una alteración en la intensidad de las fuerzas que caracterizan los fenómenos mencionados.

En las técnicas operativas correspondientes, el prospector no interviene en ninguna manera para crear o modificar el fenómeno que se aprovecha para realizar la prospección, y de las mediciones que él efectúa en la superficie del terreno puede deducir si existen anomalías magnéticas, polarización eléctrica espontánea de ciertas áreas, anomalías radiactivas y anomalías gravimétricas, cuyos parámetros permiten, a veces, localizar con exactitud cuerpos mineralizados, como asimismo determinar su profundidad, rumbo y buzamiento.

En otros casos es el prospector el que crea las condiciones físicas necesarias para efectuar la investigación del subsuelo, aplicando en el campo las experiencias realizadas en el laboratorio sobre modelos artificiales.

Es lo que ocurre con el empleo del método sísmico y de los eléctricos de corriente continua y alternada con sus numerosas variantes.

Al lado de los métodos geofísicos fundamentales, se han ido desarrollando también el geotérmico, todavía poco difundido pero susceptible de más amplia aplicación, y el geoquímico que ya se manifiesta como una rama vigorosa de la prospección geotécnica.

Con estas herramientas y con estudios geológicos previos, el conocimiento de las condiciones estructurales del subsuelo, como así también la delimitación de cuerpos mineralizados ocultos, no presentan más las dificultades con las cuales se tropezaba hasta comienzos de este siglo, y en muchos países ya no se perfora más en búsqueda de petróleo y de otros materiales útiles sin haber realizado primero una investigación geoquímica y geofísica adecuadas. En lo que concierne a la geofísica, el éxito de las investigaciones depende en gran parte de la experiencia que el prospector adquiere en el campo, de las condiciones naturales de la región a explorar, y de los métodos que se eligen para realizar la prospección. Es evidente, por ejemplo, que la aplicación del método gravimétrico en la localización de una napa acuífera estaría destinado a un completo fracaso. De aplicar el método sísmico, las distintas velocidades de propagación de las vibraciones del terreno producidas por explosiones o por otros medios, si bien pueden proporcionar datos muy precisos acerca de la estructura del subsuelo, no garantizarían si un estrato arenoso contiene o no agua. En cambio, el método eléc-

trico de resistividad puede proporcionar datos muy útiles, por cuanto un acuífero presenta una resistividad muy baja, mientras que un estrato arenoso sin agua da valores de resistividad elevados.

Interesa pues que el prospector conozca los distintos métodos geofísicos que puede utilizar en las prospecciones mineras o hidrológicas, los alcances que tienen, los inconvenientes que pueden presentarse en determinados terrenos y la manera de subsanarlos. A continuación se señalan los métodos fundamentales de prospección geofísica, y al lado de cada uno de ellos los correspondientes trabajos de campo que se pueden realizar con buenos resultados. Esto servirá de orientación tanto al operador geofísico que recién se inicia en la prospección del subsuelo, como al geólogo que necesite mayores informaciones acerca de la estructura y litología de una región todavía no reconocida geológicamente, o de las condiciones locales de una determinada zona.

A) Método sísmico: Estudios estructurales profundos; investigaciones petrolíferas, etc.

B) Método gravimétrico:

Estudios estructurales de vastas regiones, principalmente vinculadas a las investigaciones petrolíferas; estudios relacionados con el dinamismo terrestre, geodesia, minería, etc.

C) Método magnetométrico:

Localización de minerales paramagnéticos y diamagnéticos.

D) Método radimétrico y emanométrico:

Localización de minerales radiactivos y de fallas o fracturas en las que circulan aguas o gases radiactivos.

E) Métodos eléctricos de contacto:

1) de polarización espontánea o de los potenciales naturales:

Localización de cuerpos mineralizados que dan lugar a polarización espontánea del terreno (sulfuros en general, antracita, grafito).

2) de polarización inducida:

localización de yacimientos metalíferos que no dan potenciales naturales.

3) de resistividad:

Localización de cuerpos mineralizados que no producen potenciales naturales, localización de paleocanales, etc.

F) Métodos eléctricos inductivos:

1) de la espira:

Localización de cuerpos mineralizados conductores y no conductores, cuando los métodos de contacto resultan ineficientes.

2) electromagnético:

Prospección en regiones desérticas, nevadas, boscosas, etc.

Los dos primeros métodos mencionados representan una valiosa ayuda en la exploración de grandes regiones de la Tierra, y se aplican casi exclusivamente en investigaciones de yacimientos de petróleo, pero resultan prácticamente inaplicables en exploraciones mineras o hidrológicas por obvias razones técnicas y especialmente económicas, aunque recientemente se hayan obtenido alentadores resultados con un equipo microsísmico diseñado para efectuar estudios de terrenos en proyectos de ingeniería vial, de construcción de plantas industriales, etc.

A los efectos de la localización de yacimientos nucleares, una vez finalizados los trabajos de prospección general que comprenden un exhaustivo estudio geológico regional, prospección geoquímica y prospección radimétrica aérea, se pasa a la prospección geofísica aplicando los métodos radimétrico, eléctrico y emanométrico de detalle.

LOS METODOS ELECTRICOS.

Como ya se dijo pueden agruparse en dos categorías: los eléctricos de contacto y los inductivos. Con los primeros las mediciones se realizan por conducción directa de una corriente (continua o alternada) mediante cables y dispositivos apropiados que conectan los aparatos de medición con el terreno. Con los métodos inductivos, la prospección se efectúa creando campos eléctricos alrededor de los cuerpos mineralizados ocultos en el subsuelo y detectando dichos campos mediante bobinas de inducción o también empleando aparatos transmisores-receptores de ondas electromagnéticas.

Los métodos eléctricos de contacto son los que más comúnmente se emplean en regiones de fácil acceso, mientras que los inductivos se emplean donde los de contacto no pueden aplicarse a causa de las condiciones superficiales del terreno: regiones cubiertas por espesas capas de hielo, de arenas (desiertos), zonas cubiertas por densa vegetación tropical, o también áreas con topografía muy accidentada. También existen técnicas para aplicar estos últimos, desde aeronaves que sobrevuelan el terreno a investigar.

METODO DE LA POLARIZACION ESPONTANEA.

Entre los procedimientos de prospección eléctrica más económicos y rápidos empleados en la localización de determinados cuerpos mineralizados (sulfuros o minerales mixtos con sulfuros), la geofísica dispone de una técnica que se ba-

sa en las mediciones de los potenciales naturales del terreno (P.N.) cuyos valores aumentan o disminuyen acercándose o alejándose de la zona en que están ocultos los cuerpos mineralizados que originan las diferencias del potencial natural del terreno. Ello se debe a fenómenos electro-químicos que se establecen entre el mineral y las aguas que circulan en el subsuelo, comportándose el conjunto como una pila eléctrica natural. Estos fenómenos se producen sobre determinadas formaciones mineralizadas y sobre algunos minerales metalíferos, cuando sus extremos se hallan en diferentes condiciones de estructura o de presión, y en contacto con soluciones de diferente concentración de iones.

En efecto, una masa de sulfuros, de forma más o menos alargada, encajada en el terreno, que atraviesa el nivel hidrostático de la región, resultaría oxidada en la parte superior por el contacto con las aguas de infiltración, ricas en oxígeno atmosférico, que atacan el mineral y dan lugar a la formación de ácido sulfúrico. Este, a su vez, origina entre las aguas superficiales y las profundas una disimetría electrolítica por la diferente distribución de iones que se forman en la zona de oxidación, de manera que entre el mineral y la solución en que está sumergido no habrá equilibrio eléctrico y se producirá una diferencia de potencial entre los extremos superior e inferior de la masa mineralizada. Bajo estas condiciones se establece una corriente eléctrica que tiende a compensar la disimetría que existe entre las dos fases en contacto (sulfuros y electrolito), aportando oxígeno desde la zona superior a la parte profunda del yacimiento, e hidrógeno naciente desde las partes profundas a la cúspide del cuerpo mineralizado (fig. 1).

La corriente eléctrica que atraviesa el mineral y pasa por el terreno adyacente produce en la superficie una

anomalía eléctrica con un centro negativo, la cual se evidencia midiendo el gradiente del potencial que aparece alrededor de dicho centro y que constituye una especie de proyección, en el área prospectada, de los contornos de la masa mineralizada.

Una condición esencial para que tenga lugar el fenómeno de la polarización espontánea es que la formación mineralizada posea una buena conductividad eléctrica. Para ello no es necesario que exista una masa compacta de mineral; puede también estar constituida por pequeñas lentes y hasta pequeños cristales de sulfuros, diseminados en un banco sedimentario, entre los cuales haya sin embargo suficiente humedad que asegure una continuidad de contacto eléctrico. Por el contrario, en una veta de mineral aparentemente bien compacto y con tínuo, pero cuyos cristales estén separados uno de otro por una película de ganga aislante de baritina, calcita o cuarzo, aunque de espesor microscópico, el fenómeno de la polarización espontánea no se produce, faltando la continuidad del contacto eléctrico entre los elementos que componen la masa mineralizada.

Lo mismo ocurre en los yacimientos que están constituidos por óxidos y en los sulfuros que no llegan a la zona profunda y no pasan el nivel hidrostático. Un ejemplo de este último tipo de yacimiento es el de Pampa Amarilla, al sur de Malargüe, donde hay una veta de mineral de cobre completamente oxidado, que no llega a tocar el nivel hidrostático de la región. Mediciones de potenciales naturales, efectuadas sobre la veta y sus alrededores, indicaron los mismos valores que se registran en zonas completamente estériles.

YACIMIENTOS QUE PRESENTAN POLARIZACION ESPONTANEA.

Todos los cuerpos macizos de piritita y todos los sulfuros mixtos ya sea en filones continuos o en rosario, cu-

ya cúspide esté próxima a la superficie del terreno, presentan una polarización espontánea muy neta.

La pirita, especialmente, se encuentra frecuentemente asociada con gran número de otros minerales, formando yacimientos mixtos de oro, níquel, antimonio, etc., los cuales, por la presencia de dicho sulfuro, son susceptibles de producir fenómenos eléctricos. Es así como gran parte de los yacimientos auríferos, localizados con el método de los potenciales naturales en Eritrea, oeste de Etiopía, Australia, y en muchas otras regiones, se descubrieron por la presencia de la pirita que acompañaba al oro.

Los sulfuros de cobre: calcopirita, calcosina, covelina, etc. siendo conductores y oxidables, pueden considerarse entre los que mejor se adaptan a la prospección por el método de los potenciales naturales. Su presencia en otros sulfuros, aún cuando no sea más que del orden del 1 al 2 %, favorece notablemente la continuidad eléctrica.

La galena, cuando presenta una continuidad mineral suficiente, da potencial espontáneo. La búsqueda de la galena por observación del potencial espontáneo no se ha generalizado tanto como la de los minerales arriba indicados. Lo mismo ocurre para el mispikel y los complejos de sulfuros de arsénico y antimonio que, conductores y oxidables, faltan a menudo de continuidad.

Las antracitas, muy pobres de materias volátiles, son buenas conductoras y tienen a veces un enérgico potencial natural.

El grafito, muy conductor y muy oxidable, presenta muchas veces intensas manifestaciones de polarización espontánea.

Los más altos valores de potencial natural se han registrado sobre esquistos antiguos grafitosos, especialmente

los del Silúrico y del Carbonífero, denominados comúnmente "esquistos negros", que muy a menudo aparecen fuertemente pirritizados. Por lo general, sin embargo, los potenciales registrados sobre estas formaciones geológicas oscilan entre 400 y 500 milivoltios. Lo mismo se observa con los demás minerales de que nos hemos ocupado, ya que en las prospecciones que se efectúan con este método, solo excepcionalmente se notan los valores extremos que caracterizan a cada clase de sulfuro. Esto es debido a muchos factores, tales como la profundidad a que se encuentra la masa mineralizada, el régimen de lluvias de la región, la naturaleza de las rocas superficiales y el terreno de recubrimiento.

Todos estos elementos deben tenerse en cuenta al hacer la interpretación de las mediciones efectuadas, porque para yacimientos de mole aproximadamente igual pueden resultar diferencias muy grandes entre los potenciales registrados en las respectivas prospecciones, lo que podría ocasionar erróneas apreciaciones acerca del valor económico que corresponde a cada yacimiento.

A pesar de las diferencias en los valores del potencial natural que muchas veces se observan en distintos yacimientos de un mismo tipo de mineral, y de las variaciones que puede presentar en distintas épocas un mismo yacimiento, hay un fenómeno característico que no deja lugar a posibles dudas o a falsas interpretaciones acerca de la existencia de una mineralización, y es la persistencia de las manifestaciones eléctricas, cuyos valores están distribuidos alrededor de uno o más centros negativos bien definidos.

Esto no ocurre con otras causas que en determinadas condiciones producen potenciales naturales de cierta intensidad, los cuales no tienen ninguna relación con la polarización espontánea de sulfuros. La aparición de estos potenciales

naturales se caracteriza generalmente por su irregularidad y por las variaciones, a veces intensas, de sus valores, los que resultan afectados por las variaciones climáticas, el estado eléctrico del aire, los fenómenos termo-eléctricos que se producen en las rocas por insolación, etc.

Las principales causas que originan los mencionados potenciales son:

1) El llamado efecto de dorsal, que se reconoce por un gradual aumento de los potenciales negativos hacia los puntos de mayor elevación del terreno, y cuyas líneas equipotenciales coinciden casi exactamente con las curvas de nivel.

2) La alteración por hidratación y lixiviación de ciertas rocas, que producen intensas manifestaciones eléctricas, localizadas a veces en áreas de algunos metros cuadrados, durante las épocas lluviosas o de excesiva humedad.

3) La insolación de las rocas, en el verano, en regiones donde se alcanzan temperaturas superiores a los 40°C (La Rioja, Catamarca, Santiago del Estero, etc.), la cual engendra sensibles diferencias de potencial por efecto termo-eléctrico, localizadas en pequeñas áreas, de irregular distribución.

