

APLICACIONES DE SONDEOS DE POLARIZACIÓN INDUCIDA

*José E. Arce Helberg **

*José R. Arce Alleva **

RESUMEN

El empleo del método de Polarización Inducida ha estado sujeto a decisiones no siempre basadas en criterios técnicos y geológicos. Es conveniente analizar las ventajas y problemas de las diversas maneras de obtener lecturas IP, escogiendo y ajustando los parámetros operativos de forma tal que los datos de campo permitan preparar documentos gráficos de máxima utilidad para la exploración. Llama la atención notar que la gran mayoría de operadores geofísicos ha trabajado sólo con una de las seis técnicas de campo normalmente disponibles, cuyos parámetros han sido adecuadamente establecidos hace varias décadas.

En los últimos veinticinco años los autores han realizado exploraciones de Polarización Inducida sobre más de 140 yacimientos minerales de diverso tipo, en los que han sido estudiados más de 4000 kilómetros de perfiles de avance lateral a penetración constante y más de 5000 sondeos de penetración variable. Se emplearon las seis configuraciones de electrodos de uso práctico, aplicándolas según fuera conveniente a las condiciones geológicas. Con tales experiencias han podido desarrollar conceptos que serán analizados en el presente trabajo, el mismo que intentará ser principalmente para exploradores, con incidencia en cuestiones especializadas que se limiten sólo a asuntos imprescindibles para la mejor comprensión de las ideas expuestas.

ANTECEDENTES

La permanencia temporal de corriente eléctrica en el subsuelo luego de haber creado un campo de energía había sido observada por varios investigadores (C. Schlumberger, 1913), desde que a principios del siglo se iniciaran las mediciones de resistividad eléctrica del subsuelo. El fenómeno es relativamente común y se había intentando incluso utilizarlo en aplicaciones militares, hasta que en 1946 la Newmont Mining Corporation (Brant, 1959), recomendara una investigación de laboratorio. El análisis teórico del fenómeno de "sobrevoltaje", luego conocido como Polarización Inducida, fue realizado entre 1947 y 1949 por Harold O. Seigel, como parte de su trabajo doctoral en la Universidad de Toronto. Fue Seigel (1959) quien publicó las primeras curvas teóricas de interpretación, con ejemplos de sondeos verticales y cálculos de profundidades con varios dispositivos de electrodos. En su tesis fue tratado el empleo tanto de corriente continua como de alterna, considerando que con la continua las mediciones eran absolutas, mientras que con la alterna eran relativas.

En 1951, J.R. Wait, también en la Universidad de Toronto, realizó su investigación doctoral acerca del sobrevoltaje en corriente alterna. En 1963 Hallof propuso la técnica adecuada para la operación en corriente alterna, dipolo-dipolo, junto con su forma de graficación, que han resultado siendo de empleo exclusivo de los geofísicos que utilizan este tipo de energización.

En la expansión de uso del método de Polarización Inducida, en la década del sesenta, la mayoría de geofísicos fue influida por el trabajo en perfiles dipolo-dipolo de corriente alterna y, en gran parte, nunca más utilizaron las otras cinco configuraciones que, además de aquella, pueden ser empleadas con la corriente continua. A pesar que ahora cada vez más se usa ésta última, muchos operadores siguen aplicándola con el dispositivo creado, fundamentalmente, para la corriente alterna.

Desde 1980 ha sido cada vez más extensa la disponibilidad de computadoras personales, lo que ha significado que no haya ya razones que impidan los cálculos de curvas de Polarización Inducida, con determinación

* Geofísicos de Exploraciones, Petit Thouars 4380 • Miraflores - Lima

de parámetros reales físicos (resistividad y carga-bilidad) y geométricos (espesores y profundidades). La teoría del método (Seigel, 1949) fue completada con cálculos de curvas de sondeo y entre las primeras interpretaciones de casos reales publicados (Seigel, 1959; Baldwin, 1959) son documentados registros de penetración variable de Cuajone (Fig. 1), aparte de perfiles de variaciones laterales a penetración constante. Los sondeos están calculados para valores reales, mientras que los perfiles son interpretados para cambios relativos de valores aparentes de campo. Estos procedimientos siguen siendo aplicados en la actualidad, fundamentalmente sin mayores cambios. Los criterios de interpretación, cualitativa de perfiles y cuantitativa de sondeos, solamente han tenido mejoras por mejor productividad en el procesamiento de datos con computadoras.

Los datos de campo aparentes, provenientes de perfiles de avance lateral a penetración constante, son graficados directamente y procesados como perfiles de curvas, como pseudo-secciones o como planos de isovalores. Con los perfiles no se requiere medios automáticos de cálculo. Los datos de campo aparentes provenientes de sondeos de penetración variable, son graficados como curvas en formato bilogarítmico para ser calculadas con el objeto de obtener parámetros reales, físicos y geométricos, con los que se preparan planos de isovalores reales y de espesores (o profundidades). Los cálculos de curvas de sondeo son complejos y sólo con la disponibilidad de computadoras personales, especialmente las portátiles en el trabajo de campo, ha sido posible la aplicación práctica de esta técnica.

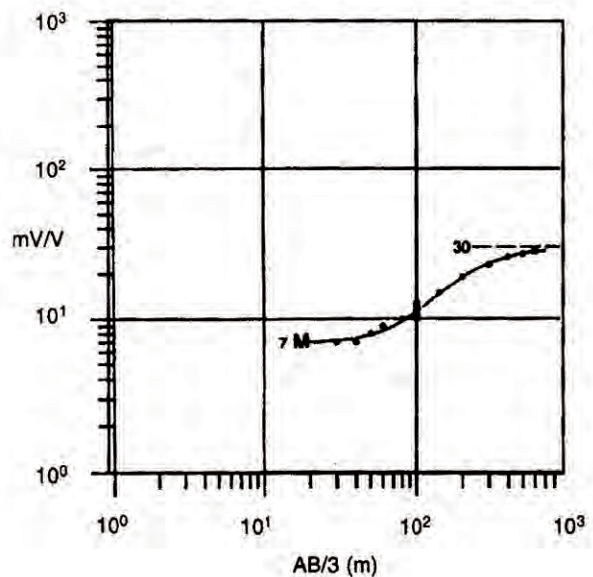
EL MÉTODO GEOFÍSICO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA

En ciertas condiciones geológicas, cuando hay mezclas de minerales de alta conductividad electrónica (como los sulfuros con lustre metálico) con otros no conductores (como los componentes fundamentales de las rocas: cuarzo, feldespatos, carbonatos, etc.) el subsuelo puede presentar características de interés para la exploración minera. Al aplicarse un campo eléctrico creado en la superficie del terreno, por medio de dos electrodos, el subsuelo queda energizado por un tiempo mayor que el de la duración del campo aplicado, lo cual significa que las combinaciones de conductores y "aislantes", en presencia de un electrolito (agua), convierten a las rocas en condensadores eléctricos. Cada partícula conductora contribuye al efecto total de "capacitancia" que puede ser medido por medio de otros dos electrodos. La diferencia fundamental que hay entre un condensador electrónico de uso en laboratorios o en instrumentos, y el condensador geológico descrito, está en que mientras el componente electrónico puede conservar su carga si se le mantiene aislado, en el subsuelo existe siempre cierto grado de humedad que provoca una pronta descarga, proceso que normalmente dura algunos segundos. La susceptibilidad del terreno para almacenar carga, luego de ser desconectado el campo energizante que la indujo, es llamada "cargabilidad eléctrica", cuya magnitud depende de la intensidad y tiempo de aplicación (amperios y segundos), y de las propiedades físicas de las rocas.

CUAJONE 1950		
Modelo Calculado		
CARGABILIDAD		
Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	7	100
M2	30	

FIG. 1 SONDEO DE CARGABILIDAD ELÉCTRICA EN CONFIGURACIÓN WENNER *

* (adaptado de Seigel, 1959). Anomalia de 30 mV/V interpretada como representativa de 5%-6% de sulfuros totales por volumen. Cubierta de 100m de potencia de rocas no-anómalas (7 mV/V). La curva ha sido recalculada con un programa automático; Seigel había obtenido (Cuajone, 1950), 46 milisegundos para M2.



La cargabilidad eléctrica puede ser medida de manera absoluta, con el empleo de corriente continua (*time-domain*) y la observación de los efectos una vez cortado el campo energizante. Puede ser también medida de manera relativa, utilizando corriente alterna (*frequency-domain*) en dos frecuencias diferentes para comparar las diferentes resistividades que así se determinan.

Desde los primeros tiempos de aplicación del método de Polarización Inducida ha sido reconocido que los resultados de mediciones en corrientes continua o alterna son similares (Heinrichs y Ludwig, 1966). Las preferencias son definidas por razones instrumentales y operativas. En las etapas iniciales (1950-1970) los diseños de aparatos de corriente continua (o de pulso) estuvieron protegidos por patentes exclusivas, lo que no ocurrió con los de corriente alterna; ello significó la popularización de las exploraciones en frecuencia, por el menor costo instrumental y la mayor facilidad de su disponibilidad en el mercado. Ciertas características de las relaciones de resistividad condujeron, asimismo, a experimentar las posibilidades de su análisis espectral (Tripp, et al., 1990) para la discriminación de anomalías con procedimientos que han tenido relativo éxito. El método de Polarización Inducida funciona con muchas variables físicas, instrumentales y geológicas, lo que permite, a su vez, desarrollar técnicas limitadas sólo por la creatividad de los investigadores.

