

9  
2 E



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

"APLICACION DE LOS SONDEOS ELECTRICOS  
VERTICALES EN LA BUSQUEDA DE CAVERNAS"

**TRABAJO ESCRITO**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A :

SABORIO GONZALEZ RICARDO



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

	Página
Resumen	I
1.- ANTECEDENTES	1
1.- GEOLOGIA	17
3.- FUNDAMENTOS DEL METODO ELECTRICO	25
4.- APLICACIONES	61
5.- RESULTADOS	66
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFIA	73

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo escrito es tratar de dar a conocer un problema de tantos que tiene la Ciudad de México.

Este problema es la zona minada, que se originó por la explotación de los yacimientos de arena al poniente de la ciudad.

El trabajo habla a fondo del problema, y sus repercusiones político-sociales y de un método geofísico (SEV'S) que como herramienta es de gran utilidad para descubrir las minas perdidas.

Se expone un caso práctico al respecto.

## 1.- ANTECEDENTES.

El problema de las zonas minadas en la Ciudad de México se originó debido a la explotación irracional de yacimientos de arena, tepetate y piedra.

Al referirme al término irracional, no me refiero al volumen de material extraído, sino al hecho de no haber presentado planos de los desarrollos mineros, que en muchos de los casos son un verdadero laberinto en las lomerías; al hecho de no haber dado la pendiente necesaria en explotación a cielo abierto y al relleno de volteo de antiguas minas a cielo abierto (este es un problema relativamente reciente).

El reglamento para los trabajos de exploración y explotación de yacimientos de arena, cantera de tepetate y piedra en el Distrito Federal, publicado el 7 de abril de 1932 y aún vigente, en su artículo 56 expresa:

"A partir de la fecha en que entre en vigor el presente reglamento, y con objeto de proteger el posible ensanche de zonas urbanizadas de la Ciudad de México, sólo se concederá licencia para explorar o explotar yacimientos de arena y tepetate, fuera de la línea de protección determinada en los puntos siguientes: partiendo de la mojonera de la Trinidad, en los límites del Estado de México; continua al sureste hasta la mojonera número dos de Hizacha, en longitud de 500 metros; deflexiona a la izquierda cuarenta y cuatro grados hasta la mojonera número tres del Huizachal, en longitud de 310 metros; deflexiona a la derecha tres grados hasta la mojonera número tres de Tecamachalco, en una distancia de 280 metros; vuelve a la izquierda, con deflexión de tres grados, hasta la mojonera de San Isidro, en longitud de 240 metros; deflexiona 62 grados a la derecha, hasta la mojonera del alto, en distancia de 380 metros, de ahí deflexiona 24 grados a la derecha hasta el punto a) sobre la margen este de la barranca de Tecamachalco, en distancia de 450 metros, sigue sobre la margen de la barranca hasta el punto b) reunión de la barranca de Tecamachalco con el

lindero de la urbanización de "Lomas de Chapultepec"; de ahí al sureste hasta el punto c) en una distancia de mil metros; deflexiona 23 grados a la izquierda, siguiendo de la urbanización "Lomas de Chapultepec", hasta el punto - d) en distancia de 950 metros; vuelve a la izquierda 75 grados hasta el punto e) en longitud de 650 metros, volteando treinta y ocho grados a la izquierda, hasta el punto - f) sobre el lindero de la urbanización "Lomas de Chapultepec", con terrenos del Molino del Rey en longitud de 420 - metros; volteando 39 grados a la derecha, hasta el punto g) sobre la barranca del Panteón, en distancia de 950 metros vuelve a la derecha, con deflexión de 32 grados, siguiendo por la barra del Panteón de Dolores, en distancia de 300 metros, hasta interceptar al camino nuevo de Toluca; deflexiona a la derecha en 13 grados hasta el punto - h) sobre la izquierda hasta el río de Sto. Domingo en longitud de 480 metros; sigue por la margen izquierda de este río, hasta el punto i), volteando al Sur hasta el punto - j) sobre la margen izquierda de la barranca confluyente del río de Sto. Domingo, en longitud de 400 metros; sigue sobre esta margen izquierda rumbo al sureste, hasta el punto k) de donde vuelve al suroeste atravesando el camino antiguo de Toluca a la vía "Tacubaya-La Venta", a la altura del kilómetro tres, siguiendo hasta el punto l) sobre la margen izquierda de la barranca y río de Becerra continúa sobre esta margen hacia el Oeste, hasta el punto m) de don-

de vuelve a la izquierda en línea recta, hasta la intercepción del camino de Sta. Lucía con la prolongación de las calles de Rayón en Mixcoac hacia el Sur hasta la acera norte de la calle de Plateros, siguiendo por estas calles hasta encontrarse con la barranca del Muerto lindero con la Delegación de San Angel".

Hay algunos aspectos que se pueden cuestionar a lo anterior:

¿ Cómo es posible que si en 1932 ya se tenía contemplado el crecimiento de la urbe se haya permitido la invasión a esta zona?

¿ Hay algún responsable del fraccionamiento de la zona?

¿ Se conocía en aquella época las consecuencias fatales de invadir esta zona?

¿ Porqué está vigente un reglamento que desde hace ya tiempo es obsoleto?

Indudablemente hay una respuesta para cada una de estas preguntas, cada una puede ser respondida desde el enfoque político-económico-social.

La zona minada en el D. F. se encuentra ubicada al Poniente del Periférico desde la Secretaría de la Defensa Nacional hasta la Av. San Jerónimo, comprendiendo la mayor parte en la Delegación Alvaro Obregón, y en menor grado en las Delegaciones Miguel Hidalgo, Contreras, Cuajimalpa. El área total de esta zona se estima entre 80 Km<sup>2</sup>. y 100 Km<sup>2</sup>. ocupando aproximadamente 200 colonias.

La invasión humana a esta área provoca daños que afectan en gran manera al ser humano, incluyendo su vida. Estos daños suelen ser imprevisibles, aumentando su frecuencia en época de lluvias y sus consecuencias están representadas por hundimientos súbitos o derrumbes de los cortes del terreno.

El grado de peligro en excavación subterránea (cavidades) se evalúa teniendo en cuenta:

- La densidad de ellas, tanto en planta como en elevación.
- El espesor del techo de las cavidades.
- El hundimiento de la superficie del terreno.
- Los daños a construcciones.

La búsqueda y la localización por métodos geofísicos de las cavidades será el tema central de este trabajo.

Las cavidades se desarrollaron en forma de galerías y salones, en mantos sensiblemente horizontales. En casi todas ellas el acceso es lateral y se localiza en las laderas de las barrancas, debido a la facilidad que representó a los mineros el descubrimiento de los mantos explotables.

Cabe mencionar también que la explotación se hizo en diferentes niveles. Las minas se encuentran por lo general a escasa profundidad.