4) Las zonas de contacto entre formaciones de diferente constitución litológica. Ellas dan lugar excepcionalmente a la aparición de anomalías eléctricas uniformes y persistentes, generalmente de forma muy alargada y angosta, fácilmente identificable.

5) Los fenómenos de electro-capilaridad, que se manifiestan en terrenos muy permeables, debidos a la infiltración y desplazamiento de las aguas meteóricas en el subsuelo, originándose a veces centros positivos inestables e irregulares, y una electrización positiva progresivamente creciente hacia las depresiones del terreno (fondo valle).

El fenómeno es originado por las cargas positivas que transporta el agua, especialmente si es pura, y a él se debe el efecto de dorsal que se señaló antes.

Analizando detenidamente las variaciones de los potenciales naturales de una zona, registrados en distintas condiciones de temperatura ambiente, humedad, electricidad atmosférica, etc. y la distribución de los valores con respecto a la topografía y a la naturaleza litológica de la región prospectada, será fácil discriminar las causas de errores y llegar a identificar las anomalías provocadas efectivamente por la polarización espontánea de las masas mineralizadas que se quieren localizar.

APLICACION DEL METODO DE LA POLARIZACION ESPONTANEA.

La prospección de yacimientos por medio de la observación de las anomalías eléctricas del terreno, consiste en explorar metódicamente la región prevista y en buscar las zonas donde el suelo presenta campos eléctricos producidos por la polarización de los sulfuros, confeccionando después el mapa de los potenciales de esas zonas.

La primera operación se efectúa midiendo las diferencias de potencial entre un cierto número de puntos distribuidos sobre líneas rectas.

Los resultados se representan bajo la forma de perfiles, colocando en las abscisas las estaciones en que se efectuaron las mediciones y en las ordenadas los potenciales observados.

Los valores registrados son relativos, pues se refieren al potencial de un punto al que se le asigna arbitrariamente el valor de cero. Prácticamente se toma como cero el potencial de una región neutra, alejada del yacimiento, donde los potenciales no presentan variaciones sensibles (del orden

de 3 a 4 milivoltios).

Los perfiles son trazados, en lo posible, perpendicularmente al supuesto rumbo de las formaciones mineralizadas, y si las mediciones que se efectúan muestran una o más zonas de actividad eléctrica, debe extenderse oportunamente la prospección a un área bastante amplia, hasta salir de las zonas anómalas.

El comportamiento de las reacciones eléctricas es entonces determinado por medio de perfiles de detalle y de curvas equipotenciales, que se trazan después de haber localizado el centro de cada anomalía, es decir el punto donde el potencial alcanza su valor mínimo (centro negativo) o máximo (centro positivo).

Para llegar a una correcta representación de las anomalías es necesario efectuar una prospección detallada con mediciones del potencial natural según un reticulado en el que las estaciones tengan una separación de unos 25 metros.

Con este método es posible determinar la distribución de los valores del potencial eléctrico del terreno sobre áreas muy extensas y trazar sobre planos topográficos las respectivas curvas en base a las cuales se delimitarán las masas de mineral (lentes, bolsones, bancos, vetas) que existen en el subsuelo.

Según cuanto precede, la existencia de una zona con potencial natural implica, salvo los casos que se verán más adelante, la presencia de un yacimiento conductor y continuo.

El estudio de los perfiles y de las curvas equipotenciales tiene por objeto precisar la naturaleza, la forma y las condiciones en que yace la masa conductora. Estos elementos se deducen de las siguientes condiciones:

a) Valores mínimos y máximos del Potencial Natural

Cuanto más profundo es un yacimiento, con respecto a sus di-

mensiones, tanto más débiles son las corrientes que llegan a la superficie del terreno y más pequeña la caída óhmica; por consiguiente el potencial natural será más bajo. No hay, pues, teóricamente, límite inferior característico, sino solamente un límite práctico, debajo del cual no es prudente atribuir a polarización de minerales las diferencias del potencial que se registren, a causa del gran riesgo de error que se corre en estos casos.

Como regla general, es conveniente limitarse a analizar los centros no menores de 40 a 50 milivoltios, aunque puedan tenerse en cuenta centros más pequeños, siempre que las causas de error (electro-capilaridad, insolación del terreno, electricidad atmosférica, etc.) sean despreciables en la región que se investiga.

En lo que concierne a los centros negativos, los valores extremos observados dependen de la naturaleza del mineral existente en profundidad. Así, por ejemplo, los centros con potenciales muy elevados (arriba de los 400 milivoltios) hacen pensar generalmente en los esquistos negros, sobre todo si esos centros son numerosos, con formas complicadas, sobrepasando las dimensiones razonables de un yacimiento, alineados según la estratificación de los terrenos, o presentando variaciones muy localizadas y bruscas del potencial.

La pirita da normalmente un potencial comprendido entre 100 y 300 milivoltios.

Los sulfuros de cobre de cementación dan un potencial natural algo más débil. El de la galena pura, sin pirita, difícilmente sobrepasa los 100 milivoltios.

La blenda, en general, no da potencial espontáneo.

Las cosas además se complican cuando el mineral que se localiza con la prospección no es homogéneo y resulta constituido por sulfuros mixtos, con sus componentes en proporció-

nes variables. En estos casos, que son los más frecuentes, los valores extremos de los centros negativos varían grandemente según predomine un tipo de sulfuro u otro en la masa mineralizada, haciendo imposible cualquier interpretación cualitativa de las anomalías localizadas.

b) Centros negativos y centros positivos.

1) Caso de formaciones verticales: En general se encuentran solo centros negativos. Esta es la regla para todos los yacimientos que tienen raíces profundas y en los que la cúspide está sobre el nivel hidrostático medio; filones verticales y lentes con fuerte inclinación. Los perfiles obtenidos entonces son los del tipo que muestra la fig. 2.

De tales perfiles se puede deducir la profundidad "h" de la cúspide del yacimiento. En efecto, se puede suponer que la distribución de los potenciales en la superficie del suelo y debajo del yacimiento es la misma que se obtendría si ellos fueran debidos a una carga "Q" concentrada en la cúspide. El potencial en C (centro) tiene por valor "Q". En un punto "P", situado a la distancia "x" del centro, tiene por valor:

$$V_p = \frac{Q}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$

En particular, en el punto P, siendo $x = h$, se tiene:

$$V_p = \frac{Q}{h \sqrt{2}}$$

La caída de potencial ξ según CP es entonces:

$$\xi = \frac{Q}{h} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{3}$$

De donde la siguiente regla:

"La profundidad de la Cúspide del yacimiento es "grosso modo" igual a la distancia entre el centro y el pun-

to en que el potencial es igual a los 2/3 del potencial del centro".

2) Caso de formaciones horizontales. La regla del centro negativo único desaparece en el caso de formaciones mineralizadas horizontales o de buzamiento muy suave. En este caso se halla, además del centro negativo C, otro centro menos marcado, C', pero positivo. Este centro se ubica debajo de la zona profunda que constituye el otro polo de la pila natural que es, desde el punto de vista de los potenciales, semejante a una serie de cargas positivas profundas repartidas sobre la superficie exterior del yacimiento.

También los caños de acero y de hierro fundido enterrados originan un fenómeno análogo, dando lugar a una sucesión de centros negativos y positivos, de dimensiones muy reducidas. (algunos metros de diámetro), netamente alineados, con valores de 50 a 100 milivoltios, correspondiendo los centros negativos a los puntos de oxidación de la cañería.

APARATOS DE MEDICION.

El equipo necesario para efectuar las mediciones del potencial eléctrico natural del terreno está constituido por un aparato potenciométrico con galvanómetro de cero central, muy sensible; dos electrodos impolarizables, que aseguran los contactos con el suelo; dos cables aislados que conectan los electrodos al potenciómetro.

Los electrodos: Para la medición de los potenciales naturales se deben emplear electrodos impolarizables, debido a que el contacto con la tierra húmeda de los electrodos metálicos introduciría errores a veces superiores al fenómeno a medir, y muy variables de un punto a otro.

Electrodos impolarizables muy buenos pueden realizarse empleando vasos de porcelana porosa o de harina fósil, que contienen una solución saturada de sulfato de cobre, en la

cual se inmerge un tubo de cobre electrolítico.

Los electrodos así constituídos no se polarizan, pues la corriente del terreno pasando a través de la solución de sulfato de cobre provoca reacciones inversas que no alteran el equilibrio voltáico de las dos tomas de tierra.

Algunas veces ocurre que debe prospectarse una región en que la superficie del terreno está constituída por mantos de basalto, traquita u otra roca efusiva, donde el contacto de los electrodos que se describieron resultaría muy deficiente.

En estos casos conviene reemplazar los vasos porosos de porcelana por bolsitas cónicas de fieltro o lona, las que se rellenan de aserrín o de cuarzo hialino triturado, empapándolo con la solución saturada de sulfato de cobre. De esta manera se puede aumentar considerablemente la superficie de contacto entre los electrodos y el terreno, lo que hace posible la lectura de los potenciales eléctricos naturales que se distribuyen a la superficie de las formaciones mencionadas.

El potenciómetro. Consiste esencialmente en un circuito eléctrico que comprende un sistema de resistencias variables conectadas en serie con un galvanómetro de cero central y una pila seca de 1,5 voltios, el cual trabaja en oposición cuando una tensión aparece en los electrodos P_1 y P_2 .

Las mediciones de los potenciales naturales existentes en P_1 y P_2 se realizan variando la resistencia del circuito del potenciómetro hasta alcanzar el equilibrio entre la tensión de la pila con aquella que los electrodos derivan del terreno, lo cual se consigue cuando el galvanómetro vuelve a su posición de cero. Las resistencias variables están calibradas de manera que compensando con el cursor pueda leerse directamente, en milivoltios, la tensión que ha sido compensada.

Como los potenciales naturales pueden cambiar de signo en P_1 y P_2 , entre los bornes de entrada del potenciómetro se coloca una llave inversora para mantener siempre en oposición el circuito potenciométrico y el de la tierra. Por consiguiente, en cada medición que se efectúe, deberá examinarse siempre la posición de la llave inversora, deduciéndose de ella el signo de los potenciales en P_1 y P_2 .

OPERACIONES EN EL CAMPO.

Para realizar una prospección con el método de los potenciales naturales se necesita un operador y no menos de dos obreros para transportar todas las partes que constituyen el equipo.

La primera etapa del trabajo se efectúa preparando una serie de perfiles paralelos o un reticulado con mallas de 25 metros, clavando en el suelo estacas de madera numeradas, hasta cubrir toda el área que se debe explorar.

Antes de empezar las mediciones sistemáticas, se prepara una solución saturada de sulfato de cobre, se llenan los electrodos impolarizables con el electrolito así preparado y se conectan al potenciómetro poniéndolos en corto circuito para ver si aparecen diferencias de potencial. Después de efectuar esta prueba con todos los electrodos que han sido preparados, se eligen los dos que presentan la mejor polarización, la cual en todos los casos no debe arrojar una diferencia de potencial superior a uno o dos milivoltios. Esta operación tendrá que repetirse todas las veces que se verifique la rotura de un vaso poroso y que se lo deba reemplazar por otro nuevo.

Después de haber efectuado estas operaciones previas, se elige la primera estación-base fuera del área estacuada, lo más alejada posible de la zona que se presume mineralizada. Se coloca en estación un electrodo, que se dejará

fijo, al cual se atribuirá el potencial arbitrario de cero. Este electrodo se conecta al potenciómetro por medio de un cable y quedará en el mismo lugar hasta que no se hayan terminado todas las mediciones que puedan efectuarse desde la estación elegida.

Se conecta al potenciómetro el otro electrodo y, después de haber hecho la calibración del aparato, se da comienzo a las mediciones de los potenciales naturales en toda el área que se pueda alcanzar con el electrodo móvil. Estas mediciones se efectúan colocando a unos centímetros de cada estaca el electrodo móvil y apretando un poco la tierra alrededor de él con el fin de asegurar un buen contacto con el terreno.

Las mediciones se registran en una planilla, como la que se ve en la fig.4, donde en la primera columna se anota el número de la estaca en que se puso el electrodo móvil; en la segunda los milivoltios compensados con el potenciómetro, precedidos del signo + si el electrodo móvil indica un potencial positivo con respecto al electrodo fijo, o precedido del signo - si el electrodo móvil indica un potencial negativo. En la tercera columna se anota el número de la estaca en la que se deja el electrodo fijo, con el correspondiente potencial que resulta del promedio de dos o tres mediciones anteriores, en la cuarta se registra el potencial verdadero correspondiente a cada estaca, el cual es dado por la suma algebraica de los milivoltios leídos y de los que corresponden al punto del terreno en que se halla el electrodo fijo.

PLANILLA PARA POTENCIALES NATURALES

Estaca N°	Lectura (mV.)	Electrodo fijo (mV.)		Hora	Fecha	Notas
51	-27	-18	-45			
52	-39	"	-57			
53	-55	"	-73			
54	-41	"	-59			

Fig. 4

Si al efectuar las primeras mediciones se observa que entre una estación y la otra no hay variaciones apreciables de potencial, y los valores registrados, referidos al potencial cero del electrodo fijo, se presentan muy bajos y uniformes, puede considerarse la zona como estéril. En este caso las mediciones se podrán hacer a una distancia de 50 metros una de otra para avanzar más rápidamente con la prospección, hasta que se encuentren con el electrodo móvil potenciales negativos de un cierto interés.

Desde ese momento las mediciones volverán a efectuarse sobre mallas de 25 metros, o menos, al efecto de poder seguir en todos los detalles la anomalía eléctrica que se presentara.