TÉCNICAS DE OPERACIÓN

A semejanza de la resistividad (R) convencional, para la medición de la cargabilidad eléctrica (M) se utilizan electrodos conectados al suelo. Dos de ellos sirven para aplicar la corriente (I, en amperios) y otros dos para medir los efectos (V, en voltios). Se trata, en todo caso, de un dipolo de corriente AB y un dipolo de potencial MN. Las formas como son dispuestos los dos dipolos en el terreno, determinan las llamadas configuraciones de electrodos. Cualquiera de ellas puede ser utilizada con corriente continua (*time-domain*), pero existen razones prácticas para preferir alguna, dependiendo de las condiciones topográficas, geológicas e instrumentales. En corriente alterna (*frequency-domain*) debe usarse la dipolo-dipolo, de manera exclusiva.

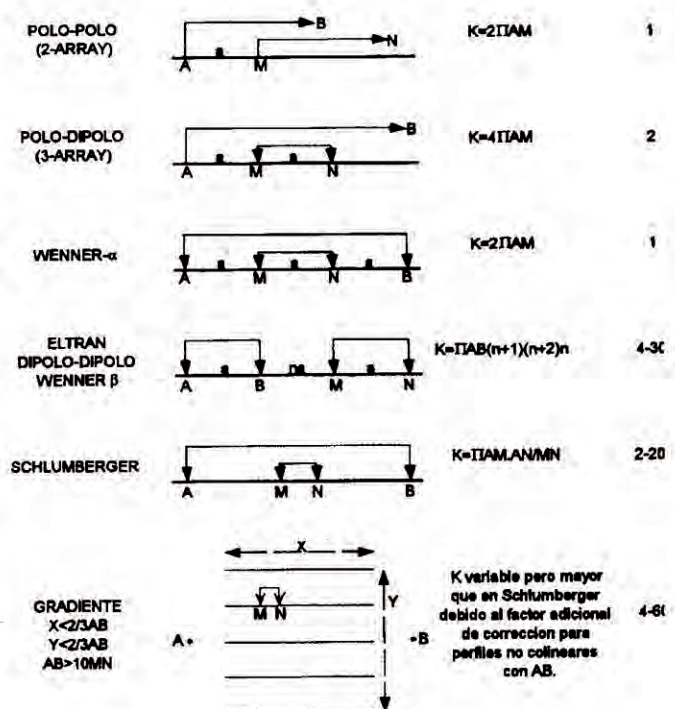
POLO-POLO. Electrodo móvil de corriente A y de potencial M. Electrodo fijo de corriente B y de potencial N, en "infinito". Factor de corrección 1K.

POLO-DIPOLO. Electrodo móvil de corriente A y de potencial M y N. Electrodo fijo de corriente B, en "infinito". Factor de corrección 2K.

DIPOLO-DIPOLO. Cuatro electrodos móviles. Factor de corrección 4K-30K.

GRADIENTE. Electrodo fijos AB. Móviles MN. Factor de corrección 4K-60K.

FIG. 2 CONFIGURACIONES DE ELECTRODOS DE USO PRÁCTICO EN POLARIZACIÓN INDUCIDA.



K: constante geométrica para compensar disminuciones de la caída de voltaje de entrada entre M y N. A mayor K, mayor requerimiento de energía.

Las cifras de la columna de la derecha indican las proporciones relativas de K entre configuraciones.

WENNER. Cuatro electrodos móviles. Factor de corrección 1K.

SCHLUMBERGER. Cuatro electrodos móviles. Factor de corrección 2K-20K.

El factor de corrección K es calculado para compensar los efectos producidos por el alejamiento de los electrodos de potencial, respecto de los de corriente; también para corregir amortiguaciones por falta de simetría. Su magnitud está en relación directa con el requerimiento de intensidad de energización. En otras palabras, las configuraciones Polo-Polo y Wenner son las que utilizan el mínimo de corriente aplicada, mientras que la Dipolo-Dipolo y la Schlumberger, el máximo de corriente. Para una penetración de registro, con estas dos últimas se debe disponer de 3 á 30 veces más potencia en el circuito de los electrodos A y B, en comparación con la Wenner y la Polo-Polo. La sensibilidad de las configuraciones va, de mayor a menor, desde la máxima en Polo-Polo, hasta la mínima en Dipolo-Dipolo, pasando, en orden decreciente, por la Polo-Dipolo, Wenner, Schlumberger y Gradiente (Roy, et al., 1973).

No debería haber dudas en decidir utilizar el dispositivo Polo-Polo, ya que es el simétrico de máxima sensibilidad y mínimo requerimiento de energía. Sin embargo, la gran distancia relativa del electrodo de potencial fijo (N, en infinito) la hace muy susceptible a los ruidos eléctricos de origen geológico, cósmico y cultural, por lo que es necesario probar la factibilidad de su uso, mediante pruebas locales.

Wenner y Polo-Dipolo siguen en preferencia y la opción debe tomarse por la flexibilidad de operación en el terreno. Gradiente da alta resolución horizontal, en caso de yacimientos tabulares de alto ángulo. Schlumberger sólo es práctica para sondeos. Dipolo-Dipolo, la de menor sensibilidad (Roy, et al., 1973), es

la que utiliza menos trabajo personal y menor longitud de cables, por lo que puede ser decidida si la accesibilidad local favorece el transporte de fuentes de energía motorizadas. Es interesante anotar que la gran popularidad de la configuración Dipolo-Dipolo, que técnicamente debería ser la menos preferida, se debe a los siguientes factores: mínimo costo de ayudantes de campo, facilidad de avance en el terreno y cortas longitudes de cables. Ninguno de ellos debería ser considerado con preeminencia sobre la calidad de mediciones ni sobre la precisión de las interpretaciones.

PROGRESIÓN DE CAMPO

Existen dos técnicas de operación para las medidas de Polarización Inducida en el terreno: perfiles de avance lateral a penetración constante y sondeos a penetración variable. Los primeros proporcionan lecturas de valores aparentes con las que se grafican planos y pseudo-secciones también de valores aparentes. Los segundos llevan a la construcción de curvas que deben ser calculadas para convertir la información aparente en verdadera, con la que se grafican planos de valores reales, planos de profundidades y secciones con escala vertical.

El alcance vertical de "detección" está parcialmente determinado por las dimensiones del campo eléctrico energizante, o sea, las distancias entre los electrodos de corriente A y B. Es usual considerar que para programar una penetración de registro se utilice no menos que el triple de ella, como longitud entre A y B. Para los perfiles de avance lateral no hay control sobre la profundidad alcanzada, salvo una cierta idea de magnitud vertical. En los sondeos, una vez interpretada la curva se llega a saber la profundidad alcanzada, ya sea como "contactos" calculados o como estimaciones de penetración máxima de registro en cada estación (Fig. 3).

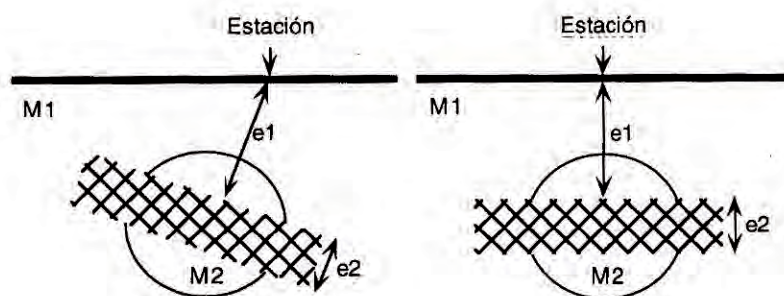


FIG. 3 PARÁMETROS CALCULADOS CON UN SONDEO A PENETRACIÓN VARIABLE.

M1 : cargabilidad de la roca no anómala.
 M2 : cargabilidad de la anomalía.
 e1 : espesor de la roca no anómala.
 e2 : espesor de la anomalía.

En la búsqueda de estructuras mineralizadas aisladas de pequeñas dimensiones horizontales o de cuerpos tabulares con pocos metros de potencia, la única opción es el empleo de los perfiles de avance lateral, porque tal exploración se realiza mejor con "barridos" y lo que interesa, principalmente, es la ubicación en plano de las anomalías representativas de objetivos geológicos (Fig. 4). Las medidas se toman en redes de estaciones con dimensiones en el rango de 10 á 50 metros, para posibles cuerpos de sulfuros con menos de 20 metros de dimensión horizontal mínima. Los sondeos sólo tienen aplicación complementaria.

La exploración por una estructura grande, con más de 50 metros de dimensión horizontal mínima, tal como es el caso de los yacimientos de contacto, los tabulares de bajo ángulo y los diseminados, se hace sobre redes en el rango de 100-200 metros, con lo que se vuelve factible el empleo de sondeos a penetración variable. Estos registros son útiles cuando las curvas pue-

den ser interpretadas con programas de cálculo automático, pero requieren cuadros geológicos de grandes dimensiones para el funcionamiento adecuado de las fórmulas matemáticas.