Para el caso de minas a cielo abierto el grado de peligro está en función de:

- La geometría (altura y pendiente). El artículo 19 del ya citado reglamento establece que el talud mínimo se hará de un horizontal por cuatro verticales.

- La estabilidad aparente y el intemperismo.

- Grietas de Tensión.

Para los rellenos el grado de peligro se establece en:

- Asentamientos diferenciales.

- Deslizamientos.

- Daños a estructuras.

Estos rellenos son depósitos de materiales de desperdicios de obras; nunca fueron compactados.

Para la exploración de cavidades es bueno hacer un reconocimiento superficial del prospecto o área que interesa.

Un aspecto importante es la localización del área. - Es obvio pensar que dicha área debe de ser mayor que el predio en estudio, ya que muchas veces las minas tienen desarrollos muy largos y sobre todo difíciles de prever.

Habrá un reconocimiento que consistirá en el recorrido detallado del área, prestando principal interés a las barrancas, cañadas y cortes cercanos al predio, para localizar - bocaminas, así como de rellenos, muros construcciones y vegetación que pudieran ocultarles. Aunque usualmente las - bocaminas son de acceso lateral, no debe descartarse la existencia de aquéllas por tiro vertical o inclinado en terrenos más o menos horizontales.

En caso de encontrar bocaminas en el área, será necesario inspeccionarlas para determinar su desarrollo y estado, de esta manera en forma cualitativa se ve si afecta al lote en estudio.

Al inspeccionar las barrancas y cortes deberá observarse la presencia de capas de arena, grava y materiales pumí ticos, que pudieron haber sido objeto de explotación.

Otro aspecto importante del reconocimiento es el de evidencias superficiales de colapso o la situación precaria de bóvedas de minas. Estas evidencias pueden ser hundimientos y grietas del terreno, así como daños en las construcciones existentes.

A veces es bueno interrogar a la gente que habita allí sobre la existencia de minas en el área. En la interpretación de fotografías aéreas antiguas de la zona, se pueden encontrar bocaminas y frentes de explotación, actualmente rellenados y ocultos; para esto existen fotografías aéreas de la Ciudad de México, tomadas a intervalos de 2 a 3 años a partir del año de 1940.

Además de la existencia de minas, en el reconocimiento deberá investigarse la ocurrencia de otros problemas comúnmente asociados a ellas, como son la presencia de rellenos superficiales, que suelen encontrarse en estado suelto y es posible que sean producto de la demolición de bóvedas de cavidades preexistentes, así como fenómenos de inestabilidad de laderas de barrancas y cortes, que pueden originarse en la falla del techo de minas que de ellas arranquen.

Si el reconocimiento superficial previo indica la existencia dudosa o comprobada de minas en el área, se llevará a cabo su exploración aplicando uno o varios de los -

métodos que a continuación se listan:

- a) Directos, basados en observaciones y mediciones hechas desde el interior de las cavidades, o bien en excavaciones o perforaciones de tamaño tal que en ellas penetre un hombre.
- b) Semidirectas, consiste en sondeos de diámetros convencionales efectuados desde la superficie del terreno, - incluyendo las mediciones y observaciones hechas en - ellas a partir de esta superficie.
- c) Indirectas, apoyadas en procedimientos geofísicos.

Los métodos y los factores que favorecen su aplicación en la práctica, se tratarán a continuación por separado.

Métodos Directos: Siempre que en el reconocimiento - se descubran bocas o hundimientos accesibles de minas en el área, o que mediante trabajos de excavación, demolición, - limpieza, se lograra entrar a ellas, sería necesario determinar si afectan o no al predio en estudio.

Cuando no haya sido posible hacer esta determinación - por los métodos sencillos usados en el reconocimiento, se procederá a un levantamiento topográfico en planta de una -

poligonal por el o los ejes de galerías, efectuado con brújula y cinta o preferentemente con tránsito y cinta, y se apoyará en puntos superficiales que permitan referirlo a la posición del predio.

Si se trata de túneles de sección transversal más o menos constante, se medirá su anchura promedio; en el caso de salones o cavidades de dimensiones horizontales más o menos grandes se levantarán aquellos puntos de su contorno mínimo necesarios para definir su geometría aproximada en planta.

Simultáneamente, se localizarán y referirán aquellas partes de las minas donde existan derrumbes, rellenos y sedimentos depositados por agua infiltrada, que impidan o hagan peligroso el acceso y por tanto no permitan continuar con el levantamiento. Aunque no es usual, en ciertos casos es posible allanar estos obstáculos y proseguir el levantamiento mediante trabajos de excavación, limpieza, obras de protección y ademado provisionales. Otras dificultades eventuales, como existencia de agua u olores mefíticos en el interior de las minas pueden resolverse empleando bombeo convencional o haciendo circular aire.

En caso de que el levantamiento concluyera que las mi-

nas quedan incluidas en el subsuelo del predio, será necesario afinarlo, levantando en detalle el contorno de las cavidades en las zonas que interesen, y efectuando una nivelación cuidadosa del piso y clave de las minas de estas zonas. Será indispensable que, tanto en planimetría, como en altimetría, este levantamiento detallado de las minas se ligue debidamente al levantamiento topográfico superficial del predio, para lo cual se efectuarán excavaciones - o perforaciones que atraviesen las bóvedas de las cavidades, localizadas en forma conveniente.

Por otra parte, se inspeccionarán de manera detallada las cavidades para conocer las características de los materiales explotados, que en general constituirán las paredes, y de los que forman su techo y piso.

Especial atención se deberá poner a las condiciones de alteración y fisuración del techo y sus elementos de soporte como son paredes y pilares.

Se incluye también en este método, aquellas excavaciones o perforaciones de gran diámetro, en las que pueda introducirse un hombre para investigar la causa de irregularidades detectadas por métodos semidirectos o indirectos, para conocer espesor y características de rellenos superficiales, o para permitir el acceso a minas e iniciar su le-

vantamiento topográfico.

Métodos Semidirectos: Se utilizan en casos en que el reconocimiento superficial no haya permitido asegurar la ausencia de mina, o bien cuando las condiciones actuales de éstas no hagan factible la exploración directa completa y satisfactoriamente.

Su aplicación puede resultar en casos como:

- En predios de dimensiones reducidas limitados por colindancias.
- Para estudiar la cimentación de futuras construcciones de ciertas características específicas y bien definidas, que cubrieran parte o la totalidad de un predio de cualesquiera dimensiones.
- En predios que estén actualmente cubiertos en su totalidad por construcciones.
- Para investigar anomalías detectadas por métodos geofísicos.
- En predios en los que mediante un reconocimiento superficial se hubieran apreciado hundimientos, o grietas en la superficie.
- Para investigar la causa del mal comportamiento y daños de estructuras ya construídas.