Antes de seguir adelante con el relevamiento de la región, conviene repetir de vez en cuando la medición de los potenciales naturales de algunas estaciones, para verificar si resultan constantes los valores registrados anteriormente. Al término de esta operación, si no se verificaron diferencias apreciables entre los valores obtenidos en la primera y las posteriores mediciones, se elige una de estas estaciones y en ella se dejará el electrodo fijo, asignándole como potencial el promedio de los valores que presentó en las distintas mediciones efectuadas. Establecido así el segundo electrodo fijo, con su respectivo potencial, se da comienzo a la medición de los potenciales de la segunda serie de estaciones, cuyo valor se determina refiriéndolo al potencial del electrodo fijo que se acaba de elegir.

Durante la ejecución de estas nuevas mediciones es aconsejable controlar dos o tres veces el potencial de algunos puntos, con el fin de asegurarse de que no hay inconvenientes en el funcionamiento del equipo y de que no interviene ninguna otra causa perturbadora (insolación del terreno,

electricidad atmosférica) que pueda ocasionar lecturas erróneas.

Estos controles servirán además para designar la próxima estación base, de la cual se tomará el promedio de los potenciales registrados, y en ésta se colocará el tercer electrodo fijo para la tercera serie de mediciones, procediendo en la misma forma en todas las futuras determinaciones, hasta prospectar íntegramente la zona que interesa.

Llevado a término el relevamiento de los potenciales naturales en toda la zona estaqueada, si en ésta apareció alguna anomalía que pueda considerarse relacionada con la existencia de alguna masa profunda de mineral, se efectuará el levantamiento topográfico del área en que se identificó la anomalía eléctrica, para proceder luego a la ulterior interpretación de los valores registrados en el curso de la prospección.

Cuando esté listo el plano topográfico, con la exacta ubicación de todas las estacas y con las curvas de nivel de 10 en 10 metros, se volcarán en él los valores del potencial natural y se trazarán las líneas equipotenciales.

Para la representación gráfica de la anomalía encontrada se buscan ante todo los valores negativos más altos, por ejemplo los que están cerca de los 150 milimoltios, si se alcanzó este valor durante la prospección.

Ellos estarán concentrados en una zona muy restringida (centro negativo). Se unirán después, por interpolación, los puntos que presentan el mismo potencial de -150 mV, y la curva resultante delimitará la cúspide del cuerpo mineralizado.

Cerrada la primera curva, que generalmente presenta forma elíptica, se trazará, siempre por interpolación, la segunda, la cual pasará por los puntos que se encuentran a un

potencial de -125 milivoltios; luego se trazará la tercera equipotencial de -100 mV, y así sucesivamente, hasta terminar con la curva de -75 ó -50 milivoltios, que delimita la zona anómala de interés.

Si la prospección de la región no ha sido efectuada en la forma sistemática descrita, sobre un reticulado de puntos equidistantes, y las mediciones de los potenciales naturales han sido realizadas a lo largo de perfiles paralelos, pero bastante separados entre sí, la representación gráfica del gradiente del potencial puede obtenerse mediante perfiles eléctricos, poniendo en las abscisas las distancias que separan los distintos puntos en que se midieron los potenciales, y en las ordenadas los correspondientes valores registrados.

La correlación de los gráficos resultantes no presenta mayores dificultades, especialmente si los perfiles están orientados perpendicularmente al rumbo de la veta mineralizada que se quiere localizar.

METODO DE LA POLARIZACION INDUCIDA.

Una técnica similar a la que se aplica para las mediciones de los potenciales naturales del terreno provocados por polarización espontánea de masas de sulfuros, ha sido desarrollada por M. Schlumberger para la prospección de yacimientos en rosario que, aún teniendo conductividad metálica, no dan lugar a polarización espontánea, o bien originan potenciales naturales muy débiles (galena, blenda, magnetita, estibina, niquelina, etc.). La prospección de estos yacimientos es posible provocando en ellos artificialmente la polarización de los distintos cuerpos mineralizados, lo que se consigue enviando al terreno una corriente continua mediante dos electrodos metálicos. Estos deben ubicarse de manera que los bolsones de mineral que se quiere localizar se encuentren en el interior del área energizada por la corriente que se manda al terreno.

Al enviar la corriente, la humedad de las rocas de caja se descompone y se produce una acumulación de hidrógeno en el extremo de la masa mineralizada por donde entra la corriente y otra de oxígeno en el extremo opuesto por donde la corriente sale, polarizándose de esta manera el yacimiento.

Al interrumpirse el envío de corriente, la masa mineralizada se comporta como los yacimientos que presentan el fenómeno de la polarización espontánea y se la puede delimitar midiendo con un potenciómetro los potenciales que se distribuyen en la superficie del terreno entre A y B (fig.5).

METODO DE RESISTIVIDAD.

Este método tiene mucha aplicación en las exploraciones del subsuelo cuando se necesita determinar la litología interna de una región, para ponerla en relación con las formaciones hídricas subterráneas o con la ubicación de yacimientos metalíferos, de lignito, asphaltita, hulla, azufre, etc., que no dan lugar al fenómeno de la polarización espontánea. Su aplicabilidad se basa en el hecho de que los estratos del terreno, superficiales y profundos, presentan una cierta conductividad que permite el paso de una corriente eléctrica.

Los relevamientos por este método se efectúan creando artificialmente un campo eléctrico en el área que se debe prospectar, empleando a tal efecto un generador de corriente continua, o bien alternada o conmutada, para energizar el terreno, y dos electrodos metálicos (acero, bronce, cobre) que se clavan en el suelo y se conectan al generador con cables aislados, de conveniente sección. Se establece así un flujo de corriente que va de un electrodo a otro y que obedece a la ley de Ohm, siendo directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia que opone el terreno comprendido entre los electrodos, según la ecuación:

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

de la cual se deriva la que nos proporciona la resistencia del conductor al que se aplica una tensión V:

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

donde:

I es la intensidad de la corriente, expresada en amperes

V la tensión, en voltios

R la resistencia, en ohmios.

Cabe recordar, además, que la resistencia que opone un cuerpo conductor al paso de una corriente varía de acuerdo con la substancia de que está constituido (resistencia específica o resistividad), y que aumenta con su longitud y disminuye con su sección. Tendremos entonces:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}, \text{ en que}$$

R es la resistencia total del conductor,

ρ su resistividad, o sea la resistencia de una unidad cúbica,

L la longitud,

S la sección.

A su vez será dado por

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

La resistividad ρ de cualquier material se define, por lo tanto, como la resistencia, expresada en ohmios, que presenta una unidad cúbica de tal material, al cual se aplica una tensión V sobre las dos caras opuestas de un cubo, y por el cual pasa una intensidad de corriente I por segundo.

La unidad de resistividad en el sistema métrico es dada en ohm/m^3 , siendo la longitud del conductor expresada en metros.

Estas relaciones están en la base de los cálculos que se efectúan para determinar la distribución de una corriente en un conductor infinito o semi-infinito, como puede considerarse, en el caso nuestro, la tierra o una porción de ella.

Aplicando una tensión en dos puntos del terreno mediante dos electrodos separados por una cierta distancia, se crean dos campos eléctricos semi-esféricos, con centro en cada electrodo, en los cuales las superficies equipotenciales y las líneas de corriente se distribuyen según planos perpendiculares. Como todos los puntos de estas superficies son equidistantes del centro, Wenner encontró una relación que permite determinar con cierta aproximación la profundidad de penetración que alcanza una corriente en un terreno considerado idealmente homogéneo o isótropo.

Esta profundidad resulta igual a la distancia "a", o sea a un tercio de la separación de los electrodos que energizan el terreno.

Si se envía al suelo la corriente de un generador, midiendo con un miliamperímetro la intensidad, y midiendo con un potenciómetro los potenciales al interior de la zona energizada, se puede calcular el valor de la resistividad aparente del terreno comprendido entre los electrodos de captación de los potenciales, cuyo ancho es P_1 y P_2 y la profundidad es $\frac{C_1 C_2}{3}$.

La relación que se emplea para calcular la resistividad aparente del terreno en la configuración electródica arriba indicada ha sido deducida de la ley de Ohm aplicada al caso de un conductor de tres dimensiones:

$$\rho = 2 \pi a \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Aunque esta configuración sea la que tiene mayor aplicación en las prospecciones por resistividad, se emplean

a menudo algunas variantes, como la de Lee, que introduce un quinto electrodo, o la de Schlumberger, en que los cuatro electrodos no resultan equidistantes y las mediciones se efectúan desplazando solamente los electrodos de envío de corriente, mientras se dejan en la misma posición los de captación de los potenciales durante un cierto número de mediciones, de acuerdo al procedimiento que se especificará más adelante al indicar la aplicación práctica de este sistema.

Resistencia de contacto a los electrodos. En las mediciones de las resistividades aparentes del subsuelo, los valores correspondientes a cada determinación que se efectúa no representan la resistencia efectiva del circuito eléctrico formado por el equipo registrador y las porciones de terreno comprendidas entre los electrodos C_1 y C_2 , ya que se introduce otra, muy variable, representada por el contacto de los electrodos de envío de corriente con el terreno en que estos son clavados, la cual se suma a la que interesa conocer.

Esto puede ocasionar serios inconvenientes, especialmente en la prospección de regiones áridas o de terrenos constituidos en superficie por materiales heterogéneos y sueltos (conos de deyección, lechos de torrentes, ciénagas, etc.), en que la adherencia de los electrodos de envío de corriente al terreno puede variar considerablemente de un punto a otro, alterando los valores de resistividad aparente de las formaciones litológicas subyacentes, y dar lugar a posibles errores en la interpretación de las curvas resultantes de los sondeos.

El efecto perturbador de las resistencias de contacto se elimina en gran parte aumentando el número de los electrodos (por lo general se conectan 3 en cada extremo de la línea de envío de corriente) y regando bien el terreno alrededor de los mismos.

APARATOS DE MEDICION.

Los equipos que se emplean para las mediciones de resistividad están constituidos por aparatos eléctricos de corriente continua o alternada, cuyos circuitos se pueden conectar a dos líneas eléctricas independientes: una de envío de corriente (C_1 C_2) para energizar el terreno; otra (P_1 P_2) para la medición de los potenciales suscitados artificialmente y que aparecen en el interior de la zona energizada.

El equipo más sencillo está constituido por dos unidades independientes: a) un miliamperímetro de escala múltiple, que pueda medir de 1 a 1.000 miliamperes, conectado mediante dos cables a dos electrodos metálicos a través de una batería de pilas, cuyo esquema se da en la fig. 6.

b) un voltímetro a válvula, o también un potenciómetro de laboratorio, tipo Tinsley, Philips, u otro, conectado a dos electrodos impolarizables.

Otros aparatos de corriente continua, denominados compensadoras, constan esencialmente de un circuito de poder y uno potenciométrico. El primero está provisto de un generador de corriente (dínamo o batería de pilas secas) con reóstato regulador, un amperímetro, dos cables unipolares aislados y dos electrodos metálicos de envío de corriente. El circuito potenciométrico está provisto a su vez de un galvanómetro de cero central, una serie de resistencias variables, dos cables unipolares aislados y dos electrodos impolarizables de medición de los potenciales.

Como se notan siempre diferencias en el potencial del terreno debidos a electro-capilaridad, filtración de agua en terrenos porosos, insolación, alteración de rocas, etc. que se restan o se suman a los potenciales suscitados artificialmente por el envío de la corriente al terreno, es necesari-

rio efectuar dos lecturas por cada determinación de resistividad, mandando primero la corriente a los electrodos C_1 y C_2 en un sentido; luego en sentido inverso, y registrando el promedio de las lecturas de mA y mV. De este modo es posible también determinar el potencial natural existente entre los electrodos P_1 y P_2 dividiendo por 2 la diferencia entre las dos lecturas de los mV.

En algunos modelos de compensadores hay dos circuitos de compensación (bicomensadores): uno para eliminar los potenciales naturales del terreno (potenciales parásitos) y otro para compensar los potenciales producidos con el campo eléctrico artificial que se crea al enviar la corriente entre C_1 y C_2 .

Con estos aparatos se pueden reemplazar los electrodos impolarizables por otros metálicos, eliminando primero los potenciales naturales con el circuito del primer compensador y luego compensando con el segundo circuito los potenciales suscitados artificialmente.

Las mediciones de resistividad pueden efectuarse igualmente usando equipos de corriente alternada, que substancialmente funcionan como los de corriente continua. La única diferencia consiste en que el generador de corriente es un alternador accionado por un motor de explosión, en lugar del dínamo o de las pilas.

Con estos aparatos no hay ningún inconveniente en usar electrodos metálicos en lugar de los impolarizables, no molestando los efectos de polarización ni los potenciales naturales del terreno, dado que la corriente enviada al suelo los neutraliza con sus rápidas alternancias.

Otro tipo de aparatos, en fin, están entre los de corriente continua y los de corriente alternada. Ellos reúnen las ventajas de ambos sin tener los respectivos inconvenientes.

Se trata de los aparatos de corriente conmutada que,

por su reducido peso y facilidad de transporte, son tan prácticos como los de corriente continua que funcionan con baterías de pilas secas.

Los rápidos pulsos de la corriente conmutada que llegan a los electrodos permiten efectuar una sola lectura en los instrumentos de medición (miliamperímetro y milivoltímetro), siendo ésta el equivalente del promedio de las lecturas efectuadas con envío de corriente en sentido directo e inverso, que se hacen con algunos aparatos de corriente continua para registrar los valores de intensidad y tensión en cada medición.

EQUIPOS DE PROSPECCION POR RESISTIVIDAD Y TECNICAS OPERATIVAS.

APARATOS DE CORRIENTE CONTINUA: compensadores y bicompen-
res.

Existen muchos modelos de estos aparatos que reúnen las condiciones de precisión, solidez y facilidad de transporte y manejo exigidas por el trabajo de investigación expeditiva del subsuelo.