La ejecución de un sondeo de Polarización Inducida toma, en promedio, cuatro a cinco veces más tiempo que el requerido por una estación de perfil de avance lateral. La diferencia estriba en la mayor cantidad de datos que se toma en un sondeo, lo que, como compensación, significa también mayor calidad interpretativa en éste último.

PROCESAMIENTO DE DATOS

La resistividad, o resistencia por unidad de volumen de roca, se determina en ohmios \times m^2/m (ohmiometros u $\Omega\cdot m$). La cargabilidad, en milivoltios.segundo/voltio (milisegundos o milivoltios por voltio). Las dos medi-

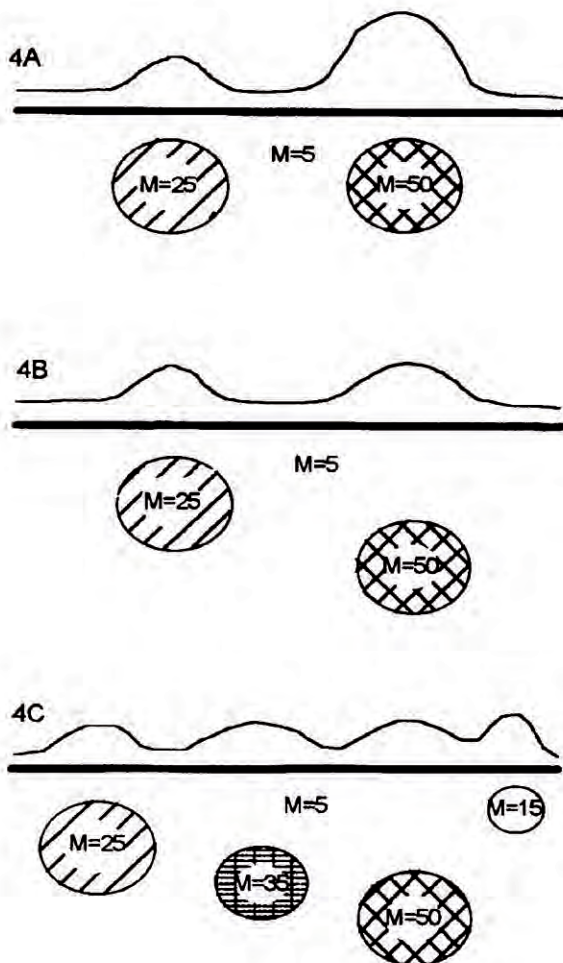


FIG. 4 PERFILES ESQUEMÁTICOS DE AVANCE LATERAL A PENETRACIÓN CONSTANTE.

La interpretación es relativa y son necesarios dos o más perfiles con otros espaciamientos entre electrodos para mejorar el análisis.

FIG. 4A MASAS ANÓMALAS DE IGUAL TAMAÑO Y DIFERENTE CARGABILIDAD.

FIG. 4B MASAS ANÓMALAS DE IGUAL TAMAÑO Y DIFERENTES CARGABILIDADES Y PROFUNDIDADES.

FIG. 4C: MASAS DE DIVERSOS TAMAÑOS Y CARGABILIDADES A VARIAS PROFUNDIDADES.

das se hacen en secuencia, para una estación y para una separación de electrodos. Los efectos de resistividad y cargabilidad en la superficie del terreno son los resultantes de la combinación de los efectos de los diferentes materiales litológicos englobados en el campo energizante creado por el geofísico; tal combinación recibe el nombre de aparente y los valores reales de cada material involucrado solamente pueden ser discriminados por medio del cálculo de una curva teórica de máxima aproximación a la de campo. En la práctica, el procedimiento de discriminación se hace con programas de computadora, en razón de la complejidad de las fórmulas utilizadas. Antes de que las computadoras personales estuvieran disponibles, los cálculos de parámetros reales de resistividad y cargabilidad, así como de las consecuentes profundidades, no podían ser realizados en exploraciones geofísicas de rutina y, por lo tanto, tampoco eran adecuadamente precisas las interpretaciones con sondeos por medio de ábacos de curvas maestras (Elliot, 1975). Al no ser posible el cálculo, por falta de computadoras portátiles, quedaba solamente utilizar las lecturas de valores aparentes, con lo que los perfiles se hacían imprescindibles, por su menor costo relativo. Esta justificación ya no tiene validez, cuando se cuenta con computadoras de alta velocidad.

En la operación de resistividad y de cargabilidad eléctricas con alguna frecuencia se obtienen lecturas afectadas por influencias externas que no pueden ser controladas por el operador. Uno de los problemas es causado por deficiencias de contacto en los electrodos, común en terrenos con suelo seco y arenoso, como el

de las zonas áridas de la vertiente occidental de los Andes en el Perú y norte de Chile. Los resultados son lecturas erróneas. Cuando se levantan perfiles de avance lateral todas las lecturas aparentes son utilizadas en las pseudo-secciones y en los planos de isocurvas, porque no hay forma de asignar calidad a cada medición. Algunos operadores tratan de corregir el problema mediante cálculos de promedios, simples y/o pesados, pero ello es inaceptable porque así se están juntando lecturas correctas con lecturas defectuosas, cuando los promedios deben hacerse solamente con lecturas correctas.

Con los sondeos a penetración variable las lecturas siguen tendencias progresivas que son consecuencia de varios incrementos de la longitud del campo energizante. Al graficar las lecturas de campo en formato bilogarítmico y someter la curva resultante a un análisis matemático, los modelos teóricos de ajuste paulatino permiten establecer la curva teórica de mejor coincidencia con la de campo. De este proceso resulta una "columna" eléctrica calculada, la misma que está formada por la sucesión de materiales del subsuelo que han sido alcanzados por el campo energizante. Luego del cálculo, cada uno de estos materiales (o rocas) está, entonces, definido por sus valores reales resistividad/cargabilidad y por los alcances (o profundidades) a su "contacto" inferior. Así se consigue discriminar cada uno de los materiales involucrados, determinando sus parámetros físicos y geométricos. Quedan en evidencia, asimismo, las lecturas espurias que caen fuera de la curva correcta, las mismas que son rechazadas por el cálculo interpretativo (Fig. 5).

FIG. 5 MODELOS DE SONDEOS A PENETRACIÓN VARIABLE.

FIG. 5A CUBIERTA NO ANÓMALA CON 100 METROS DE ESPESOR. ANOMALÍA DE 50 mV/V.

Sondeo típico de un yacimiento de gran extensión horizontal.

→ Cujajone, Toquepala, Quellaveco, Cerro Verde, Tintaya, Ferrobamba, Las Lomas, Antamina, Domeyko (Chile), Cerro Corona, Cerro de Pasco, Colquijirca, Pashpap, Cerro Negro, Tambo Grande, Yanacocha, Atocongo, Pistoro, Santos-Candelaria (Chile), etc.

BAJO-ALTO
Modelo Calculado

CARGABILIDAD		Prof. (m)
Capa	mV/V	100
M1	5	
M2	50	

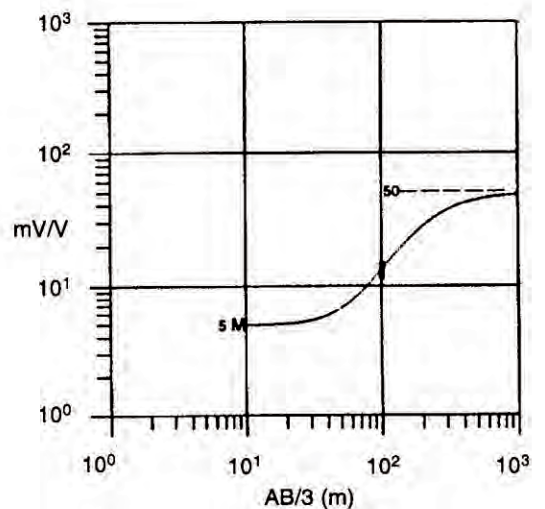


FIG. 5B ANOMALÍA DE 50 mV/V ENTRE 100M Y 200M DE PROFUNDIDAD.

Sondeo típico de yacimientos tipo manto e irregulares (contacto).

- Antamina, Carolina, Condestable, Cristo Rey, Coriminas, El Indio (Chile), Lohpán (Chile), Palca XI, Poderosa, Raúl, Raura, Río Seco, San Cristóbal, San Gregorio, Tintaya, Toachi (Ecuador), Tola (Bolivia), Zaruma (Ecuador), etc.

BAJO-ALTO-BAJO
Modelo Calculado

CARGABILIDAD

Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	5	100
M2	50	200
M3	5	

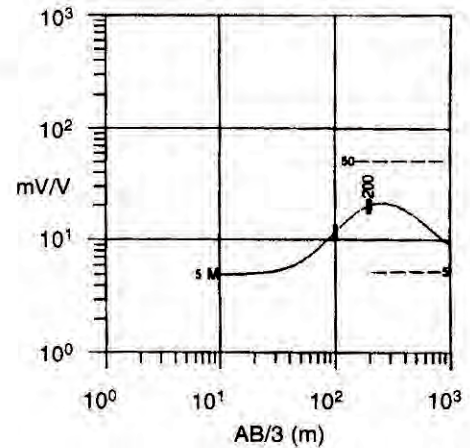


FIG. 5C ANOMALÍA DE 50 MV/V ENTRE 100M Y 200M DE PROFUNDIDAD. ANOMALÍA MENOR (25 mV/V) AL FONDO.