Cabe mencionar que un sondeo o una perforación sólo es una exploración en un punto, cuando está correctamente ejecutada no será posible concluir más que si existe o no en el sitio de la anomalía una grieta o cavidad y su posición relativa a la superficie del terreno. Por tanto la investigación mediante sondeos de minas subterráneas bajo un área de cierta extensión, depende de la densidad de sondeos.

En el primer caso, dada la reducida extensión del predio, es factible lograr una densidad de sondeos aceptables a un costo relativamente bajo. La aplicación de métodos indirectos puede ser improcedente.

En el segundo caso, el programa de exploración deberá adaptarse a la distribución de los elementos estructurales, la magnitud de las descargas que transmitirán al subsuelo, y el tipo de cimentación que se prevea tentativamente.

En el tercer caso, las construcciones representan un serio obstáculo para la aplicación e interpretación de métodos indirectos. La ejecución de sondeos por perforación, si bien se ve dificultada, es factible de realizar si se utilizan equipos de perforación pequeños.

En los restantes casos las perforaciones se locali-

zarán en los sitios de anomalía, hundidos, grietas o daños, dependiendo su número y distribución de la geometría de estos defectos.

La profundidad de exploración estará en función de la profundidad del nivel inferior de cavidades probables o existentes en el sitio.

En el caso de no contar con esta información es recomendable hacer perforaciones con recuperación de muestras para encontrar el manto explotable.

Métodos Indirectos: Estos métodos son apropiados cuando, además que interesa conocer la estructura geológica del subsuelo, es necesario definir las anomalías locales, es decir, las oquedades.

También es posible obtener información sobre los espesores y a veces la calidad de rellenos superficiales, que pueden ser producto de la demolición de bóveda de minas o bien ocultar sus bocas.

En particular para investigar áreas grandes su empleo representa ventajas, y sobre todo económicas, con relación al de métodos semidirectos. La correcta aplicación de ellos permite delimitar en forma rápida aquellas partes del área

que no presentan problemas de cavidades, señalando los sitios de anomalías en donde se obliga practicar métodos semi directos, y si fuera necesario, los directos.

Pueden ser empleados también con éxito en el caso de predios pequeños siempre y cuando el área circunvecina esté baldía y sea accesible a dichos métodos.

Es indispensable que la profundidad real explorada alcance el nivel inferior de las barrancas o cortes cercanos, definidos en el reconocimiento superficial.

Dentro de los principales métodos indirectos tenemos - los sísmicos, magnéticos, gravimétricos, eléctricos.

Sobre este último método se desarrollará el trabajo y explicaré sus fundamentos en el capítulo III.

## 2.- GEOLOGIA.

En el presente capítulo describiré en forma breve la Geología General del área.

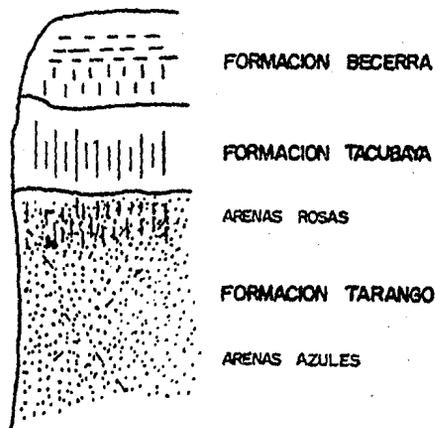
Se habla en forma superficial de su estratigrafía y tectonismo; y además se confirma que el modelo real (formación estructural) no se aleja en demasía del modelo ideal (medios estratificados) para métodos eléctricos.

Las lomas que se elevan al Oeste de la Ciudad de México constituyen los abanicos aluviales de la Sierra de las Cruces.

Todo es una acumulación de material piroclástico que se depositó a los pies de los aparatos volcánicos y fueron transportados hasta esta área. Se supone que estos aparatos volcánicos estuvieron activos a finales del Mioceno y se extendieron a mediados del Plioceno, midiendo en la escala absoluta del tiempo esto significa alrededor de 10 a 15 millones de años. Por lo tanto, las lomas se formaron principalmente en el Plioceno inferior, hace unos 5 millones de años.

En el año de 1948 estas lomas se estudiaron con más detalle. En ese mismo año definieron la formación Tarango, basándose en materiales que procedían precisamente de la barranca de Tarango, donde existen excelentes cortes, de las minas de arena azul en explotación.

A continuación se describe el afloramiento típico con sus tres formaciones.

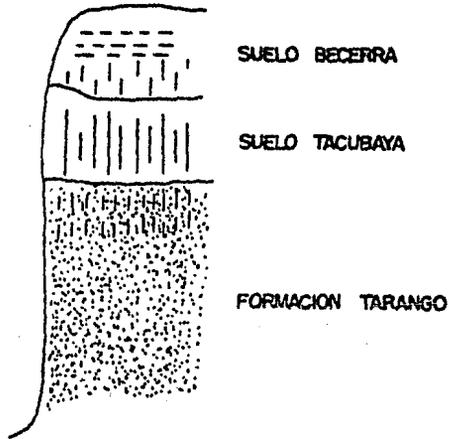


En los años subsecuentes la división del afloramiento típico en tres unidades estratigráficas se modificó, simplificándola. El conjunto del afloramiento se interpretó subsecuentemente como parte de la formación Tarango, la cual representa la suma de los productos piroclásticos de las Sierras depositados a los pies de ellas. Por consiguiente se eliminaron las formaciones Tacubaya y Becerra, interpretándose como horizontes tobáceos en la cima de la formación - Tarango, que fueron erosionados, redepositados en hondonadas y sometidos a distintos grados de meteorización consecuencia de condiciones climáticas tal vez del Cuaternario. Así el color gris de un horizonte de suelo fósil tobáceo, - conteniendo capas de caliche\*, se interpreta en la actualidad como consecuencia de un clima tendiente a árido (Meteorización Becerra.) El color amarillo de otro horizonte - tobáceo alterado en general subyacente al anterior, se interpreta como consecuencia de un clima más bien húmedo (meteorización Tacubaya.)

La formación Tarango representa un conjunto estratificado a veces regular, a veces irregular y hasta lenticular, ligeramente inclinado ( $4^{\circ}$ ), compuesto de los seis siguientes elementos litológicos:

---

\* Caliche: Carbonato de Calcio Amorfo; se deposita en climas semiáridos.



- A) Horizontes de cenizas volcánicas de muy distinta granulometría.
- B) Capas de arena pumíticas.
- C) Lahares.
- D) Ignimbritas.
- E) Depósitos Fluviales.
- F) Suelos.