El compensador más sencillo consta de dos unidades independientes: un miliamperímetro de escala múltiple, cuyos rangos permiten lecturas desde 1 hasta 1.000 miliamperes, y un voltímetro a válvula o un potenciómetro, con rangos que parten de 1 y llegan a 1.000 ó 1.500 milivoltios.

Otros aparatos muy usados para las mediciones de resistividad son los compensadores potenciométricos que reúnen en una sola unidad el circuito de envío de corriente y el de medición de los potenciales, cuyos mandos están reunidos en el mismo panel.

Completan estos equipos de prospección cuatro o más bobinas de cable, un juego de electrodos de acero, otro de electrodos impolarizables, una batería de 4 pilas de 45 voltios y otros accesorios que pueden necesitarse para loca-

lizar o reparar en el campo eventuales averías del equipo.

Para efectuar las mediciones de resistividad con estos equipos se controla primero la calibración del compensador según las instrucciones que acompañan a cada aparato. Se efectúan todas las conexiones y se energiza el terreno haciendo para cada determinación de resistividad dos lecturas de I (miliamperes que pasan entre C_1 y C_2) y de V (milivoltios que aparecen en P_1 y P_2).

La primera lectura se efectúa enviando la corriente en un sentido; para la segunda se manda la corriente en sentido opuesto y luego se registran los correspondientes valores promedio que entrarán en el cálculo de ρ .

Los bicompensadores, no necesitan enviar la corriente en los dos sentidos, pues con la doble compensación se puede prescindir, si se quiere, de los electrodos impolarizables y substituirlos por otros metálicos, agilizando así las operaciones de campo, pero como con todos estos aparatos se pueden efectuar también mediciones de polarización espontánea operando solamente con el circuito potenciométrico, conviene disponer siempre de electrodos impolarizables para el caso de tener que efectuar prospecciones de yacimientos de sulfuros.

APARATOS DE CORRIENTE CONMUTADA.

Resistímetros. Estos aparatos se caracterizan por algunos detalles constructivos tales como el circuito de envío de corriente que está especialmente diseñado para energizar el terreno con una corriente conmutada, y el circuito de medición de tensión en el cual los potenciales que aparecen en P_1 y P_2 se leen directamente en un milivoltímetro en lugar de leerlos en el dial de la resistencia de compensación de un potenciómetro.

El funcionamiento es el del dispositivo de Gish-

Rooney, en el cual un doble inversor transforma la corriente continua de una batería de pilas secas en una corriente de onda cuadrada.

Los instrumentos de medición reciben un cierto número de pulsos por minuto (entre 250 y 750), el cual depende de la velocidad de rotación del inversor o bien de las inversiones producidas por un relai montado en sistema "flip-flop".

Los valores de resistividad se obtienen aplicando la fórmula de Wenner,

$$\rho = 2 \pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} .$$

Ohmetro de Megger. En la breve reseña de los distintos procedimientos usados para medir la resistividad aparente del subsuelo, hemos visto que tanto con los aparatos de corriente continua, como con los de corriente de onda cuadrada, los valores del potencial "V" y los de la intensidad de corriente "I" se miden por separado, calculándose luego la resistividad mediante la relación de Wenner u otras derivadas de ella.

Existen sin embargo aparatos que proporcionan directamente la relación V/I con una sola lectura, lo que aumenta considerablemente la rapidez de la prospección y elimina al mismo tiempo una parte del trabajo de gabinete.

El más conocido de estos aparatos es el ohmetro Megger que, al igual que el resistímetro descrito anteriormente, funciona con corriente conmutada. En origen el aparato fué diseñado para localizar los puntos más favorables del terreno para las tomas de tierra de las grandes plantas eléctricas. Sucesivamente fué perfeccionado para extender su empleo a las investigaciones de los estratos del subsuelo, con el objeto de proporcionar informaciones acerca del nivel de las aguas subterráneas o sobre la naturaleza de los terrenos en

que se debía realizar importantes obras de ingeniería civil.

En las exploraciones geofísicas su uso no se ha generalizado como se podía esperar, debido a su baja sensibilidad que limita mucho su alcance, aunque unos años atrás la Casa Evershed & Vignoles de Londres haya perfeccionado bastante el equipo standard, llevando su sensibilidad muy cerca de la que poseen los compensadores potenciométricos.

La figura 7 muestra esquemáticamente el circuito eléctrico del ohmetro Megger usado para prospección del subsuelo.

El aparato está constituido por un generador de corriente conmutada, similar al del Gish-Rooney, provisto de un reóstato que permite variar a voluntad la intensidad de la corriente que se envía al terreno. En el mismo circuito se encuentra un indicador de corriente que se regula con el reóstato, llevándolo a los valores de escala que han sido elegidos, y una bobina de tensión con shunts de regulación. Este primer circuito se cierra con el terreno entre C_1 y C_2 pasando a través del inversor de corriente.

El segundo circuito está constituido por un ohmetro con llave conmutadora, un potenciómetro de regulación y un galvanómetro para indicar si hay potenciales en P_1 y P_2 , los que eventualmente se compensan con el potenciómetro. Este circuito se cierra con el terreno, a través de un conmutador sincronizado con el inversor, montado sobre el mismo eje que éste, y de una bobina de corriente (o de desviación) que será atravesada por una corriente proporcional a la caída de potencial en P_1 y P_2 .

Con el procedimiento de compensación se suprimen las correcciones relativas a las resistencias de contacto a los electrodos, lo que es de importancia muy grande en las mediciones de resistividad del terreno.

ABEM-TERRAMETER. Otro resistímetro muy empleado en prospecciones eléctricas es el "ABEM-TERRAMETER", de procedencia sueca. También con este aparato la relación $\frac{\Delta V}{I}$, expresada en ohmios, se lee directamente en un potenciómetro.

El equipo está constituido por dos unidades representadas esquemáticamente en la figura 8:

La caja G (parte superior de la figura), contiene el circuito de envío de corriente a tierra, el cual está integrado por un oscilador transistorizado y un transformador de poder.

La caja V (parte inferior de la figura), contiene los circuitos para medir la resistividad del terreno, integrados por un amplificador, un microamperímetro y un potenciómetro.

Ambas unidades funcionan con baterías standard colocadas internamente. El oscilador de la caja G está alimentado por 12 pilas standard de 1,5 voltios, ubicadas en dos estuches de seis pilas conectadas en serie, y transforma la corriente continua de las pilas en una corriente de onda cuadrada con una frecuencia de unos 4 c/s.

El transformador de poder del oscilador tiene 8 bobinados separados en el secundario, los que, mediante un selector de voltaje pueden ser conectados de manera que se puedan obtener las tensiones de salida de 100, 200 ó 400 voltios en los bornes C_1 y C_2 .

La figura 8 muestra el esquema de los controles de la caja G. Esta unidad se conecta al terreno a través de los bornes C_1 y C_2 y los correspondientes electrodos de corriente,

La Caja V contiene la unidad de medición del potencial y el circuito potenciométrico de referencia. La figura muestra el esquema de los controles de la caja V. Esta unidad, a través de los bornes P_1 y P_2 , se conecta al terreno mediante los correspondientes electrodos de potencial.

OPERACIONES EN EL CAMPO.

Mediciones de resistividad. Las mediciones más comunmente efectuadas en las exploraciones hidrológicas y mineras, ya sea con la disposición electródica de Wenner, ya sea con la de Schlumberger, son las que constituyen los sondeos eléctricos y los perfiles de resistividad.

Los primeros proporcionan los valores de la resistividad aparente del subsuelo a profundidades progresivamente crecientes, referidos a determinados puntos ubicados en la superficie; los segundos interesan por lo general amplias áreas, proporcionando los valores de resistividad para una profundidad constante.

Prácticamente, para la ejecución de un sondeo eléctrico, se disponen los electrodos de potencial P_1 y P_2 alineados con el punto de origen "0" del sondeo mismo, que está en el centro, y disponiendo luego, sobre el mismo alineamiento, los electrodos de envío de corriente C_1 y C_2 (fig. 9).

La distancia entre el punto de origen "0" y el electrodo P_1 debe resultar igual a la distancia entre dicho punto de origen y el electrodo P_2 , mientras que la distancia entre el punto de origen y los electrodos C_1 y C_2 puede variar según se adopte la configuración electródica de Wenner (fig. 6) o la de Schlumberger (fig. 9).

En la primera los cuatro electrodos deberán resultar siempre equidistantes (relación de separación 1:3); en la segunda la relación de separación entre electrodos de corriente y electrodos de potencial varía de un mínimo de 1:5 a un máximo de 1:20.

Con la primera configuración electródica, que es la que se adopta también en los perfiles de resistividad (proyección horizontal), la profundidad de exploración corresponde a la tercera parte de la distancia $C_1 C_2$.

En la configuración de Schumberger la profundidad de exploración corresponde aproximadamente a la cuarta parte de la distancia entre C_1 y C_2 , suponiendo que las superficies equipotenciales alrededor de los electrodos de corriente formen semi-esferas indeformadas.

En realidad esta representación teórica de las superficies equipotenciales no corresponde a los hechos constatados en la práctica en las prospecciones efectuadas con el método de resistividad. Los hemisferios que se forman alrededor de los electrodos C_1 y C_2 , al energizar el terreno resultan más o menos deformados de acuerdo con la conductividad de los estratos en que penetra la corriente que se envía al suelo. Por consiguiente las relaciones entre distancia eléctrica y profundidad de exploración varían según la naturaleza de las formaciones geológicas atravesadas por la corriente. Así, por ejemplo, en áreas en que la resistividad aumenta con la profundidad, el espesor de la masa de terreno por donde pasa la corriente es inferior a la tercera parte del valor de la separación eléctrica que se adopta para la configuración de Wenner. Generalmente la profundidad de exploración oscila entre $1/4$ y $1/6$ de la distancia existente entre los electrodos de envío de corriente, dependiendo la deformación de las superficies equipotenciales de varios factores, tales como las conductividades relativas de los estratos que constituyen el subsuelo, las variaciones laterales a poca profundidad de la superficie del terreno, la proximidad de cuerpos conductores ubicados en la superficie, edificios, etc., y la estratificación de las formaciones geológicas en que penetra la corriente, debido al hecho de que en las rocas estratificadas la corriente eléctrica se propaga más fácilmente a lo largo de la estratificación que perpendicularmente a ella.

ANISOTROPIA.

Aprovechando éste fenómeno es posible determinar, mediante mediciones de resistividad, el rumbo de los estratos, en formaciones del tipo panpeano, donde no hay afloramientos que permitan conocer la posición de las rocas estratificadas cubiertas por una capa uniforme de terreno reciente. Para ello es suficiente efectuar dos o tres sondeos eléctricos, orientando los electrodos, en cada sondeo, primero a lo largo de una línea y luego a 90° con ésta.

Schlumberger y otros investigadores, tratando el fenómeno, calcularon la deformación de las superficies equipotenciales, introduciendo un coeficiente de anisotropía λ dado por la relación:

$$\lambda = \sqrt{\frac{rt}{rl}}$$

donde "rt" indica la resistividad siguiendo el rumbo de la estratificación y "rl" la resistividad perpendicular a ese rumbo. Si el terreno en que se envía la corriente fuese isótropo y homogéneo, las superficies equipotenciales alrededor del punto de contacto tierra-electrodo serían esferas; pero como el terreno presenta siempre una anisotropía más o menos acentuada, las superficies equipotenciales son elipsoides de revolución, en los cuales la relación entre sus semi-ejes es igual al coeficiente de anisotropía.

Una consecuencia interesante de la determinación de este coeficiente, que tiene influencia en la interpretación de los datos obtenidos en la prospección por resistividad, ha sido puesta en evidencia por J.J.Jakosky. Ella concierne a la aplicación de las fórmulas derivadas de

$$\lambda = \sqrt{\frac{rt}{rl}}$$

a un medio estratificado que comprende varios estratos para-

lelos, proporcionando la resistividad de cada estrato.

Dicha resistividad, en efecto, es igual a $\sqrt{rl \cdot rt}$, donde "rl" y "rt" indican, como ya se dijo, las respectivas resistividades longitudinal y transversal del estrato; mientras que " $\lambda \cdot d$ " indica el espesor, siendo "d" el espesor efectivo del estrato y λ su coeficiente de anisotropía.

En las prospecciones en que la orientación del cuadripolo para determinados sondeos no ha podido cumplirse rigurosamente a causa de obstáculos superficiales, conviene tener en cuenta dicho coeficiente para corregir las resistividades de los sondeos en que la orientación electródica se haya apartado de la orientación general, haciendo posible de esta manera una más exacta interpretación de todos los valores registrados.

SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE WENNER.

Supongamos que se deba efectuar un sondeo eléctrico en un punto cualquiera del terreno para determinar la resistividad aparente del subsuelo en ese punto, de 2 en 2 metros, hasta una profundidad de 20 metros.

Se fija en el suelo, en el punto elegido, una estaca, y ésta será el centro (punto de origen) del sondeo. De un lado y del otro de este punto se fijan otras estacas, bien alineadas, numeradas de 1 a 30 por cada lado, separadas 1 metro entre sí (desarrollo total de la línea: 60 metros). Se colocan delante de las estacas 1A y 1B los electrodos de potencial P_1 y P_2 , y los electrodos de corriente C_1 y C_2 delante de las estacas 3A y 3B.

Se envía la corriente al terreno y se efectúan las lecturas de los miliamperes y los milivoltios que pasan por los respectivos instrumentos.

La resistividad con los cuatro electrodos en esta posición, se refiere a la profundidad de 2 metros, y se la

determina con la relación de Wenner.