Sondeo típico en yacimientos tipo pórfido con zona de enriquecimiento supérgeno y en depósitos irregulares (contacto).

- Cerro Verde, Candelaria, La Huaca, Las Lomas, Tintaya, Chalcobamba, Sulfobamba, Ferrobamba, Antamina, Tola (Bolivia), Zaruma (Ecuador), Huini Huini, etc.

BAJO-ALTO-MENOS ALTO
Modelo Calculado

CARGABILIDAD

Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	5	100
M2	50	200
M3	25	

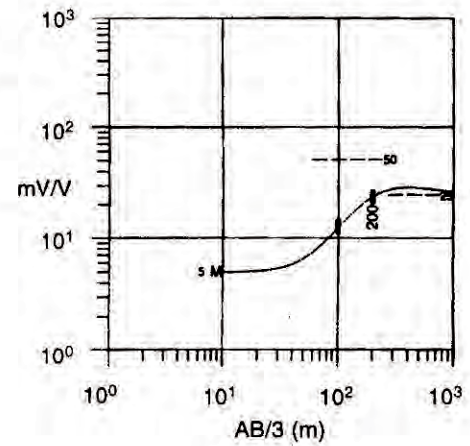


FIG. 5D ANOMALÍA DÉBIL DE 25 MV/V ENTRE 100M Y 200M. ANOMALÍA FUERTE DE 50 mV/V AL FONDO.

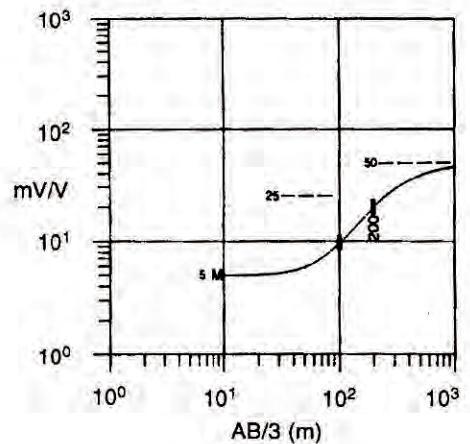
Sondeo típico de yacimientos parcialmente intemperizados y de depósitos irregulares o de contacto.

- Atalaya, Candelaria, Cerro Corona, Bambas, Yanaorcco, Parag, Raura, etc.

BAJO-ALTO-MAS ALTO
Modelo Calculado

CARGABILIDAD

Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	5	100
M2	25	200
M3	50	



Al conformar una curva de sondeo se llega a disponer de un número "ilimitado" de lecturas para un número "ilimitado" de intervalos entre electrodos, con lo que se hace posible, a partir de un levantamiento con sondeos, preparar, si fuere así deseado, cualquier número de planos de isocurvas de valores aparentes, así como seudo-secciones. Parece innecesario afirmar que,

por el mismo razonamiento, no es posible obtener parámetros reales de un levantamiento con perfiles de avance lateral.

En suma, con la información de los perfiles se preparan planos de isocurvas de valores aparentes y seudo-secciones. Con la información de los sondeos se

preparan planos de isocurvas de valores reales, planos de profundidades y, si se quiere, secciones con escalas verticales y relacionadas con la topografía.

CONSIDERACIONES ACERCA DE LA GEOMETRÍA DEL SUBSUELO

Las descripciones simples de las técnicas descritas tratan de definir el campo de aplicación de la Polarización Inducida como para dos cuadros estructurales del subsuelo: perfiles cuando hay contactos esencialmente verticales y sondeos cuando hay contactos esencialmente horizontales. En esto estriban las discusiones acerca de la conveniencia del empleo de una u otra técnica de operación.

Debemos comenzar por decir que tenemos experiencia personal directa con más de 4000 kilómetros de perfiles de avance lateral y con más de 5000 sondeos a penetración variable, sólo con el método de Polarización Inducida desde 1970 en más de 40 pórfidos de cobre, más de 30 yacimientos filonianos, más de 25 de tipo manto y más de 50 irregulares (tipo "skarn" y otros). Ello, sin contar con los levantamientos de resistividad por agua subterránea realizados entre 1960 y 1970. Los perfiles han sido levantados con polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, Wenner y gradiente. Los sondeos, con Wenner y Schlumberger.

La clasificación del subsuelo, en cuanto a propósitos geofísicos, en estratificado para sondeos y no estratificado para perfiles, peca de gran simplicidad. Es mejor utilizar conceptos aproximados ya que en las situaciones geológicas reales los cuadros son usualmente complejos. Ello es aceptable hasta el punto en que es correcto afirmar que, con equipo instrumental adecuado y con densidades apropiadas para las redes de estaciones, cualquier técnica es aplicable en cualquier cuadro geológico. La lógica absoluta no es aconsejable y es mejor pensar en términos de lógica ambigua, según es la tendencia moderna de análisis de procesos cuando son muchos, y difícilmente cuantificables, los factores que intervienen.

Conviene comenzar por aceptar que siempre es complicada la estructura del subsuelo. Por consiguiente, no existe una solución simple: no hay contactos solamente verticales ni solamente horizontales. No hay formaciones uniformes en ninguna dirección espacial, ni tampoco isotropía física en grandes distancias. A todo ello se suma el hecho de que, mientras los conceptos exploratorios en geología tienden a ser lineales (convirtiéndose en tridimensionales por correlación),

los campos geofísicos de energía siempre generan información volumétrica. En el subsuelo pueden existir cambios bruscos de materiales, pero en la exploración geofísica siempre los cambios son progresivos y los resultados, fundamentalmente aproximados.

La creación del campo energizante de Polarización Inducida produce efectos que inciden en los electrodos de potencial, procedentes de muchas direcciones. La asignación de un punto del subsuelo como centro de "activación" (a semejanza del hipocentro sísmico) representado por un "epicentro" en la superficie, es solamente una manera sencilla de presentar un resultado, pero que no tiene base científica. Muchas personas con el tiempo llegan a formarse ideas equivocadas de profundidad, a partir de las separaciones entre electrodos y a imaginar secciones geológicas allí donde solamente hay curvas isanómalas. Debe ser imperativo que los geofísicos llamen continuamente la atención de los usuarios de gráficos geofísicos, para que no traten de establecer correlaciones directas con la geología.

La consecuencia de la aceptación de que la Polarización Inducida termina en un conjunto de aproximaciones geofísicas, lleva a pensar en que lo más importante sea que en cada estación de una red de exploración se obtenga la máxima cantidad de datos de la mejor calidad posible. Los efectos de campos energizantes cada vez más profundos están cada vez más sujetos a mayores volúmenes de rocas englobadas. Esta característica ha sido utilizada desde hace más de medio siglo en las mediciones de resistividad, razón por la que son empleadas progresiones logarítmicas de campo y escalas logarítmicas de construcción de curvas. La idea básica radica en que la capacidad de resolución geométrica disminuye con la profundidad y en que las magnitudes físicas más bajas, especialmente la resistividad, son más críticas. Para compensar la pérdida de resolución en profundidad, y por la necesidad de interpretar valores bajos, se emplean escalas logarítmicas. La progresión de campo debería ser también, por tanto, logarítmica en cuanto a los incrementos de penetración. Sin embargo, ello es prácticamente imposible en la operación con perfiles ya que éstos deben ser levantados a lo largo de líneas con estacas previamente colocadas a intervalos regulares. Parcialmente es factible intentar resolver esta situación, utilizando penetraciones determinadas por espaciamentos "a" en relación no lineal, tal como 1:2:4:8:16, lo que puede, en la práctica, hacerse sólo para tres o para cuatro intervalos.

Los operadores en dipolo-dipolo utilizan espaciamentos "n" (factores de un "a" constante) en relación lineal 1:2:3:4:5, etc. En polo-polo, polo-dipolo y

Wenner es normal usar relaciones de 1:2:4. De todos modos, la condición logarítmica es prácticamente imposible de alcanzar para perfiles en cualquiera de las configuraciones.

La operación en sondeos es siempre con incrementos logarítmicos, con longitudes totales de la línea de corriente AB que comúnmente van en metros, por ejemplo, en la siguiente secuencia: 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12, 15, 21, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 210, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, etc. En casos que la cubierta de oxidación tenga varios metros de espesor puede comenzarse, tal vez, en $AB=30\text{m}$ o más. El operador debe obtener lecturas de nivel de fondo (*background*) y para ello decidirá, en el momento, si debe utilizar longitudes más cortas, o más largas. Cada curva de sondeo puede, por lo tanto, ser establecida con las dimensiones mínimas y máximas ideales para el cálculo, para lo cual esta técnica es suficientemente flexible.

En un programa geofísico es normal que el área a cubrirse haya sido previamente definida con estudios geológicos y geoquímicos superficiales. Con los límites así establecidos se programa la red de estaciones. Si el levantamiento se hace con perfiles de avance lateral el trabajo se cumple sin mayores variaciones. Los sondeos no requieren una red geométrica previa, ya que cada estación sirve de justificación a las vecinas, aparte de que con facilidad pueden ser añadidos puntos, ya sea intermedios o externos a la red. Hay estudios con sondeos en los que cada estación ha sido escogida en el momento, en algunos casos dejando marcas para su posterior control topográfico y en otros, ubicando las posiciones con técnicas convencionales o con el sistema combinado GPS-topográfico. En el futuro próximo probablemente se generalizarán los levantamientos con sondeos controlados con GPS diferencial y ya no serán necesarios los controles topográficos.