Todos estos elementos, con excepción de los suelos, son productos de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados. Según la actividad del aparato individual y según el magma contenido en las erupciones producen cenizas, pómez, brechas, avalanchas ardientes o derrames lávi-

cos. Las lavas descienden fluyendo lentamente por los flancos del cono, en forma eventual pueden avanzar por las barrancas algunos centenares de metros a partir del cráter. Por lo contrario, las brechas y cenizas producidas por explosiones más violentas, se dispersan a mayores distancias del cráter siendo a veces hasta arrastradas por los vientos a decenas de kilómetros de distancia. Las erupciones más violentas producen piedra pómez depositándose ésta a través de lluvias en capas de gran uniformidad hasta distancias - muy lejanas del cráter.

La formación Tarango alcanza espesores hasta de 200 M.

Cuando se estudió la estructura de la formación Tarango fue posible observar que ésta se compone de la superposición de varios abanicos aluviales, cada uno terminado con su superficie estructural. Por lo general cada abanico corresponde a la vida activa de un volcán. Cuando éste se - apaga surge otro volcán, el cual produce su nuevo abanico aluvial que se sobrepone al abanico anterior. Así resulta que la formación Tarango se compone de numerosos abanicos aluviales superpuestos o entrelazados, según la secuencia o contemporaneidad de las erupciones de distintos volcanes.



En el Mioceno Superior la cuenca de México sufrió un tectonismo en bloques a lo largo de fracturas dirigidas al NW.

Este tectonismo fue sustituido en el Plioceno por otro que se desarrolló a lo largo de fracturas dirigidas al NE, creando un impresionante conjunto de fosas y pilares. Este último tectonismo que rigió la actividad volcánica de las Sierras afectó a los depósitos de los abanicos aluviales Tarango fracturándolos y fallándolos principalmente al NE.

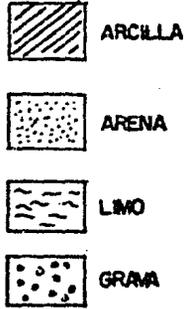
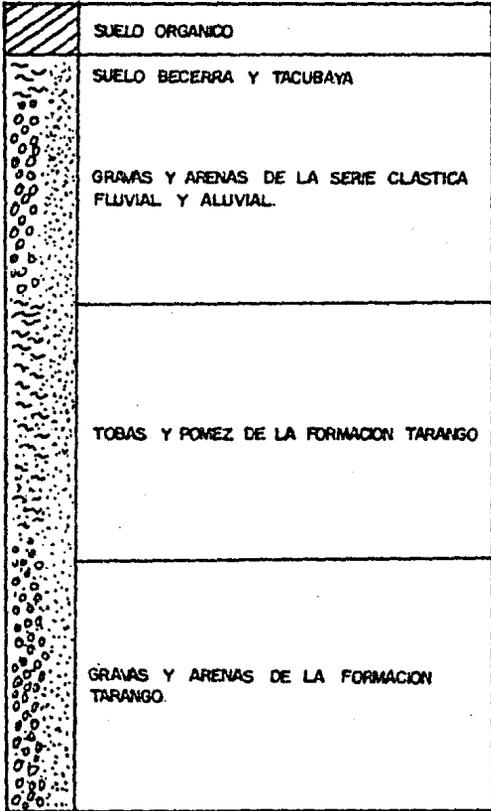
La mayoría de las barrancas que surcan las lomas mantienen esta dirección.

La formación Tarango está interestratificada con las series lávicas de las Sierra de las Cruces donde se originaron. Sobreyacen los abanicos volcánicos Tarango a los -

depósitos volcánicos del Terciario medio (Formación Xochitepec). Sin embargo, subyace a los depósitos clásticos - aluviales y aluviales del Cuaternario.



En general la secuencia estratigráfica en las zonas - minadas es la siguiente:



### 3.- FUNDAMENTOS DEL METODO ELECTRICO

En el capítulo I se mencionó cada uno de los métodos para la exploración de minas. Se habló también de las diferentes herramientas que se pueden usar para los métodos indirectos (gravimetría, sísmica, eléctrica, etc).

Todos estos métodos se pueden usar y dar una respuesta satisfactoria.

Trataré sobre los métodos eléctricos en corriente continua y en forma más particular sobre los sondeos eléctricos verticales (S.E.V.).

A continuación escribiré sobre los conceptos y ecuacioo

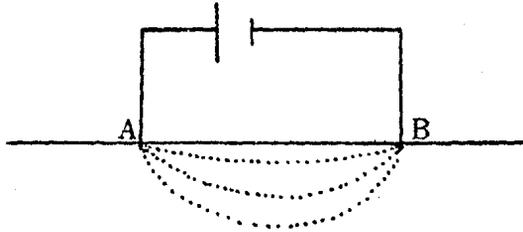
nes fundamentales que rigen el método.

Como sabemos las corrientes eléctricas que interesan en la prospección no recorren conductores lineales (hilos y cables) como en las instalaciones y aparatos eléctricos usuales, sino que se mueven en un medio tridimensional.

Debemos recordar que para simplificar desarrollos matemáticos se suponen modelos lo más simple posibles. En este caso nuestro subsuelo estará constituido por un semiespacio homogéneo de resistividad  $\rho$ .

El otro semiespacio del modelo de resistividad infinita representará la atmósfera. Para establecer un campo eléctrico, será preciso disponer de un generador de corriente, por ejemplo una batería de corriente continua y conectarla, por medio de cables a dos electrodos que llamaremos A y B, que son barras metálicas. Como el tamaño de éstas es relativamente pequeño con respecto al terreno, podemos considerar que los electrodos se reducen a puntos situados en la superficie del terreno.

Al inyectar corriente por el electrodo A penetrará y recorrerá el subsuelo, recibiendo posteriormente por el electrodo B, hacia la batería, cerrándose de esta manera el circuito.



El principio de conservación de la carga nos dice que:

$$I_A + I_B = 0 \quad \dots \quad 1$$

siempre y cuando el sistema sea estacionario.

Para establecer las leyes del fenómeno se parte de las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times E = - \frac{\delta B}{\delta t} \quad \dots \quad 2$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t} \quad \dots \quad 3$$

Como ya se especificó que son campos estacionarios, las ecuaciones se reducen a:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad \dots 4$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \dots 5$$

La ecuación 4 nos indica que el campo eléctrico "E" es conservativo e irrotacional, por lo que se deriva de un potencial escalar "U". Por lo dicho anteriormente.

$$\nabla U = -\mathbf{E} \quad \dots 6$$

También nuestro modelo es isotrópico, por lo que deberá cumplirse la Ley de Ohm, que en su forma diferencial se expresa como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \dots 7$$

La cual nos dice que la densidad de corriente "J" en un punto tiene la misma dirección y sentido que el campo E en el mismo punto, y es proporcional a él. El factor de proporcionalidad es la conductividad ( $\sigma$ ) y es inversa a la resistividad  $\rho$ .