Efectuada esta medición, se llevan los electrodos P_1 y P_2 a las estacas 2A y 2B, y los electrodos C_1 y C_2 a las estacas 6A y 6B. Se envía otra vez la corriente al terreno y se hacen las lecturas de I y V en el aparato. La resistividad resultante de esta segunda medición se referirá a la profundidad de 4 metros. Para medir la resistividad a 6 metros de profundidad, se colocarán los electrodos P_1 y P_2 en las estacas 3A y 3B, y C_1 C_2 en 9A 9B, siguiendo así progresivamente hasta llegar a las estacas 10A 10B y 30A 30B respectivamente, correspondiendo esta posición electródica a la profundidad de 20 metros. (figura 6).

Luego de haber terminado las mediciones, se traza el gráfico del sondeo efectuado, poniendo en el eje de las ordenadas las profundidades y en el de las abscisas los respectivos valores de resistividad.

SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE SCHLUMBERGER.

En muchos casos, y especialmente cuando la superficie del terreno a prospectar es bastante accidentada, se prefiere usar la configuración electródica de Schlumberger, que consiste en dos electrodos de corriente C_1 C_2 , y dos electrodos de potencial P_1 P_2 perfectamente alineados sobre el terreno.

En el empleo de esta configuración, las mediciones se efectúan aumentando la distancia entre C_1 y C_2 , simétricamente con respecto al punto de origen del sondeo, sin variar empero la distancia entre los electrodos P_1 y P_2 durante al menos cinco o seis determinaciones consecutivas. La resistividad aparente obtenida en cada medición corresponderá a una zona más profunda que la anterior, cuyo valor se deduce de la relación:

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

Donde K es el factor geométrico:

$$K = 0,785 \cdot \left(\frac{C_1 \cdot C_2^2}{P_1 \cdot P_2} - 1 \right) \quad \text{siendo}$$

ΔV la diferencia de potencial, en voltios, entre los electrodos P_1 y P_2 .

I la intensidad de corriente, en amperes, que pasa en el terreno;

L la distancia en metros, que separa los electrodos P_1 y P_2 .

Realizada la primera serie de determinaciones, antes de efectuar las mediciones sucesivas, correspondientes a la segunda serie, se aumenta la distancia entre los electrodos de potencial, manteniendo inalterada la relación de distancia con los electrodos de corriente, la cual deberá ser la misma que se haya adoptado al iniciarse el sondeo.

En la práctica se aumenta la distancia de los electrodos de potencial cuando la tensión que llega a ellos es demasiado baja y la sensibilidad del instrumento que debe medirla no permite más apreciar las variaciones que puede presentar.

SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE LEE.

Una modificación al método de Gish-Rooney ha sido aportada por F.W.Lee, quien introdujo un tercer electrodo de potencial P_0 en la configuración de Wenner, en correspondencia del centro del sondeo, a mitad de distancia entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 . Con esta configuración electródica, la prospección puede efectuarse tanto con aparatos de corriente continua, como con los de corriente conmutada.

Las determinaciones de resistividad se efectúan

midiendo primero la intensidad de corriente I que pasa entre los electrodos de envío C_1 y C_2 y la diferencia de potencial V_1 entre P_0 y P_1 . El valor $R_1 = V_1/I$ servirá para calcular la resistividad del volumen del terreno comprendido entre P_0 y P_1 . Midiendo después la intensidad de corriente I que pasa entre los electrodos de envío C_1 y C_2 y la diferencia de potencial V_2 entre P_0 y P_2 , tendremos $R_2 = V_2/I$, con el cual se calculará la resistividad del volumen comprendido entre P_0 y P_2 .

La resistividad del subsuelo entre P_0 y P_1 es dada por

$$\rho_1 = 4 \pi a. \frac{\Delta V_1}{I}$$

La resistividad de la zona comprendida entre P_0 y P_2 es dada a su vez por

$$\rho_2 = 4 \pi a. \frac{\Delta V_2}{I}$$

Aumentando progresivamente la separación eléctrica "a", se aumenta la profundidad de exploración vertical y, continuando las mediciones en la forma indicada, se obtienen dos curvas de resistividad para las dos mitades del perfil en que se realiza el sondeo. Si en las dos zonas divididas por el tercer electrodo de potencial no hay ningún cuerpo que tenga mayor o menor conductividad que la que tienen las formaciones geológicas circundantes, o ninguna modificación estructural, las dos curvas resultantes (ρ_1 y ρ_2) se superpondrán casi perfectamente una a la otra.

En caso contrario, la curva de resistividad correspondiente a la mitad del perfil en que hay un cuerpo conductor o un cambio estructural o litológico, presentará una diferencia con respecto a la otra a partir de la profundidad en que el cuerpo en cuestión o la estructura empieza a influir en las

mediciones.

Con este sistema de prospección aumenta notablemente la precisión de las investigaciones del subsuelo, resultando más fácil localizar las heterogeneidades existentes en áreas muy reducidas.

PERFILES DE RESISTIVIDAD Y CARTA DE RESISTIVIDADES.

Las determinaciones de la resistividad aparente del subsuelo con estos perfiles difieren muy poco de las que se realizan con los sondeos, y las diferencias conciernen solamente a la modalidad del desplazamiento de los cuatro electrodos. En efecto, en un sondeo, como ya hemos visto, los electrodos se alejan simétricamente y progresivamente de un punto fijo del terreno, que no se cambia por otro hasta que no se alcance la profundidad de exploración previamente establecida. Si, por el contrario, se mantiene inalterada la distancia entre los electrodos y se los desplaza simultáneamente a lo largo de una línea, como si se tratara de un sistema rígido, avanzando una cantidad constante de metros por cada determinación de resistividad, se realiza la exploración horizontal de una sección de terreno, cuya profundidad corresponde a $1/3$ de la distancia que separa los electrodos de envío de corriente.

La configuración electródica que se emplea en estos perfiles es la de Wenner, y el desplazamiento simultáneo de los electrodos se efectúa lateralmente a lo largo de líneas previamente estaqueadas.

En el caso de que deba investigarse una zona para localizar una veta subvertical de mineral, o una falla que pase por la región, conviene efectuar la prospección mediante varios perfiles de resistividad paralelos, eligiendo primero la profundidad de exploración que se debe llevar, la cual será, supongamos, de 20 metros. Se preparan entonces las líneas de

manera que corten la formación que se quiere investigar, clavando en el terreno un conveniente número de estacas de madera, numeradas, a la distancia de 20 metros una de otra (fig. 10). Se disponen luego los electrodos frente a las estacas 1, 2, 3, 4 del primer perfil y se efectúa la primera determinación de resistividad, la cual corresponderá a la sección de terreno comprendida entre los electrodos de potencial colocados frente a las estacas 2 y 3.

Efectuada la medición, se desplazan simultáneamente los cuatro electrodos a las estacas 2, 3, 4 y 5, correspondiendo al nuevo valor de resistividad, que resulte de esta medición, a la sección de terreno comprendida entre las estacas 3 y 4.

Se pasa luego con los electrodos a las estacas 3, 4, 5 y 6, repitiendo la misma operación, y se sigue así, desplazándose de una estaca a cada nueva determinación, hasta llegar al otro extremo del perfil.

El gráfico correspondiente a cada perfil se traza llevando sobre las abscisas las distancias medidas en la superficie del terreno, y sobre las ordenadas las resistividades aparentes calculadas mediante la relación de Wenner.

La interpretación del gráfico resultante no presentará dificultades porque pasando con los electrodos sobre una veta de mineral buen conductor o sobre una zona de falla, se notarán bruscas variaciones en los valores registrados, haciendo ello posible la exacta localización de la formación geológica que se investiga.

Otra representación gráfica se obtiene volcando en un plano topográfico la resistividad hallada para cada punto de los perfiles prospectados, y uniendo luego con una línea, por interpolación, todos los puntos de igual valor (fig. 11). Se confecciona de esta manera la llamada carta de resistivi-

dades, la cual permite localizar eventuales formaciones mineralizadas horizontales o subhorizontales, accidentes tectónicos, cambios litológicos, etc., ocultos bajo cubiertas sedimentarias de edad más reciente.

METODO DEL RECTANGULO.

En la prospección por perfiles de resistividad (que se realiza a una profundidad constante, previamente establecida, para confeccionar la carta de resistividades de una determinada área), a fin de ahorrar tiempo y mano de obra, y también a los efectos de reducir al mínimo los errores debidos a resistencias de contacto a los electrodos, se prefiere adoptar el método del rectángulo todas las veces que la topografía de la zona a investigar lo permita. Este método consiste en trazar sobre el terreno una línea central, de determinada longitud, en cuyos extremos se colocan los electrodos de envío de corriente C_1 y C_2 , los que se dejarán fijos. Luego, a ambos lados de la línea $C_1 C_2$ se trazan otras líneas paralelas, cuidando que el centro de ellas coincida con el de la línea central. El conjunto de perfiles que así se forma, configurará un rectángulo cuyos lados paralelos a $C_1 C_2$ no deben sobrepasar la relación de 1:3 con respecto a la longitud de $C_1 C_2$, y los lados perpendiculares no sobrepasen la relación $\frac{C_1 C_2}{2}$.

De esta manera, sobre una línea de base $C_1 C_2$, que tenga, por ejemplo, una longitud de 360 metros, es posible prospectar un área rectangular que tenga los lados paralelos a $C_1 C_2$ de 120 metros, y los lados perpendiculares de 180 metros (90 metros a cada lado de la línea central).

La separación de los perfiles que formarán el rectángulo puede variar entre 15 y 60 metros, de acuerdo a las informaciones que se necesitan; así también puede variar la separación de $P_1 P_2$ haciendo $C_1 C_2 / P_1 P_2$ del orden de 18 has

ta 30 cuando se quiere efectuar una prospección detallada (rectángulos cuyos perfiles tienen una separación de 15 a 30 metros), y del orden de 10 en investigaciones que abarquen grandes áreas (rectángulos con perfiles separados 50 metros o más) cuando se necesite conocer la tectónica regional.

En una prospección en la que se debe localizar una veta o un banco de mineral, es suficiente trazar una línea de base de 360 metros y un rectángulo central con un total de 7 perfiles de 120 metros cada uno, separados mutuamente 30 metros.

En cambio, para una prospección de mayor envergadura, en la cual por ejemplo se quiera seguir un paleorre- lieve bajo una potente capa sedimentaria reciente o moderna, conviene trazar una línea de 600 metros y un rectángulo cen- tral con 5 o más perfiles de 200 metros de longitud, separa- dos 50 metros entre sí (fig. 12).

Las mediciones se efectúan desplazando solamente P_1 y P_2 a lo largo de cada perfil, con la separación que con- venga.

Las lecturas de intensidad y voltaje, que entran en el cálculo de ρ , se anotan en una planilla en la cual pa- ra cada punto de los distintos perfiles el factor geométrico K esté ya calculado (tabla II), siendo:

$$K = 2 \pi \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_4}\right) - \left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\right)}$$

Suponiendo que se deba calcular el factor K para un rectángulo de 5 perfiles construido sobre una línea de ba- se $C_1 C_2$ de 600 metros, $P_1 P_2 = 40$ metros, d (separación entre perfiles) de 50 metros, y desplazamiento de $P_1 P_2$ cada 20 me- tros; primero se llevan a una planilla las distancias elec- tródicas aproximativas, correspondientes a cada desplazamien-

to de P_1 P_2 , que se obtienen aplicando el teorema de Pitágoras, según el esquema que se indica en la figura 12.

Como " r_1 " (distancia entre el electrodo C_1 y P_1) es la hipotenusa del triángulo rectángulo cuyos vértices son C_1 , P_1 y $-a6$, será igual a la raíz cuadrada de la suma del cuadrado del cateto formado por el electrodo C_1 y el punto $-a6$, que mide 180 metros; y del cuadrado del cateto formado por el punto $-a6$ y P_1 , que mide 100 metros. Por lo tanto

$$r_1 = \sqrt{180^2 + 100^2} = 206 \text{ metros.}$$

Para el cálculo de r_2 , r_3 y r_4 , que constituyen las hipotenusas de otros tantos triángulos rectángulos, se procede como para r_1 , y así también para calcular las distancias electródicas en cada desplazamiento de P_1 y P_2 a lo largo de los distintos perfiles del rectángulo.

Los valores de r_1 , r_2 , r_3 y r_4 se volcarán en una planilla (tabla I) para calcular con ellos el factor geométrico K .

En otra planilla, (tabla II) se anotan los valores de K correspondientes a los puntos de cada perfil en que se efectuarán las mediciones de intensidad y voltaje. Con los datos de I y V que se registren, se calcularán luego los valores de ρ de acuerdo a la fórmula

$$\rho = K \cdot \frac{V}{I}$$

y se volcarán en un plano topográfico para confeccionar una carta de las resistividades interpolando y uniendo con líneas los puntos de igual resistividad, o bien representando cada perfil con su curva individual.

TABLA I - PLANILLA DE DISTANCIAS (en metros) de r_1 , r_2 , r_3 y r_4 .

PERFIL α

P	r_1	r_2	r_3	r_4
5	180	220	420	380
4	200	240	400	360
3	220	260	380	340
2	240	280	360	320
1	260	300	340	300
0	280	320	320	280
-1	260	300	340	300
-2	240	280	360	320
-3	220	260	380	340
-4	200	240	400	360
-5	180	220	420	380

PERFIL $\beta\beta'$

P	r_1	r_2	r_3	r_4
5	186	226	423	383
4	206	245	403	363
3	225,5	265	383	343
2	245	284,5	363	324
1	265	304	343	304
0	284,5	324	324	284,5
-1	265	304	343	304
-2	245	284,5	363	324
-3	225,5	265	383	343
-4	206	245	403	363
-5	186	226	423	383

PERFIL $\gamma\gamma'$

P	r_1	r_2	r_3	r_4
5	206	242	432	393
4	224	260	412,5	374
3	241,5	278,5	393	354
2	260	297	374	335
1	278,5	316	354	316
0	297	335,5	335,5	297
-1	278,5	316	354	316
-2	260	297	374	335
-3	241,5	278,5	393	354
-4	224	260	412,5	374
-5	206	242	432	393

TABLA II

PERFIL $\alpha\alpha'$

P	mA	mV	K	\sim
5			6550	
4			7140	
3			7620	
2			7980	
1			8160	
0			8230	
-1			8160	
-2			7980	
-3			7620	
-4			7140	
-5			6550	

PERFIL $\beta\beta'$

P	mA	mV	K	\sim
5			5370	
4			6000	
3			6560	
2			6980	
1			7220	
0			7300	
-1			7220	
-2			6980	
-3			6560	
-4			6000	
-5			5370	

PERFIL α

P	mA	mV	K	\sim
5			4980	
4			5640	
3			6200	
2			6670	
1			6950	
0			7060	
-1			6950	
-2			6670	
-3			6200	
-4			5640	
-5			4980	

METODO DEL TRIPOLO.