En muchas exploraciones por cuerpos mineralizados los trabajos geológicos previos dejan incógnitas acerca de las formas, posiciones espaciales y dimensiones de los probables yacimientos, por lo que lo más conveniente es aplicar el método de Polarización Inducida con la técnica más flexible que permita "perseguir" anomalías, tal como se hace con los sondeos de penetración variable. Los perfiles de avance lateral deberían, por consiguiente, ser utilizados sólo en la búsqueda de depósitos pequeños y en los de tipo filoniano de alto ángulo.

INTERPRETACIONES Y RESULTADOS

TINTAYA.

En la Figura 6 están los dos tipos de registros obtenidos en el levantamiento geofísico de diciembre 1971. El perfil polo-dipolo es anómalo en el sector mostrado, con cargabilidades aparentes máximas de 20 mV/V; puede deducirse de ellos que entre 700m y 1040m la anomalía es relativamente superficial, volviéndose paulatinamente más profunda desde 1050 hasta 1300. El sondeo 5 fue ejecutado cerca de un afloramiento de *skarn* antes de tener los perfiles; la curva de cargabilidad aparente fue calculada para conseguir valores reales y dio 35m de cobertura no anómala (6 mV/V), con anomalía ligera de 14 mV/V a 35m y anomalía fuerte de 30 mV/V desde los 100m hasta, por lo menos, 400m de profundidad (Arce 1972, 1987). En la actualidad se conoce esta zona como Chabuca Este.

Luego de la ejecución del Sondeo # 5, el # 6 fue realizado (en 1971) también junto a un afloramiento de *skarn*, en el fondo de una quebrada, como parte del reconocimiento geofísico al Este del área del levantamiento con perfiles (1971). Con el cálculo del Sondeo

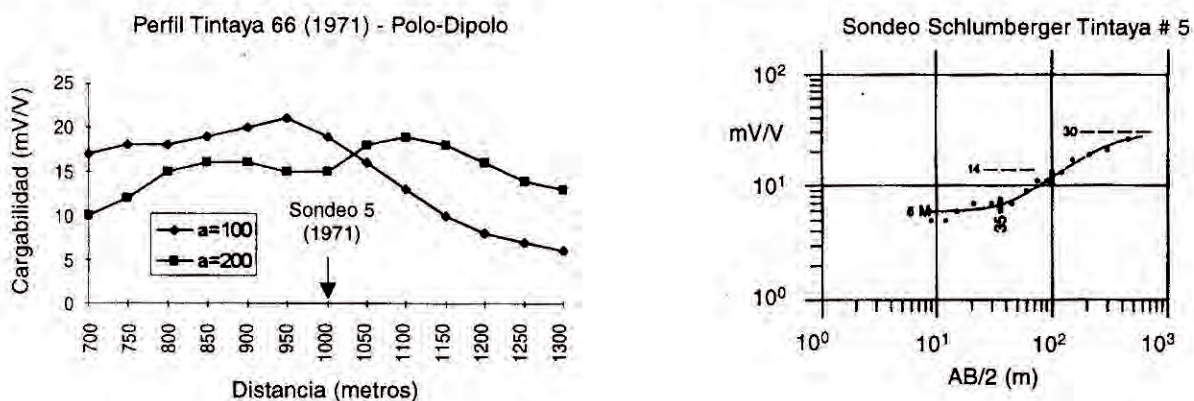


FIG. 6 PERFILES POLO-DIPOLO # 66 Y SONDEO # 5 DE CHABUCA ESTE-TINTAYA. (ARCE, 1972)

La perforación diamantina recomendada para el lugar del Sondeo # 5 encontró sulfuros metálicos desde los 33 metros y penetró hasta 300 metros con sulfuros.

6 (Fig. 7) se obtuvo una fuerte cargabilidad real anómala, 36 mV/V, desde los 11m hasta los 70m de profundidad, aumentando desde allí a 40 mV/V, hasta no menos que 400 m de profundidad. El perfil D fue levantado posteriormente, en 1973, como parte de la exploración al noreste de Tintaya y dio cargabilidades moderadas.

CERRO VERDE.

Al comenzar la exploración geofísica se hicieron comparaciones entre perfiles de avance lateral a penetración constante (Polo-Dipolo, $a=100m$ y $200m$) y sondeos a penetración variable (Schlumberger y Wenner AB de 30m hasta 1200m). Con ellas se pudo decidir la conveniencia de realizar el estudio integral con 268 sondeos Wenner sobre unas 1000 hectáreas, en red de $200m \times 200m$. La Figura 8 muestra los dos perfiles de cargabilidad aparente y el Sondeo # 127. Mientras el perfil contiene pocas variaciones, el sondeo identificó una cubierta de 43 metros sobre la masa anómala

(24 mV/V) que se vuelve más intensa (35 mV/V) a los 100m de profundidad. Estos valores reales y profundidades no pueden ser deducidos del perfil. Con el plano de isocurvas de cargabilidad real del horizonte anómalo se estableció la extensión de la zona mineralizada. Con el de isópacos (espesores) de la cubierta no anómala, la profundidad al techo de la anomalía. Con el de isóbatas (profundidades) de la cubierta de baja resistividad, se interpretó el alcance vertical de alteración meteórica. Resultó que el espesor de la cubierta no anómala (M1) era, en gran parte del área, menor que el espesor de la cubierta de baja resistividad (R1), con lo que quedaba establecido un "horizonte" de baja resistividad y alta cargabilidad interpretable como el correspondiente a la zona de enriquecimiento con calcocita.

LAS LOMAS.

Para la exploración del área de Las Lomas, Piura, fue aplicada una técnica de máxima flexibilidad para la progresión de campo. Sin contar con base topográfica

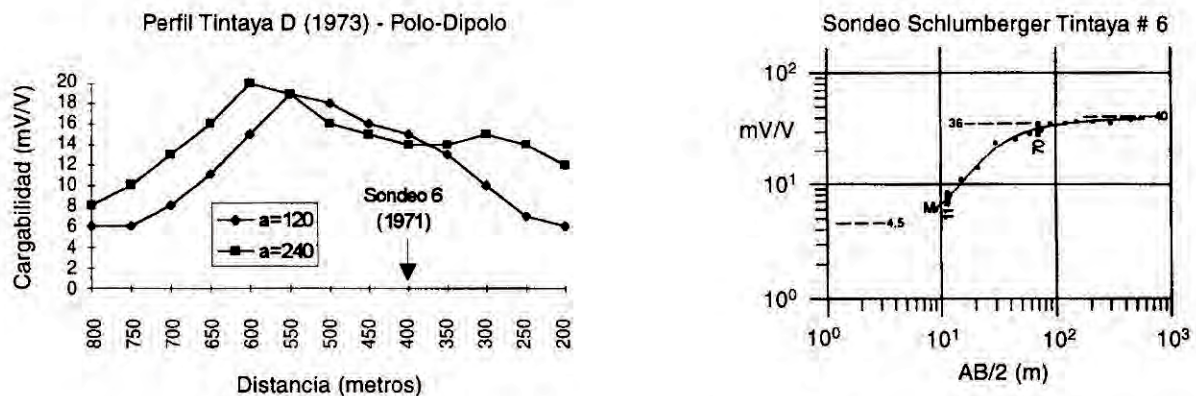


FIG.7 PERFIL POLO-DIPOLO TINTAYA D Y SONDEO # 6 (ARCE, 1972)
La perforación diamantina recomendada para este lugar fue ubicada en la parte alta de la quebrada, unos 20m por encima de la elevación del Sondeo # 6. Atravesó el cuerpo mineralizado de Tintaya que está en actual explotación, desde los 30m quedando en sulfuros a los 300m de profundidad.

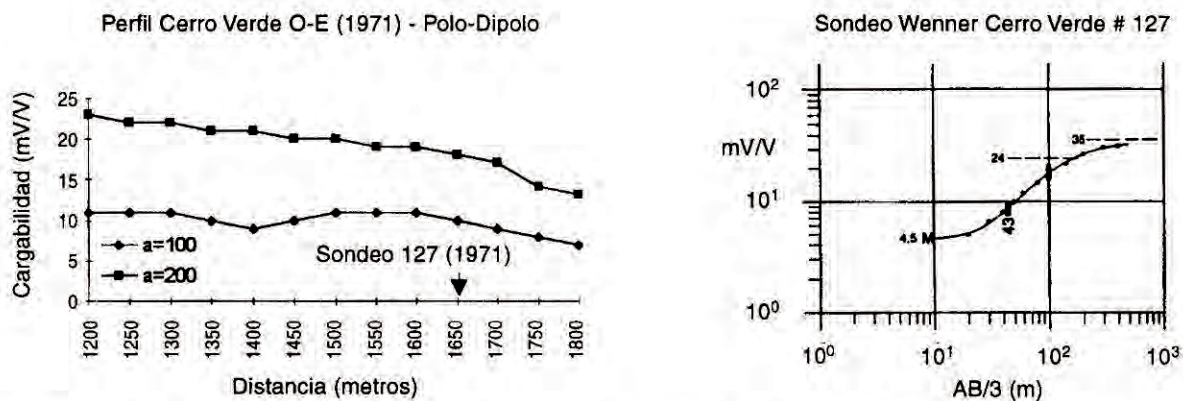


FIG. 8 PARTE DEL PERFIL CERRO VERDE E-O CON LA POSICIÓN DEL SONDEO # 127 (ARCE, 1971).
La mayor calidad de la información del sondeo a penetración variable llevó a decidir la realización integral del estudio con 268 sondeos.