Además, en ningún punto del semiespacio conductor puede haber aparición ni desaparición de la carga, salvo en A y en B, por lo tanto:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \dots 8$$

Combinando las ecuaciones 7 y 8 tenemos:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad \dots 9$$

que representa la ecuación más general de los métodos eléctricos. Desarrollándola obtenemos:

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = \mathbf{0} \quad \dots 10$$

Combinando 10 con 6 obtenemos:

$$-\sigma \nabla^2 U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = \mathbf{0} \quad \dots 11$$

Pero como la resistividad es uniforme en todo el medio tenemos:

$$\nabla^2 U = \mathbf{0} \quad \dots 12$$

que es precisamente la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semiespacio conductor, mas no en los electrodos, ni en las superficies de discontinuidad.

Ahora, si trazamos alrededor del electrodo, dentro del semiespacio inferior, una superficie semiesférica en cualquier punto de ella, por razón de simetría, la densidad de corriente "J" tendrá el mismo valor, y estará dirigida en

forma radial. La integral de "J" sobre la superficie semiesférica será igual a I por lo que si el radio es "r" - se tendrá:

$$2\pi r^2 J = I \quad \dots 13$$

Y combinando con 7:

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad \dots 14$$

de donde se obtiene que:

$$E = \frac{I \rho}{2\pi r^2} \quad \dots 15$$

O sea que el campo "E" de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado del radio "r".

La diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera M y N vendrá dada, según se deduce de la ec. 6, por:

$$U_n^m = - \int E \cdot \delta l \quad \dots 16$$

Donde el camino de integración es indiferente, pues - como hemos visto, el campo es conservativo. Entonces, si son  $r_1$  y  $r_2$  las distancias respectivas de los puntos M y N al electrodo A, tendremos:

$$U_n^m = \frac{I\rho}{2\pi} \int \frac{\delta r}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots 17$$

Si en vez de considerar diferencias de potencial, queremos considerar potenciales absolutos, habrá que atribuir a un punto determinado el potencial cero. Por convenio universal se toma como origen de potenciales un punto situado a distancia infinita de la fuente, por lo que hallaremos el

potencial absoluto en el punto M calculando el límite de la ecuación 17 para  $r_2 \rightarrow \infty$  que es:

$$U_m = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r_1} \quad \dots 18$$

Como el potencial es magnitud aditiva, si son varios los materiales habrá que sumar algebraicamente los potenciales respectivos, de modo que:

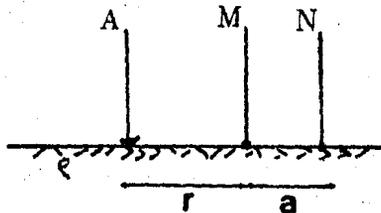
$$U = \frac{1}{2\pi\sigma} \sum \frac{I_i}{r_i} \quad \dots 19$$

Donde "r<sub>i</sub>" es la distancia del manantial al punto considerado, e I<sub>i</sub> es la corriente que entra o sale por él con su signo correspondiente.

En la práctica los aparatos que se usan en la prospección miden la corriente I que se inyecta al terreno y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N.

Hasta ahora sólo hemos considerado un semiespacio homogéneo e isótropo, pero si el subsuelo se divide en diferentes zonas, o medios homogéneos e isótropos, pero de diferente resistividad, no podemos usar la ecuación 19, sino que habrá que buscar una integral de la ecuación de Laplace que satisfaga las condiciones de frontera para el nuevo caso.

Un concepto muy importante en la prospección eléctrica viene siendo el de la resistividad aparente, que es una resistividad ficticia, la que se obtiene aplicando a un medio heterogéneo las expresiones correspondientes a un medio homogéneo, por ejemplo para un dispositivo trielectródico como se muestra en la figura.



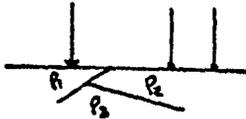
Según la ecuación 17 se tiene:

$$\Delta V = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{a}{r(r+a)}$$

Despejando " $\rho$ " resulta.

$$\rho = \frac{2\pi r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots 21$$

La ec. 21 se puede utilizar para un medio homogéneo, pero si se utiliza para un medio heterogéneo como el mostrado,



Su expresión será

$$\rho_a = \frac{2\pi r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots 22$$

Como ya se pudo observar, la resistividad aparente es nuestra variable experimental de campo y la que se toma como base para la interpretación.

Si observamos la ecuación 21 veremos que la resistividad depende de la diferencia de potencial, la corriente inyectada y de un valor constante que llamaremos "K", de esta manera podemos escribir la ecuación 21 como:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad \dots 23$$

La constante "K", que llamaremos factor geométrico, es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo usado. Esta constante tiene dimensiones de longitud.

Si consideramos dos electrodos de potencial (M y N) y dos electrodos de corriente (A y B) y aplicamos la ecuación 19 obtendremos.

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right\} \quad \dots 24$$

por consiguiente:

$$\rho = 2\pi \left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right\}^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots 25$$

su factor geométrico será:

$$K = 2\pi \left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right\}^{-1} \quad \dots 26$$

En base a esto se puede crear un número infinito de dispositivos y con cualquier número de electrodos, siempre y cuando se conozca la separación entre éstos.

Entre los principales tenemos:

Dispositivo

Factor Geométrico

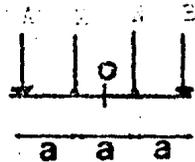
Simétrico

$$\frac{\pi r(r+a)}{a}$$



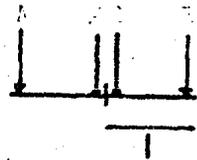
Wenner

$$2\pi a$$



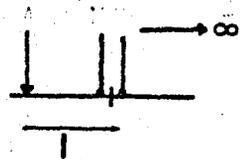
Schlumberger

$$\pi l^2$$



Medio Schlumberger

$$2\pi l^2$$



Debemos de recordar que la resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado y que la resistividad en las rocas no va a depender exclusivamente de los minerales

que las forman.

Todas las rocas tienen poros en mayor o menor proporción, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos.

Se han demostrado además que la resistividad de un medio heterogéneo con inclusiones conductoras disminuye notablemente si están en contacto entre sí, por lo tanto las rocas pueden considerarse como medios de matriz aislante, en los que existe una red de conductos irregulares y tortuosos llenos de electrolitos, a los cuales se debe por completo la conductividad del conjunto.

A continuación enlistaré los márgenes de resistividad de los componentes que integran la geología en las zonas minadas.

<u>Material</u>	<u>Resistividad (ohms - m )</u>	
Arcilla	1	- 50
Limos	10	- 100
Arenas	100	- 1000
Gravas	1000	- 10000

La fisuración, impregnación de agua salada etc, pueden extender estos límites. También se observa que la resistividad de las rocas clásticas y detríticas aumenta con el tamaño del grano.