Se trata de una variante del método de resistividad por perfiles (exploración horizontal), en el cual se deja fijo uno solo de los electrodos de envío de corriente, colocándolo muy lejos (electrodo a infinito) y perpendicular a la línea en que se desplazarán los otros electrodos (fig. 13).

La distancia del electrodo fijo al tripolo oscila por lo general entre 400 y 600 metros, y se la considera prácticamente infinita con respecto a las distancias existentes entre los tres electrodos que se desplazan en el terreno.

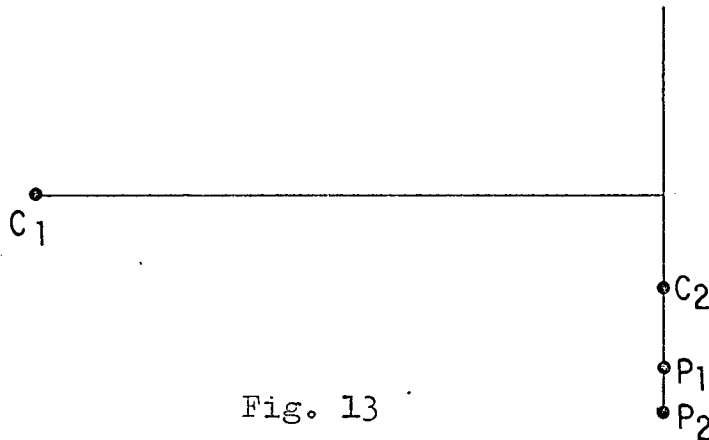


Fig. 13

El electrodo colocado "a infinito" puede estar, indiferentemente, a un lado o al otro del perfil que se quiere explorar. Con la disposición electródica arriba indicada da lo mismo que el electrodo móvil de envío de corriente (C_2) preceda a P_1 en los desplazamientos que se efectúan a lo largo del perfil, o que siga a P_2 . Esto representa una gran ventaja, especialmente cuando se deben efectuar las mediciones en zonas accidentadas, haciendo ello posible que en la prospección del subsuelo se llegue con P_1 o P_2 hasta el pie de una pared rocosa, el borde de un barranco, un muro, etc.

Antes de efectuar las mediciones sistemáticas a lo largo de las líneas trazadas para la prospección, se establece la profundidad de exploración que interesa alcanzar, a los efectos de fijar la conveniente separación entre los tres electro-

dos que se desplazarán en el terreno.

Para calcular la profundidad de exploración P_e hay que cuidar, en lo posible, que se verifique la relación

$$\frac{C_2 P_1}{P_1 P_2} = 3$$

Hecho esto, se calcula la distancia entre el electrodo C_2 y el centro O de $P_1 P_2$, siendo

$$P_e = \frac{C_2 O}{\frac{C_2 P_1}{P_1 P_2}} \quad (1)$$

Ejemplo:

$$\overline{C_2 P_1} = 60 \text{ m}$$

$$\overline{P_1 P_2} = 20 \text{ m}$$

$$\text{centro de } \overline{P_1 P_2} = 10 \text{ m} \quad \left(\frac{P_1 P_2}{2} \right)$$

$$\overline{C_2 O} = 60 \text{ m} + 10 \text{ m} = 70 \text{ m}$$

Resolviendo la (1) tendremos:

$$70 \cdot \frac{20}{60} = 23,33$$

lo que corresponde a la profundidad de la exploración.

Para el cálculo de la resistividad con este método se aplica la fórmula simplificada

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

siendo

$$K = \frac{2 \pi}{\frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_2 P_2}}$$

Reemplazando las letras con los valores numéricos de $C_2 P_1$ y $C_2 P_2$ del ejemplo dado, tendremos:

$$C_2 P_1 = 60$$

$$C_2 P_2 = 80$$

luego,

$$K = \frac{2 \pi}{\frac{1}{60} - \frac{1}{80}} = 1.507,2$$

Por tanto, los valores de resistividad para cada medición, a lo largo del perfil, serán dados por:

$$\rho = 1.507,2 \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

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

- /1/ - HELLAND C.A., Geophysical Exploration; Prentice-Hall, Inc. New York; 1946.
- /2/ - JAKOSKY J.J., Exploration Geophysics; Trija Publishing Company - Newport Beach, California, 1957.
- /3/ - PETRUCCI G., Geofisica applicata alla ricerca dei minerali e dell'acqua nel sottosuolo; U. Hoepli Edit., Milano 1959.
- /4/ - ROTHE E. y J-P., Prospection Geophysique; Gauthier-Villars Edit. Paris 1952.

I N D I C E

INTRODUCCION.....	pág.	1
LOS METODOS ELECTRICOS.....	"	5
METODO DE LA POLARIZACION ESPONTANEA.....	"	5
YACIMIENTOS QUE PRESENTAN POLARIZACION ESPONTANEA.....	"	7
APLICACION DEL METODO DE LA POLARIZACION ESPONTANEA.....	"	11
APARATOS DE MEDICION.....	"	15
OPERACIONES EN EL CAMPO.....	"	17
METODO DE LA POLARIZACION INDUCIDA.....	"	21
METODO DE RESISTIVIDAD.....	"	22
APARATOS DE MEDICION.....	"	26
EQUIPOS DE PROSPECCION POR RESISTIVIDAD Y TECNICAS OPERATIVAS.....	"	28
APARATOS DE CORRIENTE CONTINUA.....	"	28
APARATOS DE CORRIENTE CONMUTADA.....	"	29
OPERACIONES EN EL CAMPO.....	"	33
MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.....	"	33
ANISOTROPIA.....	"	35
SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE WENNER.....	"	36
SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE SCHLUMBERGER.....	"	37
SONDEOS ELECTRICOS SEGUN LA CONFIGURACION ELECTRODICA DE LEE.....	"	38
PERFILES DE RESISTIVIDAD Y CARTA DE RESISTIVIDADES.....	"	40
METODO DEL RECTANGULO.....	"	42
METODO DEL TRIPOLO.....	"	47
BIBLIOGRAFIA.....	"	50

C.N.E.A.
GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

POLARIZACIÓN ESPONTÁNEA

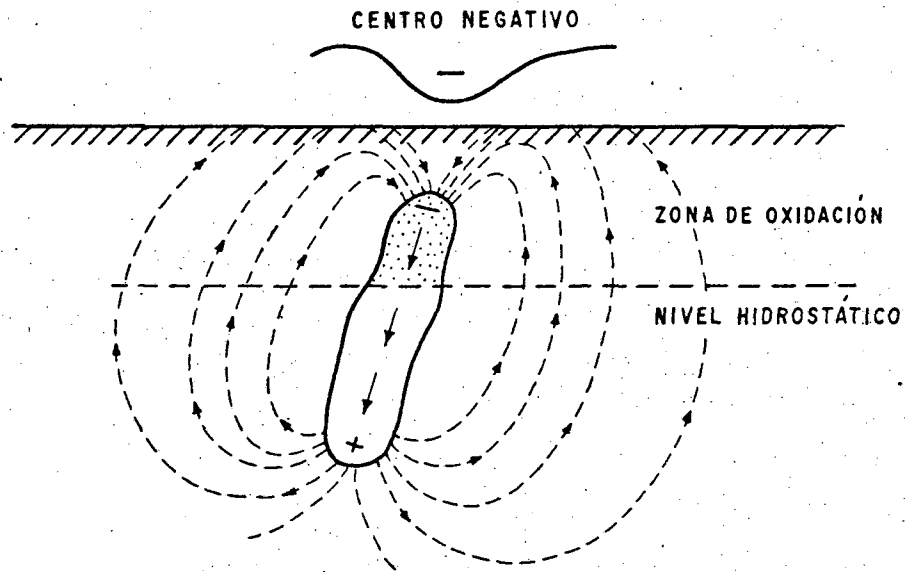


Fig.1

C.N.E.A.

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

MÉTODO DE LA POLARIZACIÓN ESPONTÁNEA

PERFILES DE POTENCIALES NATURALES

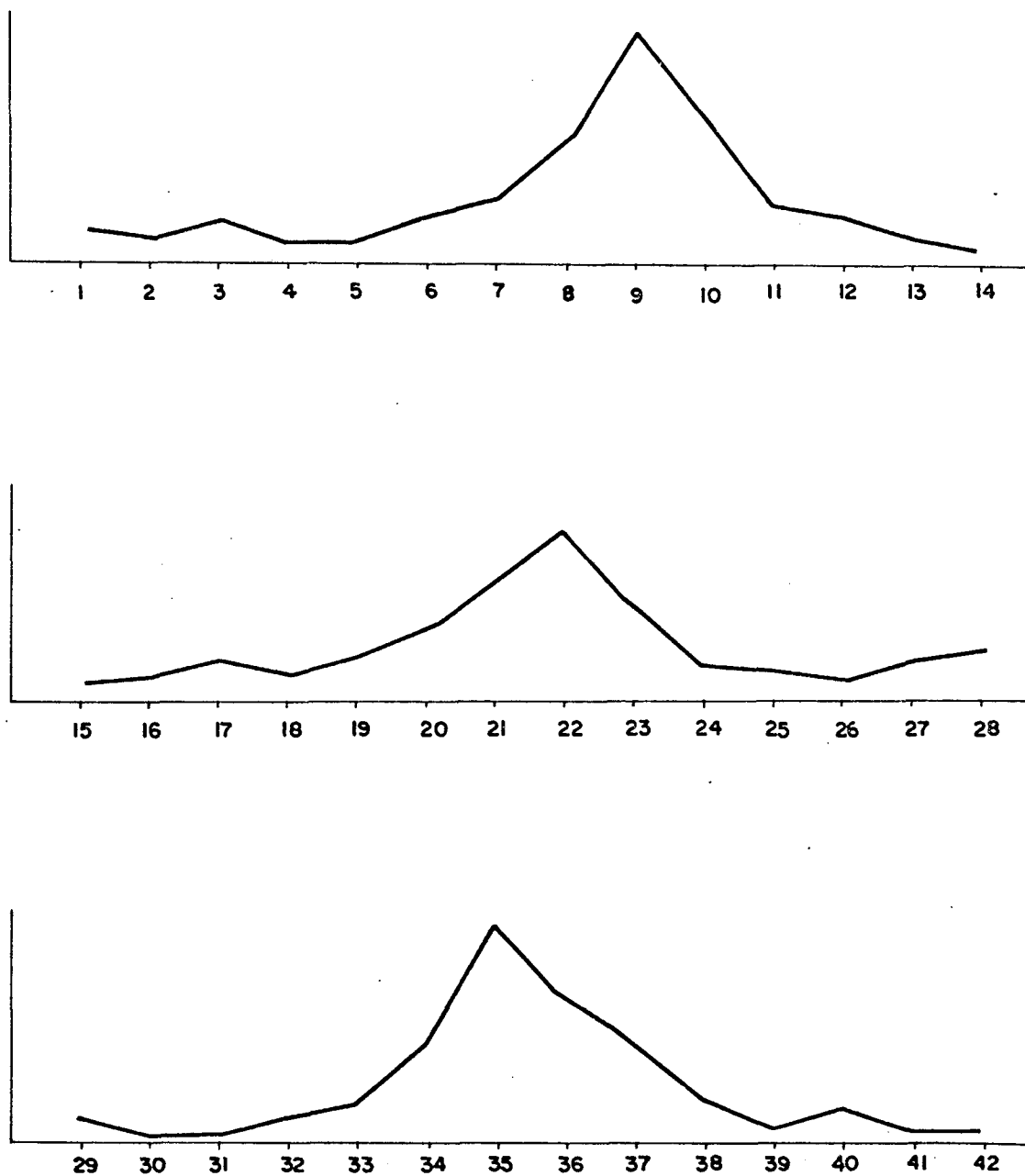


Fig. 2

C.N.E.A.