FIG. 9A LAS LOMAS.
Plano de isocurvas de cargabilidad real, calculada en 114 sondeos Schlumberger.

La isanómala de 40 mV/V cubre más de 100 hectáreas. La falta de cierre al norte sugiere una posible extensión que deberá ser evaluada con interpretación geológica.

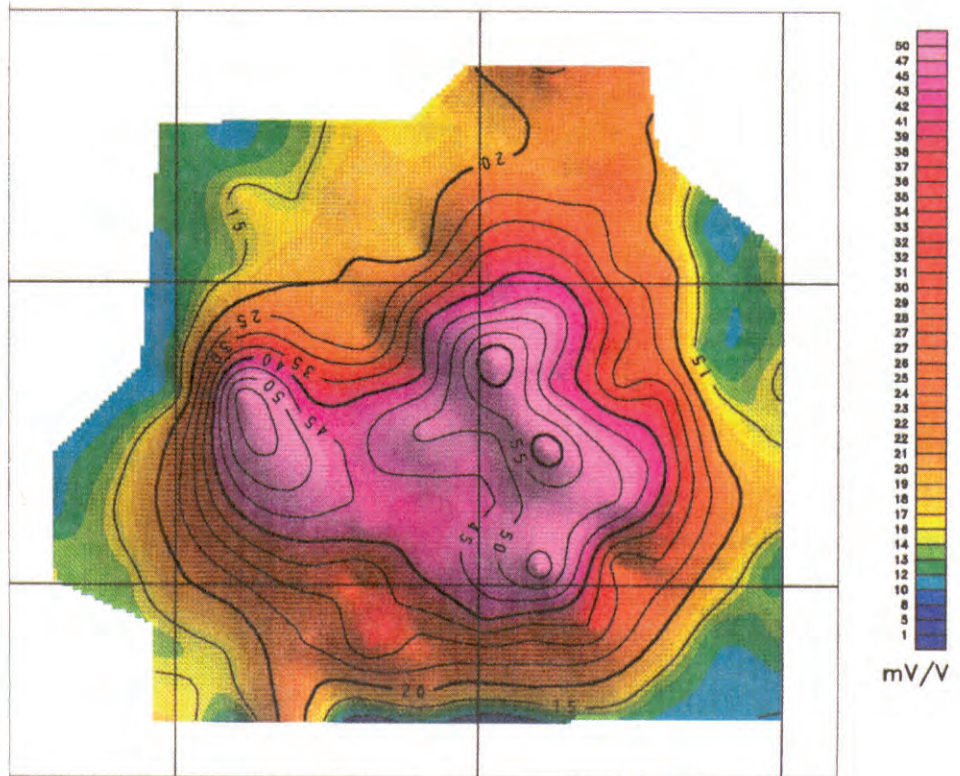


FIG. 9B LAS LOMAS.
Profundidad, en metros, al techo del horizonte anómalo mostrado en la Fig. 9A.

La cobertura no anómala tiene alcances verticales desde pocos metros hasta no más de 60 metros.

Este plano sirve para programar las profundidades mínimas de los taladros de exploración.

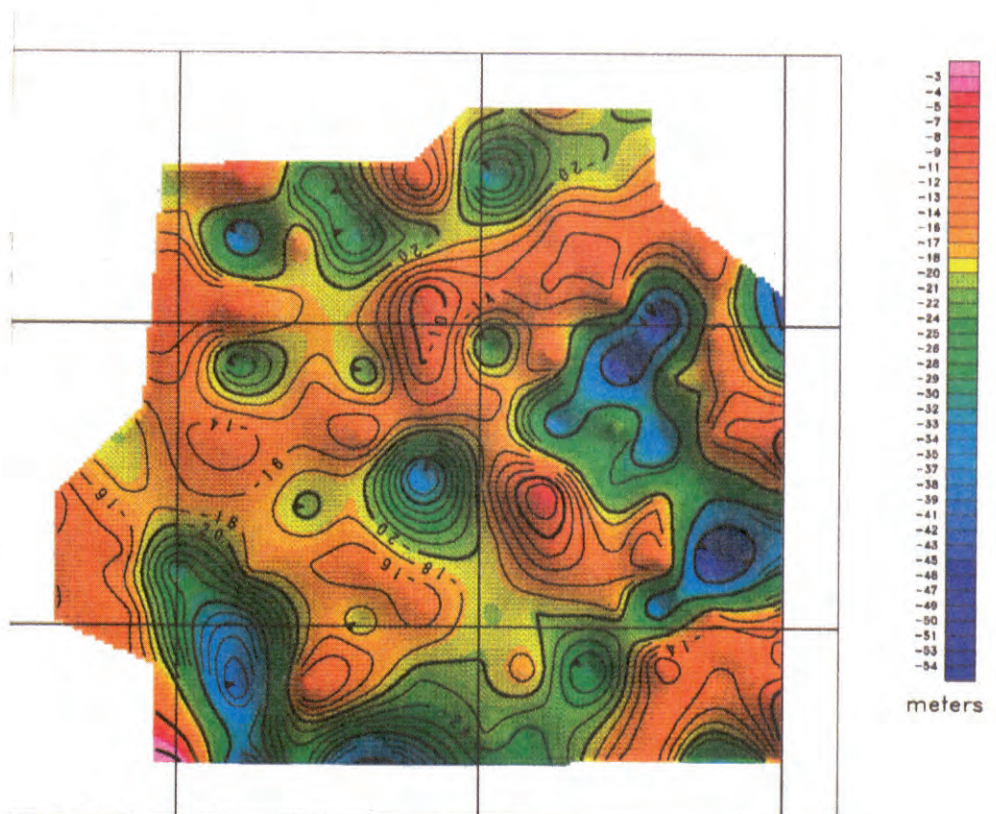


FIG. 9C LAS LOMAS.

Resistividad real del basamento, en ohmiometros calculados.

Las correlaciones fueron hechas utilizando las resistividades de fondo en cada sondeo.

Es evidente que el área de baja resistividad relativa corresponde a la mayor anomalía de cargabilidad de la Figura 9A, rodeada por picos de alta resistividad, a manera de anillo.

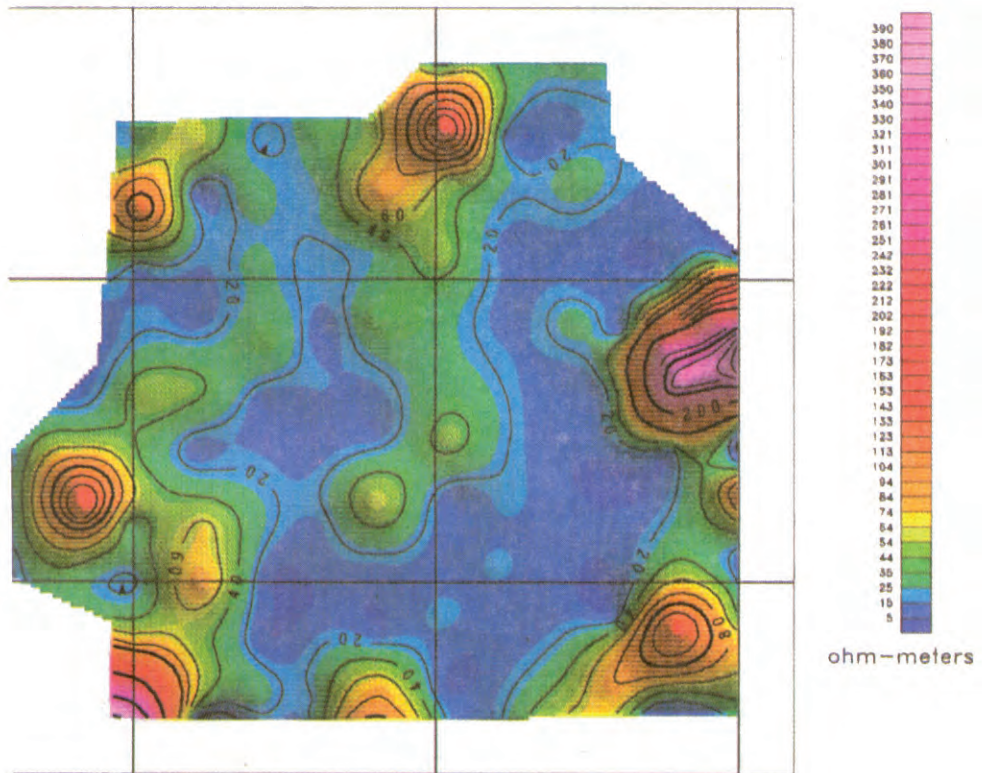
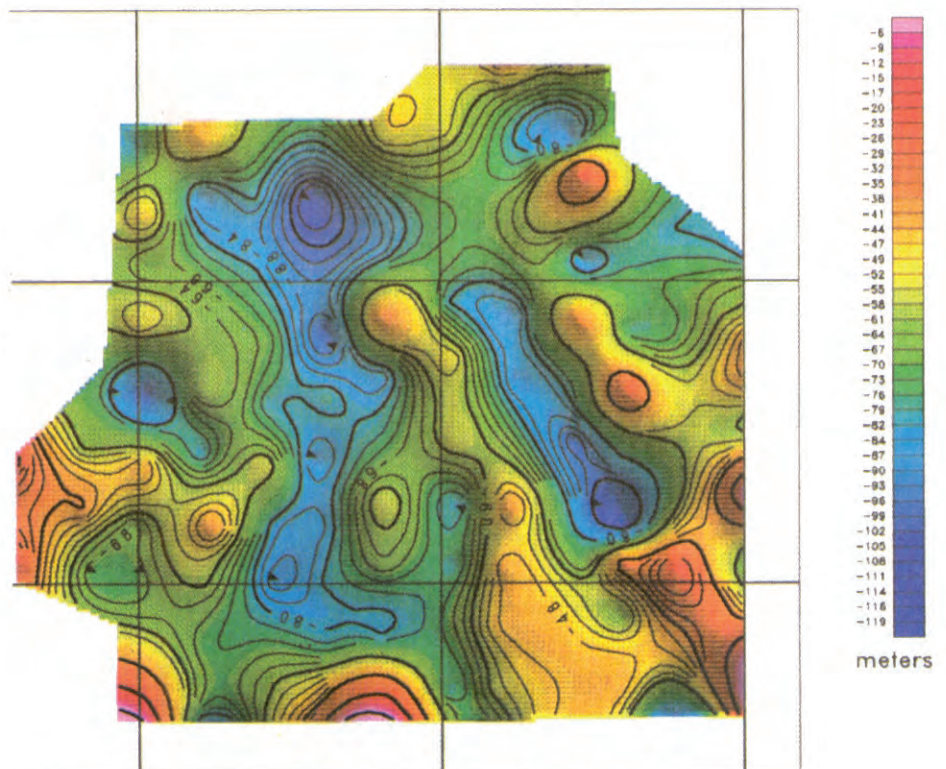