Otro de los puntos importantes a tratar en este capítulo es sobre la teoría del Sondeo Eléctrico Vertical.

Se le llama sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de corriente y potencial. Cuando el dispositivo empleado es simétrico, o asimétrico con un electrodo en el "infinito", y durante la medición permanecen fijas, el rumbo del dispositivo y el centro del segmento MN suele denominarse Sondeo Eléctrico Vertical ( SEV ).

Los métodos de sondeos resistivos fueron aplicados por primera vez en 1912 por Conrad Schlumberger.

La finalidad de los sondeos eléctricos verticales es conocer la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada

SEV se representan por medio de una curva en función de las distancias entre electrodos. Para que esto sea posible, es necesario que éstas distancias puedan expresarse por una sola variable, pues de lo contrario habría que recurrir a una superficie y no a una curva. Esta condición puede cumplirse de dos modos: bien por ejemplo de un dispositivo en el que la configuración de electrodos permanezca siempre geoméricamente semejante a si misma, que es el caso del dispositivo Wenner, bien por la utilización de dispositivos en los que sólo influye la distancia. Esto último ocurre con el dispositivo Schlumberger, en el que la distancia MN, se considera nula frente a AB.

Cuando se utiliza este dispositivo, las resistividades aparente " $\rho_a$ " se llevan en ordenadas, y en abscisas las distancias  $OA = AB/2$ . Para el dispositivo Wenner, se llevan en abscisas los valores sucesivos de la distancia  $a$ . Las escalas han de ser bilogarítmicas. La curva así obtenida la denominaremos curva del SEV.

La mayor eficiencia del método corresponde al caso en que los SEV se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitadas por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado). La experiencia demuestra

que los resultados teóricos obtenidos para medios de esta clase, son tolerablemente válidos para estratos inclinados hasta unos  $30^\circ$ .

En el Capítulo II se mencionó que los estratos de interés poseen  $4^\circ$ , así que respecto a este punto no se encuentra ningún problema.

Uno de los problemas que encuentra el geofísico, es el de deducir la distribución vertical de resistividades en el punto sondeado, partiendo de las resistividades aparentes - suministradas por el SEV. A este problema se le conoce como inverso y lo veremos un poco más adelante. El problema directo, que determina la curva de resistividad aparente a partir de un corte geoelectrico no lo trataré debido a los fines prácticos de este trabajo.

Otro de los puntos a tratar en un SEV es acerca de su profundidad de penetración, es decir cuál será la parte de terreno que influye en la información suministrada.

Como es de esperar, las zonas más profundas influirán menos en el potencial observado en superficie, al ser menor en ellas la densidad de corriente. No obstante no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corrientes

te disminuye de modo suave y gradual sin anularse nunca.

Al aumentar la separación AB aumenta en la misma proporción la profundidad a que corresponde una determinada densidad de corriente, por lo que podría pensarse que la penetración es proporcional a AB. Esto sin embargo, no es cierto en general, puesto que las fórmulas anteriores solo son válidas para subsuelo homogéneo. En un medio estratificado, o simplemente heterogéneo, la cantidad de corriente variará según una ley diferente en cada caso, por lo que la penetración dependerá de la distribución de resistividades en el subsuelo. Además en la práctica no se conoce de antemano la distribución de resistividades, por lo que no es posible conocer la penetración que se logrará.

En resumen el concepto de penetración de un SEV, tan claro a primera vista, depende de muchos factores, y no puede establecerse fácilmente y mucho menos de antemano.

Puede ocurrir, incluso que la penetración de un SEV no crezca con la distancia AB, a partir de un cierto valor de ésta. Esto sucederá siempre que a una cierta profundidad exista una capa perfectamente aislante, o perfectamente conductora, pues en tal caso, la corriente no podrá pasar por debajo de dicha capa, por lo que la penetración de un SEV, efectuado en estas condiciones, no podrá ser nunca ma-

yor que  $Z_0$  por mucho que se aumente la distancia AB.

Ahora se tratará sobre el aspecto de campo. Es importante que en cualquier levantamiento se dé desde el punto de vista técnico una buena calidad. Por consiguiente, en todas las etapas de trabajo han de tomarse las precauciones necesarias para conseguir la máxima calidad en los resultados finales. Independientemente de esto, debe procurarse, por motivos económicos, reducir al mínimo la duración y gastos del levantamiento.

En todos los trabajos de geofísica de campo existen, además de los aspectos puramente científicos cuestiones prácticas de organización, logística y administración.

Las etapas principales de que se compone un levantamiento geofísico son:

- 1.- Planteamiento del problema y recopilación de datos geológicos y de otra índole sobre la zona de trabajo.
- 2.- Elección del método de prospección y de las modalidades concretas que deben aplicarse.
- 3.- Programación detallada del trabajo de campo.
- 4.- Recopilación y elaboración de los datos obtenidos.

5.- Interpretación.

6.- Correlación con la Geología, interpretación final y establecimiento de las conclusiones y recomendaciones.

Se comentará cada uno de los siguientes puntos por separado:

1.- Planteamiento del problema y recopilación de datos geológicos.

El problema cuya resolución se encomienda a la geofísica debe estar claramente planteado en términos geológicos o geotécnicos. No tiene sentido proponer el estudio diciendo que se busca algo (agua, petróleo, minas), sino que debe especificarse cuáles son los problemas concretos que desean investigarse.

En todos los casos, no pueden aplicarse los métodos geofísicos de prospección si no existe contraste de propiedades físicas entre lo que lo rodea y lo que quiere estudiarse.

Concretamente en el caso de los métodos eléctricos, habrá de existir contraste de resistividad entre unas y otras. De no ser así los métodos no son aplicables.

Es necesario tener información sobre la zona y el problema que se pretende estudiar, a fin de decidir si es conveniente aplicar algún método geofísico, y en caso afirmativo, elegir éste. Esta necesidad de información sube de punto cuando quieran decidirse, de modo más concreto y detallado, las modalidades de aplicación del método. En general, es preciso obtener la siguiente documentación sobre el área de trabajo.

- a) Cartografía topográfica
- b) Fotografías aéreas en pares estereoscópicos
- c) Mapas y cartas geológicas
- d) Información sobre el subsuelo obtenida mediante perforaciones, pozos, socavones, etc.
- e) Informe escrito sobre la Geología de la zona, donde se estudien los aspectos relacionados con la investigación propuesta.
- f) Datos y resultados de los trabajos geofísicos que hayan podido efectuarse anteriormente en la zona en cuestión y en sus proximidades.
- g) Otros datos de interés práctico, tales como vías de comunicación y clima de la zona; presencia de corrientes perturbadoras debidas a ferrocarriles eléctricos, instalaciones industriales, etc.; existencia de edificaciones, bosques, ríos y otros obstáculos que dificulten el tendido de cables, etc.