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD

DETERMINACIÓN GRÁFICA DE LA CÚSPIDE DEL YACIMIENTO

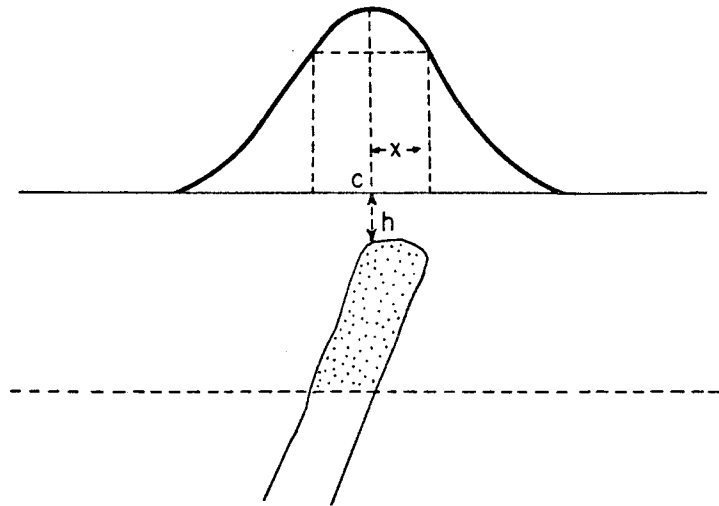


Fig. 3

C. N. E. A.
GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

MÉTODO DE LA POLARIZACIÓN INDUCIDA

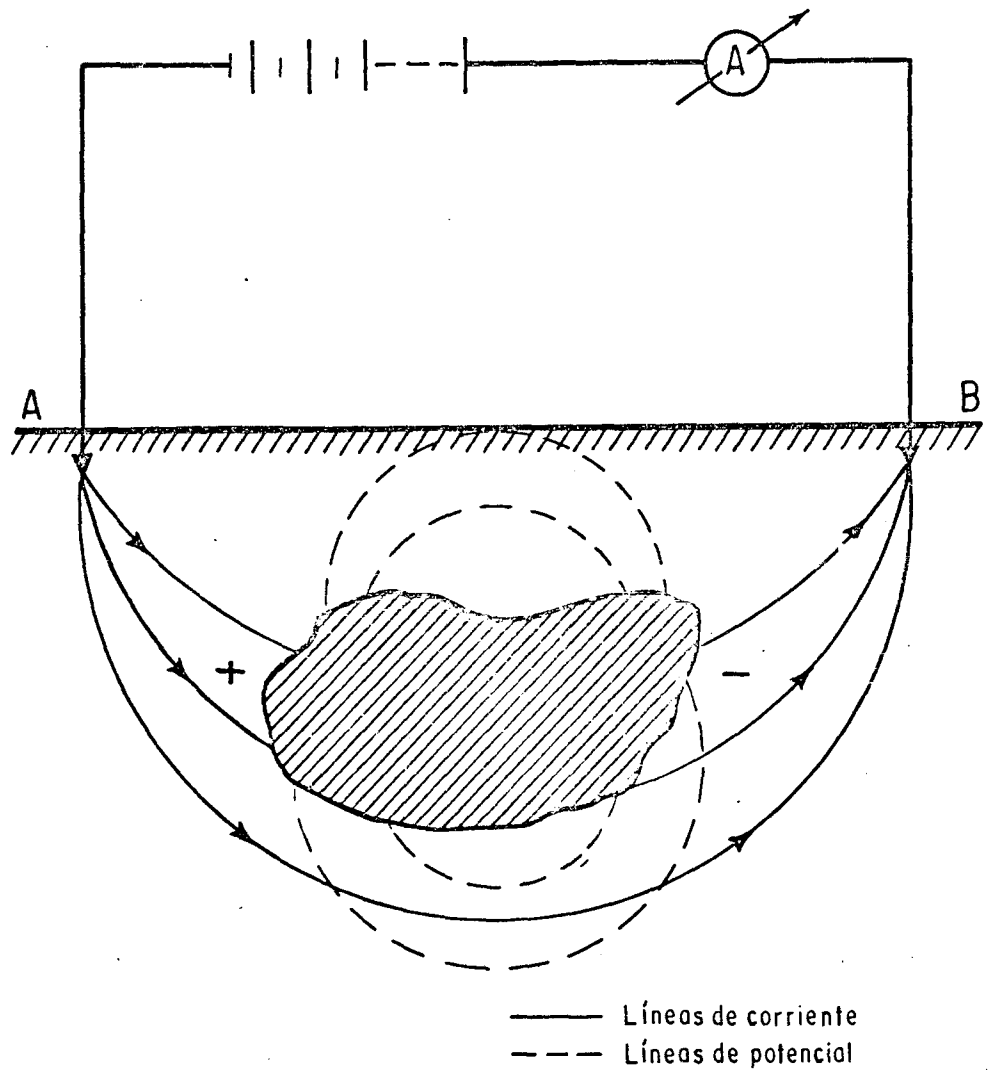


Fig. 5

C.N.E.A.

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

DISPOSITIVO PARA MEDICIONES DE RESISTIVIDAD
Y LÍNEA PARA SONDEOS ELÉCTRICOS

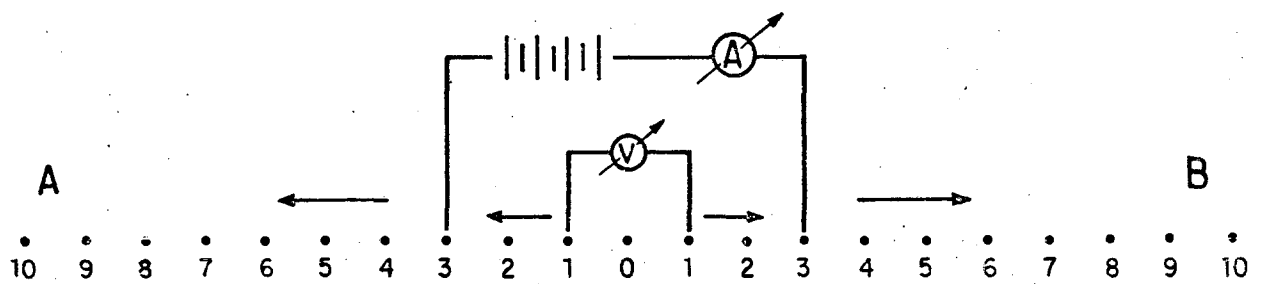


Fig. 6

C.N.E.A.

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

OHMETRO DE MEGGER

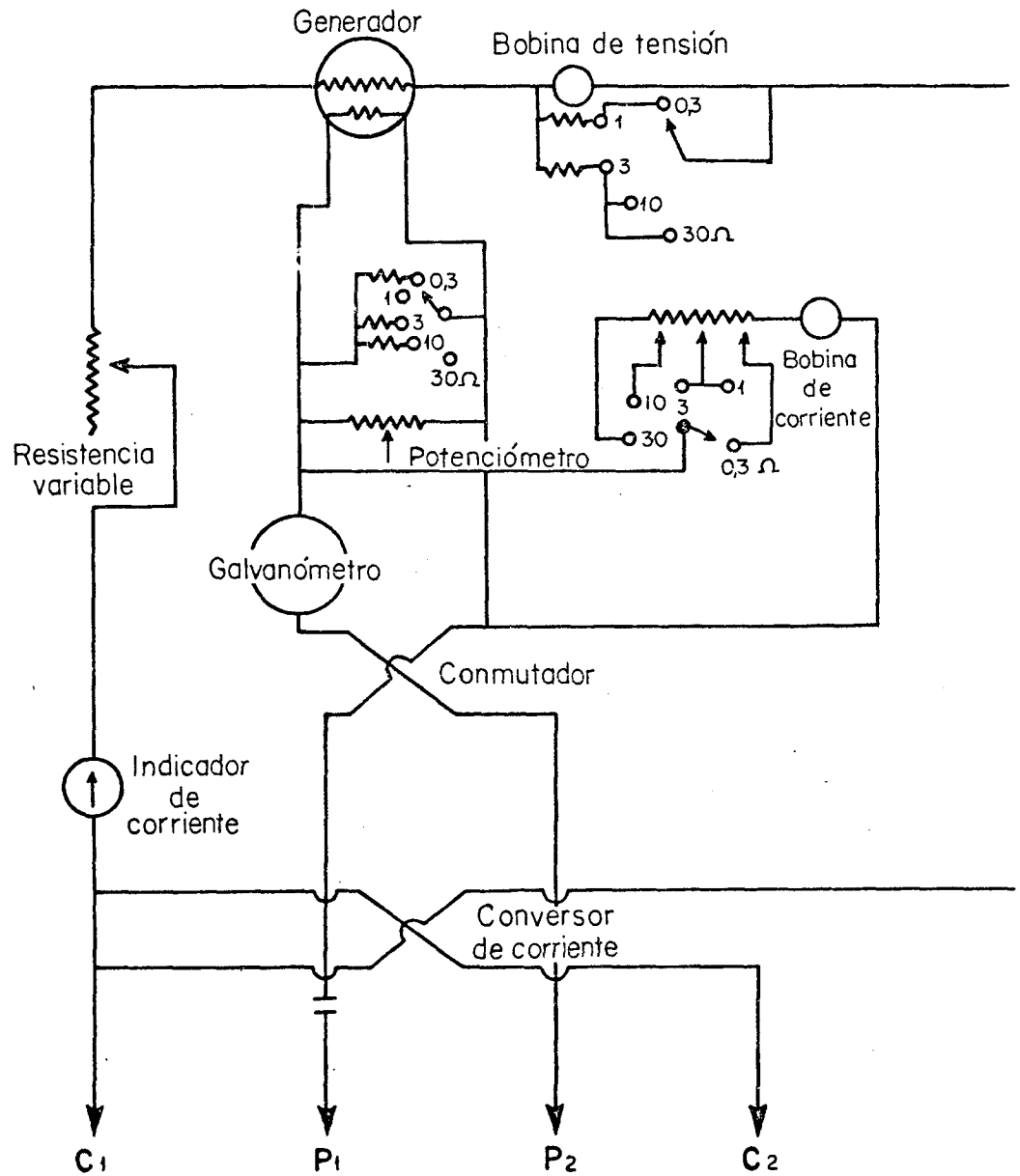
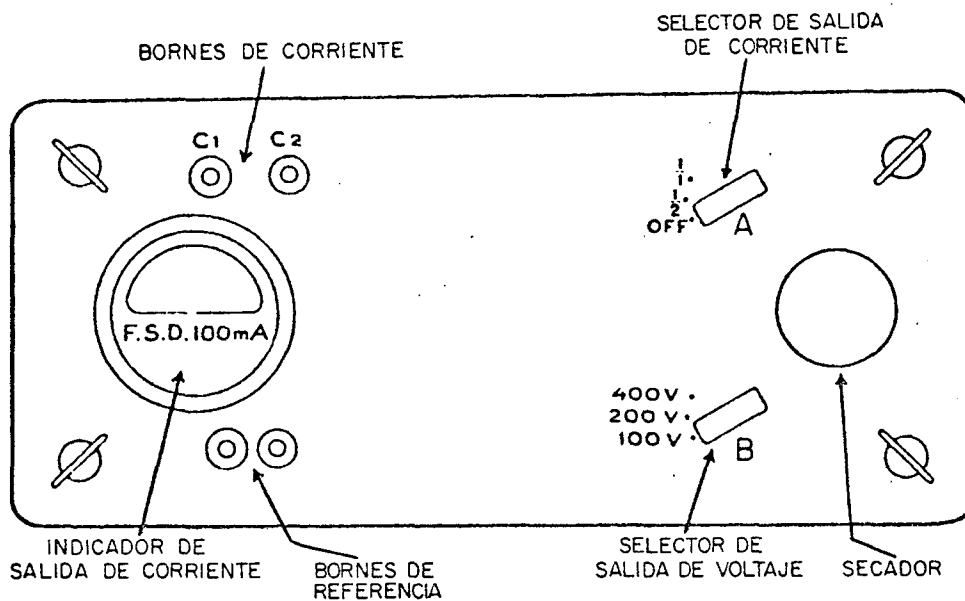