FIG. 9D LAS LOMAS.

Isóbatas al basamento mostrado en la Fig. 9C, en metros.

Las áreas de mayor profundidad, hasta 120 metros, parecen estar alineadas N-S y NO-SE, pudiendo corresponder con zonas de debilidad o fallamiento.



ni puntos de control del terreno, y solamente conociendo la posibilidad de que se tratase de un yacimiento tipo "pórfido de cobre" por los estudios geológicos de superficie, fue iniciado el trabajo con la ejecución del primer Sondeo de Polarización Inducida en un lugar con evidencias geoquímicas interesantes. Tal primer sondeo dio cargabilidades aparentes moderadamente anómalas por lo que fue decidido, allí mismo, ubicar el segundo sondeo 200m al norte. De esa manera se siguió la operación, decidiendo cada siguiente estación con los resultados de campo y suspendiendo el avance en el último punto anómalo de determinada dirección. La secuencia de 114 estaciones de sondeo fue, entonces, establecida por el desarrollo diario del trabajo de campo. Puede así afirmarse que el levantamiento de Las Lomas tuvo óptima eficiencia, porque no se hicieron registros inútiles. La extensión investigada en Las Lomas fue de 456 hectáreas (114 sondeos en red de 200m x 200m, aproximada) y, por lo que puede verse en la Figura 9A, la anomalía de cargabilidad resultó apropiadamente cubierta.

CERRO NEGRO - AREQUIPA

Las correlaciones de parámetros reales, físicos (cargabilidad, resistividad) y geométricos (cotas topográficas, profundidad al techo de anomalía), han sido tratadas de manera similar a la de Las Lomas. Sin embargo, para mejor comprensión se las presenta como bloques tridimensionales. Figs. 10A, 10B, 10C.

AGUA SUBTERRÁNEA

Desde los primeros tiempos del empleo del método de Polarización Inducida fueron realizados intentos para utilizarlo en exploraciones de acuíferos subterráneos. El fundamento está en las relaciones de arcillas conductoras eléctricas con minerales aislantes en presencia del electrolito agua, con cuadro físico semejante a los de los yacimientos de sulfuros diseminados. Ya en 1957, Vacquier y otros publicaron experiencias en estudios hidrogeológicos. Aunque hay numerosos artículos escritos sobre el tema (Bodmer, et al., 1968), la aplicación del método no ha tenido amplia difusión porque tiene resultados solamente en condiciones geológicas apropiadas. En los valles de la Costa peruana los rellenos aluvionales no contienen arcillas planas que son las indispensables para que se produzca la polarización eléctrica del subsuelo. Existen, sin embargo, dos casos de acuíferos regionales, de origen marino, donde hay intercalaciones de horizontes arcillosos (montmorillonita, bentonita) con arenosos sin arcilla: la formación Zapallal en Piura y la formación Pisco en Ica. En ambas tenemos sondeos de resistividad eléctrica, pero en Pisco (1979) hicimos registros con instrumental de

Polarización Inducida, con el objeto de intentar discriminar entre la cubierta de arena eólica con aluvial y los sedimentos arcillosos del basamento. Para control utilizamos pozos de agua existentes, de los cuales presentamos dos casos extremos. La relación Resistividad/Cargabilidad es mayor en material más permeable y con menor salinidad. El basamento arcilloso de la formación Pisco está claramente identificado con una mayor cargabilidad, aunque no siempre con menor resistividad. Figs. 11A, 11B.

CONCLUSIONES

Con la disponibilidad actual de medios automáticos de procesamiento y cálculo de curvas, no hay justificación para el uso de técnicas de interpretación sólo cualitativa. Las curvas calculadas de los sondeos de Polarización Inducida producen valores físicos reales y profundidades, elementos de mejor utilidad en exploración. Sin embargo, el empleo de los sondeos requiere geofísicos experimentados en el campo y en oficina, a diferencia de la operación con perfiles, los que pueden ser ejecutables con personal poco preparado, en vista del procedimiento rutinario. Esta diferencia es determinante en el menor costo de los levantamientos con perfiles, lo que no debería ser significativo, en vista de la necesidad de obtener los mejores rendimientos de un estudio geofísico. Es imperativo, por otra parte, que sean utilizadas las técnicas de progresión y dispositivos de electrodos que mejor se adapten a las condiciones geológicas. El método de Polarización Inducida es el más sensible y adecuado a la exploración por sulfuros metálicos y los geofísicos deberían aprovechar todas las ventajas posibles, utilizando las mejores variantes de operación e interpretación. Las configuraciones de electrodos, en cuanto a su efectividad y respuesta con perfiles, son de mayor a menor: polo-polo, polo-dipolo, Schlumberger, gradiente, Wenner y dipolo-dipolo, principalmente en yacimientos filonianos. Para sondeos, indistintamente Schlumberger y Wenner, principalmente en yacimientos de morfología irregular, en mantos y en diseminados. Los resultados deberían ser entregados como planos de isovalores reales y de profundidades (sondeos) o planos de isovalores aparentes (perfiles), evitando las pseudo-secciones que producen impresiones engañosas, especialmente en quienes no están acostumbrados a ellas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a los directivos de las empresas Minera Britannia Gold S.A. y Sociedad Minera Cerro Verde S.A., por permitir el uso de

FIG. 10A. CERRO NEGRO

Topografía generalizada por medio de 112 cotas de otros tantas estaciones geofísicas. Es evidente la morfología externa, determinada por un anillo de afloramientos de brechas de turmalina y por una quebrada NE-SO.

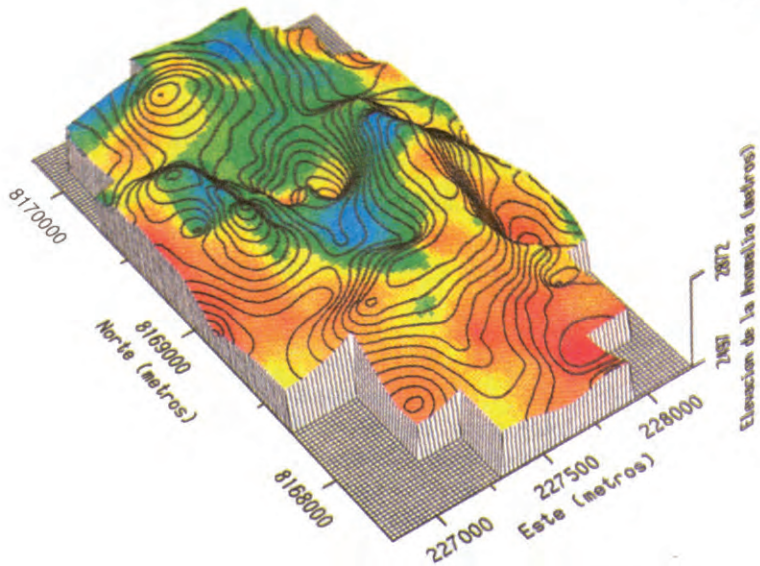
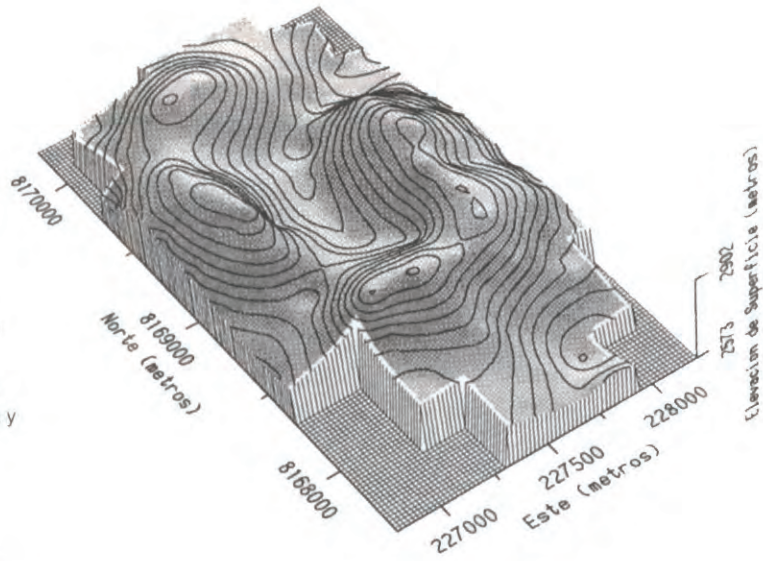