La escala de los documentos indicados en a), b), y c) debe ser adecuada al grado de detalle o escala que se pretenda en el trabajo geofísico, en investigaciones de gran envergadura, puede ser conveniente el empleo de dos escalas, una de trabajo, y otra para los resultados de conjunto.

Para la información geológica, si bien pueden utilizarse los mapas y memorias existentes sobre la zona, será raro el caso en que no sea necesario obtener datos geológicos complementarios pertinentes a la investigación que va a realizarse por medio de nuevas observaciones de campo.

Son muy útiles y a veces de importancia decisiva, los datos a que hace referencia el párrafo anterior d). En lo que respecta a perforaciones es necesario que su ejecución haya sido vigilada por un geólogo.

2.- Elección del método prospectivo y de su modalidad concreta de empleo.

La elección del método de prospección que debe aplicarse a cada caso determinado, se hace teniendo en cuenta los datos recogidos previamente dando preferencia al procedimien

to que sea capaz de localizar con la máxima seguridad y precisión el cuerpo o estructura buscado, al que se llamará - objetivo.

Entre los factores que han de ser sopesados figuran el tamaño, profundidad y forma que se esperan para el objetivo; el contraste de propiedades físicas de este respecto del medio circundante; el poder resolutivo, costo y rapidez de - aplicación de cada método, así como la sensibilidad de estos a los accidentes topográficos y otras causas de perturbación.

La aplicación de métodos eléctricos exige, como es obvio, la existencia de diferenciación suficiente entre las resistividades del objetivo y del medio encajonante. Además, es necesario que la topografía del terreno sea relativamente suave, en especial para trabajos someros. También es conveniente que las formaciones geológicas sobre las que se efectúan el SEV presenten una razonable homogeneidad lateral.

Se observa que las condiciones geológicas y físicas de la zona minada, en algunos aspectos son muy parecidas a lo que se necesita para obtener una buena respuesta del SEV. Se debe de poner especial atención en la topografía que puede atenuar o inventar anomalías, así como producir efectos laterales que causan distorsión en las curvas cuando los -

electrodos se encuentran cerca de un contacto lateral, aunque no lo toque. La distorsión va a producir una capa ficticia.

Cabe mencionar que el contraste de resistividades es bueno para la zona. Como el medio estratificado no se cumple en su totalidad, la interpretación cuantitativa se dificulta; este problema se resuelve tomando una alta densidad de datos y recurriendo a una interpretación cualitativa.

### 3.- Programación detallada del trabajo de campo .

La programación de estudios por medios de SEV incluye, aparte de las cuestiones de organización, logística, etc., la elección de la densidad de las mediciones (o sea, en este caso, la distancia entre el centro de SEV de la situación concreta de estos centros y de la orientación de las alas (línea AB) correspondientes, cuestiones que deben decidirse con gran cuidado en vista de su influjo en la calidad final del trabajo. Otra cuestión importante en la determinación de la longitud AB final de los SEV.

a) La densidad de las mediciones, es decir, la distancia entre centros del SEV contiguos, depende, por una parte, del carácter y fase de la investigación, y por otra, de la estructura geológica de la zona.

El término fase hace referencia a que en las investigaciones importantes suelen iniciarse por una etapa de reconocimiento con SEV muy esparcidos, a la que sigue la fase de producción con la densidad normal prevista, y una fase final de detalle con mayor densidad de SEV en las zonas de más interés. En general los centros de los SEV deben formar una red de malla cuadrada o rectangular. Cuando la tectónica y variaciones laterales sean suaves, puede disminuirse la densidad y debe aumentarse en caso contrario.

La distancia entre perfiles puede disminuirse en las zonas de geología más complicada y aumentarse donde ésta sea más sencilla.

Naturalmente, la presencia de accidentes topográficos o de otra índole puede llevar a desviaciones respecto de la regularidad de la retícula, el espaciado de los SEV sobre cada perfil, o la rectilineidad de éstos, ya que tales condiciones son secundarias frente a la adecuada ubicación de los SEV.

En la prospección de cavidades es común encontrar separaciones de 4 a 6 m, entre centros de sondeo.

b) La elección de los centros de los SEV y de las orientaciones o azimuts de las alas deben efectuarse con cuidado

y minuciosidad, especialmente cuando la geología es complicada.

Esta elección debe hacerse por medio de fotografías aéreas estereoscópicas con el auxilio de mapas topográficos y geológicos de escala adecuada, buscando para cada SEV la mejor aproximación a condiciones de homogeneidad lateral que hagan aplicable la teoría del medio estratificado.

Por otra parte, los electrodos A y B jamás deben cruzar por encima de una falla o contacto. Si estas condiciones no pueden cumplirse satisfactoriamente, se hace necesario desplazar el centro del SEV, o si es posible efectuar ésta con algún dispositivo que mande algún electrodo al infinito, sobre el ala que presenta mejores condiciones.

Una cuestión de interés práctico es la designación de los SEV. Algunos geofísicos emplean numeración independiente para cada perfil, pero tal costumbre no es aconsejable, pues pueden producirse confusiones entre dos SEV del mismo número y diferente perfil y se complica innecesariamente al sistema de referencia, obligando a dar dos datos cuando basta uno solo. Además, cuando los SEV cubren un área, el interpretador puede agrupar los SEV de diferentes modos, buscando la mayor representatividad en los cortes geoeléctricos, por lo que no puede atribuirse cada SEV a un solo

perfil. Lo más práctico es designar cada SEV por un número de orden preferiblemente el de la ejecución.

Es importante hacer notar que muchas de las veces las zonas minadas ya están urbanizadas, por lo cual se deberá programar los tendidos de las alas a las condiciones de la zona.

c) La determinación de la longitud AB final hasta lo que debe llegar cada SEV no es sencillo. Interviene en ella el concepto de penetración práctica o profundidad interpretable, puesto que se trata de responder a la pregunta: ¿Qué longitud final hay que dar a la línea AB para alcanzar la profundidad deseada?. La respuesta no puede basarse en las viejas reglas empíricas que suponían que la máxima profundidad interpretable en la curva de un SEV era, en todos los casos, - igual a una fracción fija de la longitud AB final (solía - tomarse 1/4) puesto que la relación entre ambas magnitudes - depende del corte geoelectrico. Además, como ya se dijo anteriormente, la presencia de una capa muy resistiva, o muy conductora afectará aunque el AB sea muy largo.

Teniéndose todo esto en cuenta se comprenderá que no es posible dar reglas sencillas para determinar de antemano las longitudes finales de las líneas AB.

En la práctica, pueden seguirse algunos de estos procedimientos.