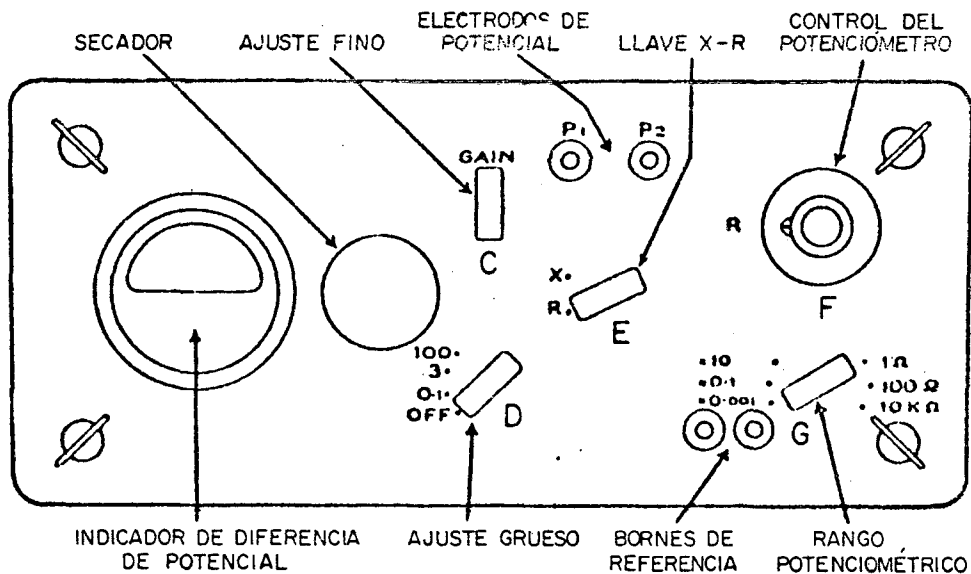
Fig. 7

ABEM-TERRAMETER

Fig. 8



CAJA G



CAJA V

ABEM - TERRAMETER

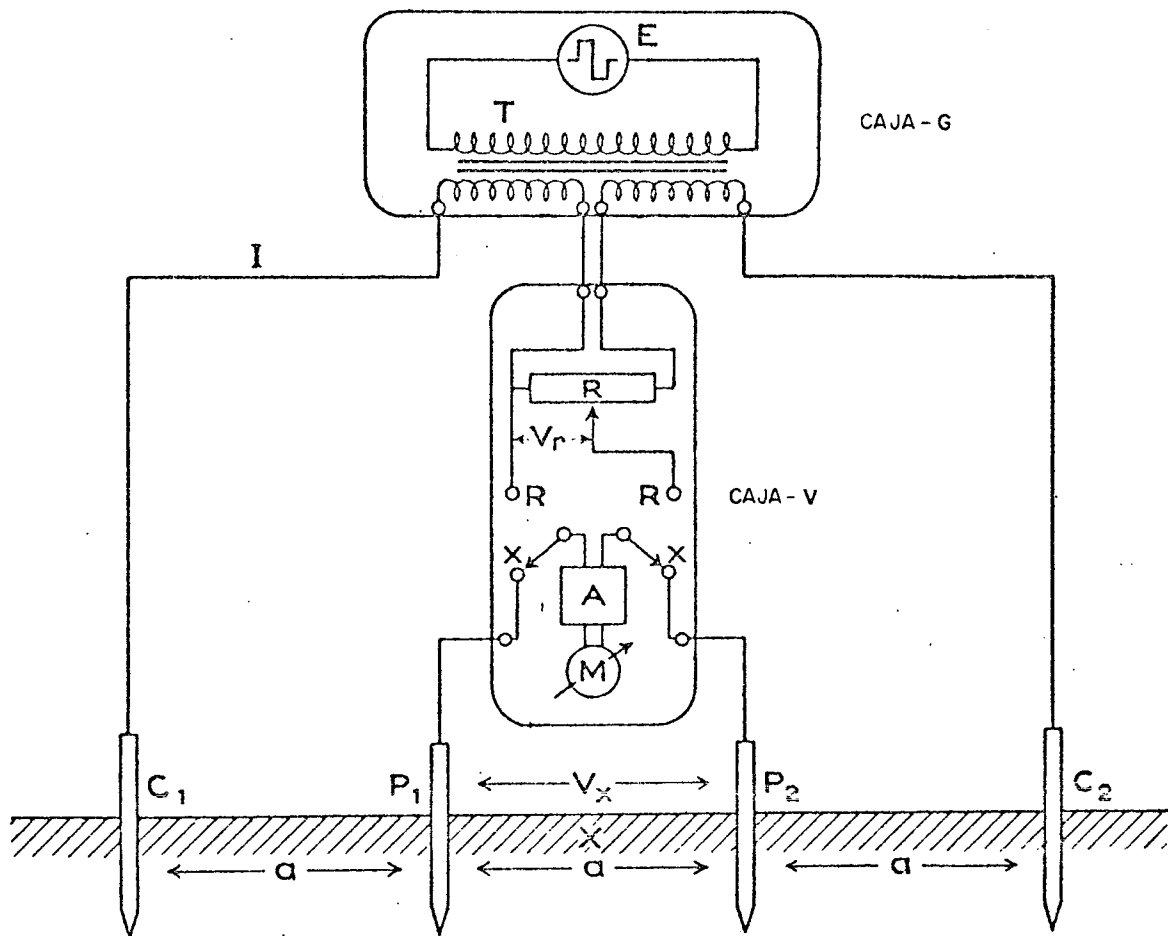
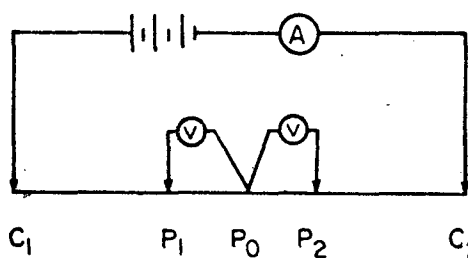
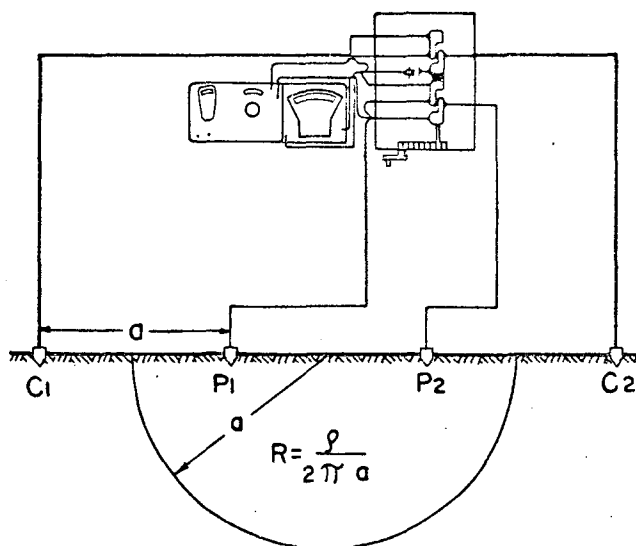
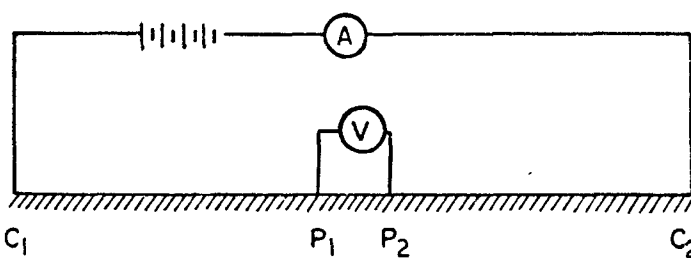


Fig. 8 bis
CIRCUITO ESQUEMÁTICO

DISPOSICIONES ELECTRÓDICAS



CONFIGURACIÓN ELECTRÓDICA
DE LEE



CONFIGURACIÓN ELECTRÓDICA DE
SCHLUMBERGER

C.N.E.A

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

PERFIL DE RESISTIVIDAD (DESPLAZAMIENTO LATERAL)

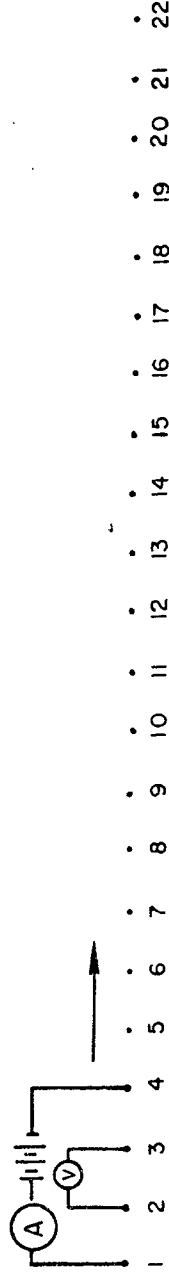








Fig.10

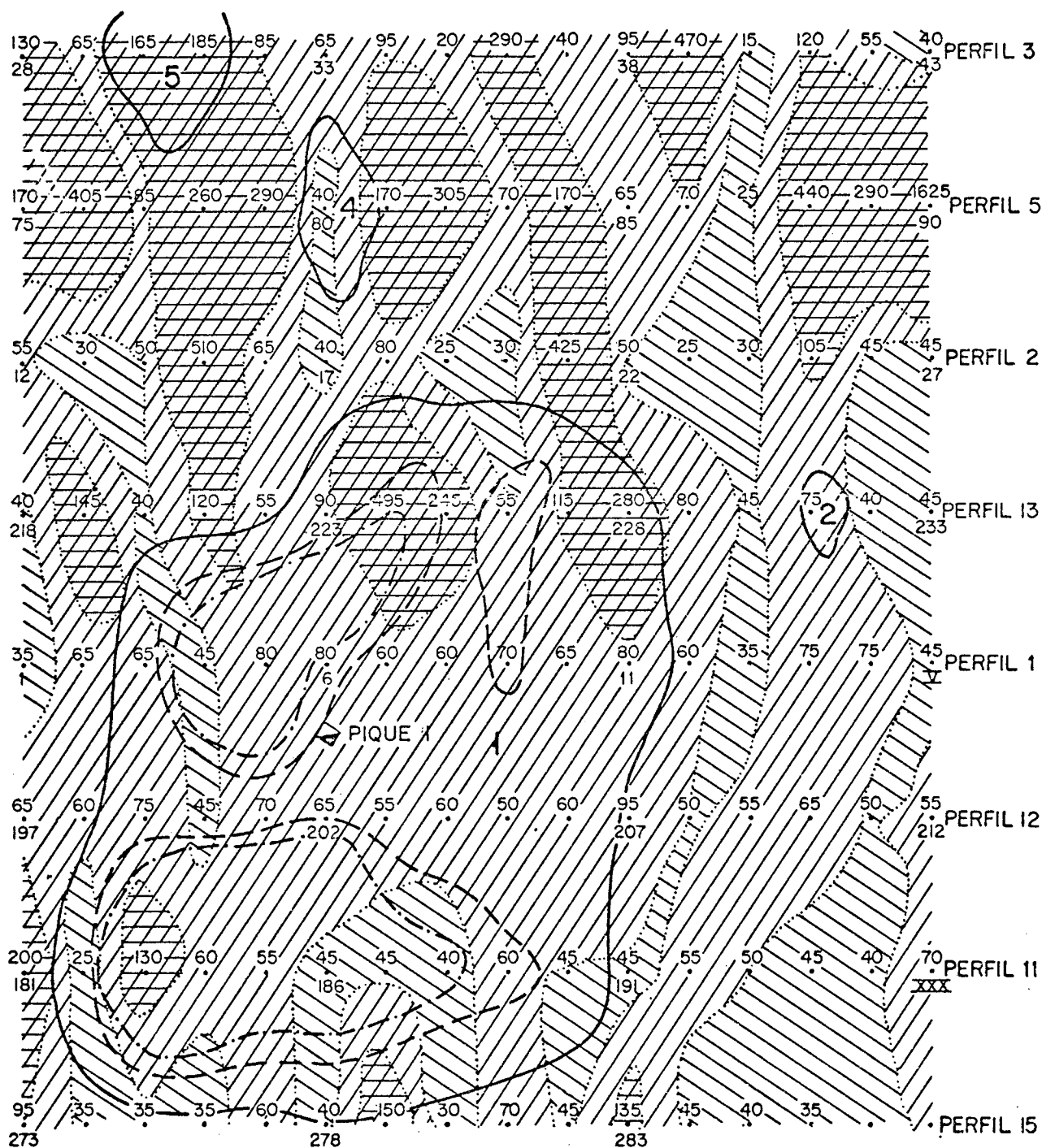
YACIMIENTO LOS ADOBES

CARTA DE RESISTIVIDADES E IONOMETRIA

REFERENCIAS

- | | | | |
|---|---------------|---|-------------|
|  | 0 ÷ 50 Ω/m. |  | > 100 m V/s |
|  | 50 ÷ 100 Ω/m. |  | > 250 " |
|  | > 100 Ω/m. |  | > 500 " |

ESCALA 1: 1000



C.N.E.A

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

MÉTODO DEL RECTÁNGULO

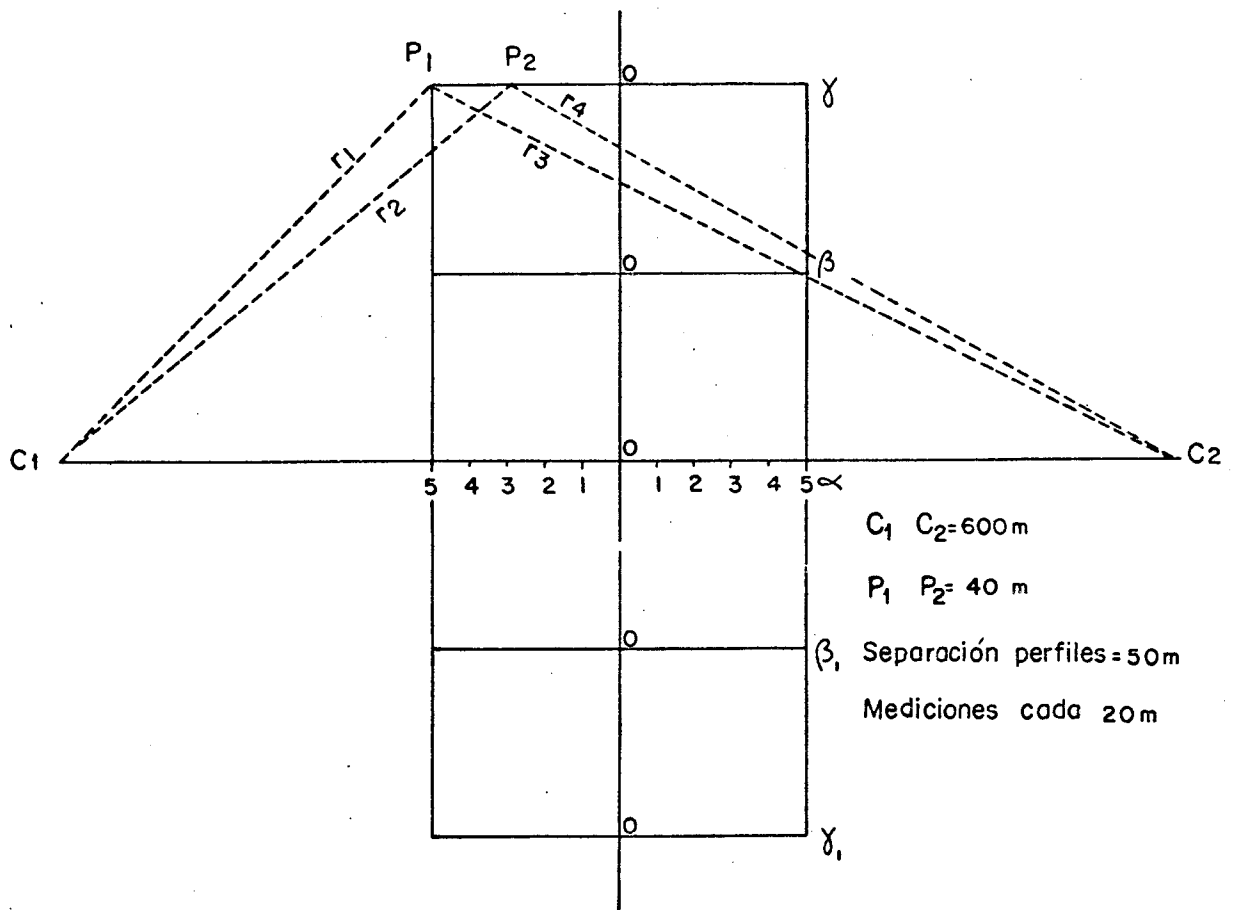


Fig.12

C.N.E.A

GERENCIA DE MATERIAS PRIMAS

MÉTODO DEL TRÍPOLO