FIG. 10B. CERRO NEGRO

Cargabilidad real de la masa anómala, mostrada para la elevación a que corresponde. Las mayores intensidades (amarillo a rojo) corresponden al anillo de brechas de turmalina.

FIG. 10C CERRO NEGRO

Distribución de las resistividades reales calculadas para la anomalía de cargabilidad y colocadas en el diagrama con colores correspondientes a altas resistividades en rosado y a bajas en azul.

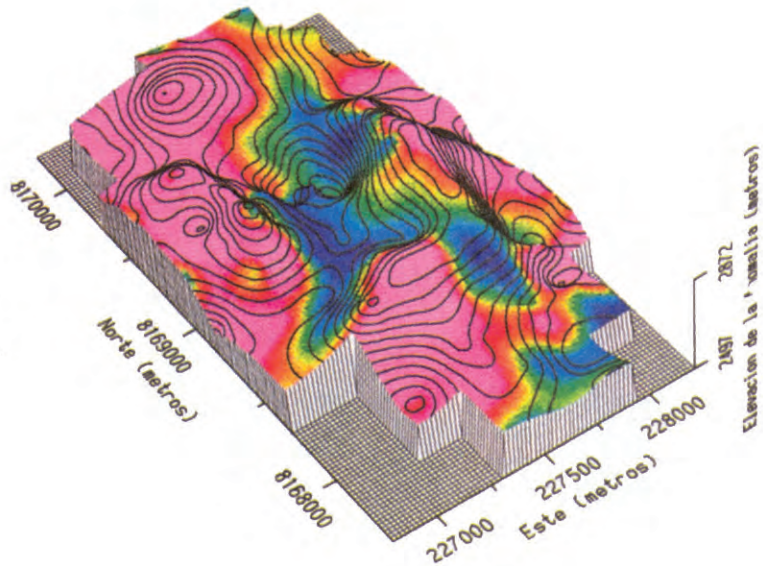


FIG. 11A

Sondeo de Polarización Inducida en el Pozo # 6, Santa Cruz, Lanchas-Pisco. Profundidad 17 metros. Rendimiento 16 litros por segundo. Capacidad específica 1.53 l/s/m.

Hasta los 25m de profundidad el sondeo indica que existe una relación R/M=4.6 (alta resistividad/cargabilidad relativa), con alta resistividad real (50 Ω-m) correspondiente a agua dulce. El basamento arcilloso de la Fm. Pisco se interpreta a 25m de profundidad.

Pozo # 6
Modelo Calculado

RESISTIVIDAD		
Capa	Ohm.m	Prof. (m)
R1	10	1.8
R2	50	23
R3	15	

CARGABILIDAD		
Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	3	4.5
M2	11	25
M3	50	40
M4	10	

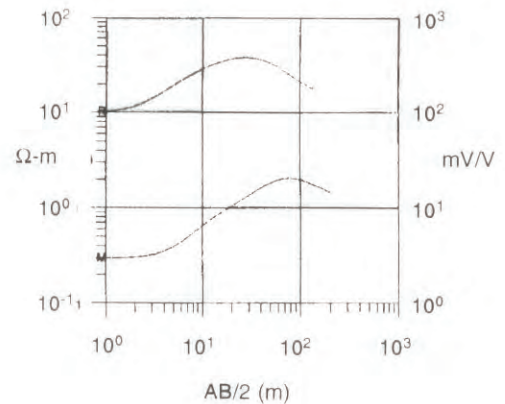


FIG. 11B.

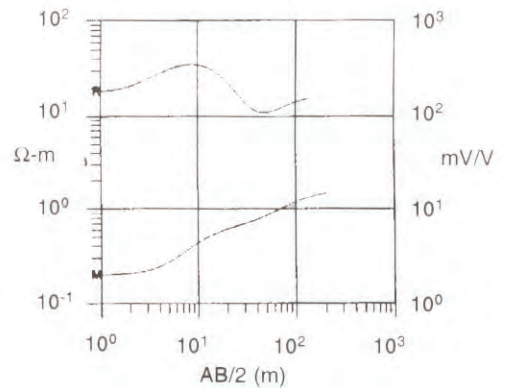
Sondeo de Polarización Inducida en el Pozo # 9, Santa Cruz, Lanchas-Pisco. Profundidad 36 metros. Rendimiento 8 litros por segundo. Capacidad específica 0.34 l/s/m.

Hasta los 35 metros de profundidad el sondeo indica una relación R/M=1 (baja resistividad y baja cargabilidad relativa), con baja resistividad real (7 Ω-m) correspondiente a agua salobre o a terreno arcilloso. El basamento de la Fm. Pisco se interpreta a 35m de profundidad.

Pozo # 9
Modelo Calculado

RESISTIVIDAD		
Capa	Ohm.m	Prof. (m)
R1	18	1.7
R2	70	6
R3	7	35
R4	55	70
R5	6	

CARGABILIDAD		
Capa	mV/V	Prof. (m)
M1	2	4
M2	7	35
M3	16	



la información geofísica de Las Lomas y de Cerro Negro, respectivamente. Todos las otras zonas descritas han sido ya objeto de exposición pública por los autores, en conferencias y en publicaciones.

REFERENCIAS

Arce, J.E., 1972.

La Exploración Geofísica Inicial por Sulfuros en Tintaya: XII Convención de Minería. Lima.

Arce, J.E., 1987.

Geophysical Discovery of the Copper Sulfide Deposit at Tintaya, Cusco, Perú: Exploration 87, Canadá.

Arce, J.E., 1990.

Métodos Geofísicos de Exploración por Agua Subterránea: Colegio de Ingenieros del Perú y Universidad Nacional de Ingeniería. Seminario realizado el 19.3.90 en Lima.

Arce, J.E.,

Informes Geofísicos preparados para Minero Perú (Cerro Verde 1971, Tintaya 1972-1973), para Minera

Britannia Gold S.A. (1994) y para Sociedad Minera Cerro Verde S.A. (Cerro Negro 1995). Experimentos de Polarización Inducida por agua subterránea (1979).

Baldwin, R.W., 1959.

Overvoltage Field Results: Overvoltage Research and Geophysical Applications, J.R. Wait, Editor: Pergamon Press. Inglaterra.

Bodmer, R., Ward, S.H., and Morrison, H.F., 1968.

On Induced Polarization and Groundwater: Geophysics, 33. EEUU

Brant, A.A., 1966.

Examples of Induced Polarization Field Results in the Time Domain: Society of Exploration Geophysicists - Mining Geophysics, Vol. I, Case Histories. EEUU.

Elliot, C.L., 1975.

Theoretical Response Multilayered Earth-Induced Polarization Coefficients: Elliot Geophysical Company. EEUU.

Heinrichs, W.E., and Ludwig, C.S., 1966.

Results of an Induced Polarization Survey employing

both Time and Frequency Domain Techniques: SEG-Mining Geophysics, Vol I. EEUU.

Hallof, P.G., 1960.

The Uses of Induced Polarization in Mining Exploration: Transactions of the AIME, v. 217. EEUU.

Roy, A, and Jain, S.C., 1973.

Comparative Field Performance of Electrode Arrays in Time-Domain Induced Polarization Profiling: Geophysical Prospecting 21. Holanda.

Seigel, H.O., 1959.

A Theory of Induced Polarization Effects. Overvoltage

Research and Geophysical Applications, J.R. Wait, Editor: Pergamon Press. Inglaterra.

Tripp, A.C., Klein, J.D., Halverson, M.O., Kingman, J., Grant, T.W., 1990.

Induced Polarization Spectral Interpretation Including EM Coupling Data: SEG, Investigations in Geophysics No. 4. EEUU.

Vacquier, V., Holmes, C.R., Kintzinger, P.R., and Lavergne, M., 1957.

Prospecting for Ground Water by Induced Polarization: Geophysics, 22. EEUU.