- 1) Si se conocen las resistividades de los materiales del subsuelo y sus espesores probables, pueden trazarse - las curvas de resistividades aparentes, o lo que es - más fácil, las de Dar Zarrouk, preferiblemente para - varios casos posibles, y basarse en estos resultados para determinar la distancia AB final de los SEV que van a ejecutarse.
- 2) Basarse en los resultados obtenidos por el método SEV en la misma zona, o en otras análogas o contiguas, si es que dispone de tales datos.
- 3) Efectuar algunos SEV de ensayo en puntos estratégicos de la zona que va a estudiarse.
- 4) Tomar un valor mínimo razonable de AB y dar instrucciones concretas al operador de campo de proseguir hasta obtener cinco puntos de subida.

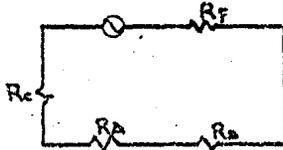
En las zonas minadas es común aplicar un  $AB/2$  hasta de 30 metros.

En el equipo utilizado en el trabajo de campo intervie-

nen dos circuitos electrónicos: uno es de emisión y otro de recepción. El primero tiene como finalidad hacer circular por el terreno, introduciendo a través de los electrodos A y B una corriente eléctrica de intensidad constante.

Este circuito está compuesto de una fuente de alimentación, dos electrodos, de un amperímetro, cables y elementos de conexión necesarios.

La siguiente figura, representa al circuito equivalente.



donde  $R_F$  es la resistencia de la fuente de corriente continua, que incluye la del amperímetro, y  $R_C$ ,  $R_A$ ,  $R_B$ , son respectivamente la resistencia de los cables, y la de los contactos de los electrodos A y B. La intensidad de corriente  $I$  vendrá dada por:

$$I = \frac{U}{R_F + R_C + R_A + R_B} \quad \dots 27$$

donde  $U$  es la f.e.m. del generador. En la práctica,  $R_F$ , es muy pequeña y lo mismo ocurre con  $R_C$ , cuando la línea es corta, de modo que  $I$  depende fundamentalmente de los valores de  $R_A$  y  $R_B$ .

La resistividad del terreno no influye prácticamente en la intensidad del circuito de emisión, salvo en la parte más próxima al electrodo; por eso es que se llama resistencia de contacto. En la práctica suelen usarse como electrodos, barrenas de acero puntiagudas. La resistencia de contacto de los electrodos es el factor que limita en la práctica el valor de la intensidad  $I$ .

El medio más conveniente para aumentar la  $I$  no es elevar la tensión del generador, sino disminuir la resistencia de contactos de los electrodos A y B. Para esto, puede emplearse alguno de los siguientes procedimientos e incluso, si fuese necesario, todos ellos simultáneamente:

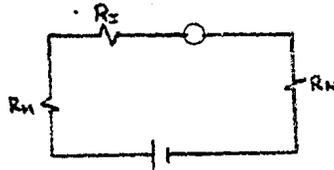
- Clavar más profundamente los electrodos
- Disminuir la resistencia del terreno en contacto con los electrodos por medio de agua salada.
- Substituir cada uno de los electrodos A y B por un conjunto de electrodos conectados entre sí. Debe tenerse en cuenta que estos electrodos no están propiamente en paralelo, por estar unidas eléctricamente entre sí

a través del terreno.

Otro detalle importante que puede inducir a error en la prospección son las llamadas fugas.

Una fuga es la derivación al terreno de una parte de la corriente  $I$  en un punto del circuito diferente de los electrodos A y B por defecto de aislamiento en el cable o accesorios.

El otro circuito, como ya se mencionó, es el de potencial. Su circuito equivalente sería:



donde  $R_I$ , es la resistencia del instrumento,  $R_M$ , y  $R_N$ , son las resistencias de contacto de los respectivos electrodos; la pila simboliza sólo la presencia en el circuito de una d.d.p. " $\Delta V$ " debida al campo creado por el circuito de emisión. A esta " $\Delta V$ " se suma en la práctica ruido que puede alterar la lectura. Estos parásitos pueden ser la polarización de electrodos, corrientes industriales, etc.

4) Recopilación y elaboración de los datos obtenidos.

Esta es una fase intermedia entre el trabajo de campo y la interpretación. Consiste en llevar toda la información del trabajo de campo al gabinete para prepararlo al siguiente paso.

5) Interpretación.

Al entrar a este punto se tomará en cuenta que se pueden efectuar dos tipos de interpretación:

- 1) Cuantitativa
- 2) Cualitativa.

La finalidad de la interpretación cuantitativa es determinar la distribución espacial de las resistividades en el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente - observados en la superficie del terreno.

Entre los principales métodos de interpretación cualitativa están.

- a) Métodos Empíricos. Se basaron en trabajos que realizaron Gish y Rooney (1925). Estaban basados en el erróneo principio de que la resistividad aparente medida - para cada AB sólo estaba influida por la resistividad - verdadera existente a una sola profundidad, ligada por

una relación muy simple con dicha distancia. Está en desuso actualmente este método.

b) Método Directo.- Consiste en pasar de las Curvas de Resistividades Aparentes a la función Kernel y de ahí pasar a los parámetros del corte.

c) Método Gráfico.- Se tienen dos métodos.

c1) Superposición

c2) Reducción.

La idea básica del método gráfico de superposición es el de comparar las curvas de campo que se desea interpretar con las curvas teóricas de un catálogo, hasta encontrar una de éstas que coincida con la primera.

El método de reducción consiste en disminuir artificialmente el número de capas de la curva de campo, sustituyendo las dos primeras por una sola equivalente a ellas, y así sucesivamente, lo que permite aplicar el método de superposición con una colección de curvas patrón de dos o tres capas solamente.

d) Métodos Iterativos.- Consiste en general C.R.A. a partir de un corte hipotético del terreno. Se hacen variar los parámetros hasta que la curva generada sea

igual a la curva obtenida en el campo. Estos procedimientos se hacen más fáciles con computadoras.

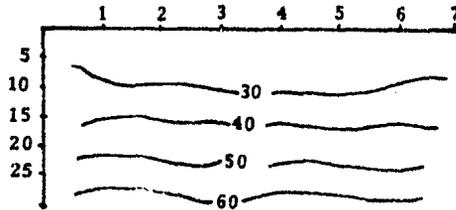
La interpretación cualitativa tiene por objeto conseguir una idea o aproximación a la estructura del subsuelo estudiado. En ésta no se determinan espesores ni resistividades en valor absoluto, sino relaciones de desigualdad, tales como zonas de profundidad máxima o mínima de algún horizonte guía, delimitación cualitativa. Se efectúa trazando mapas y cortes que representan la distribución en el espacio de alguna característica o parámetro de las curvas del SEV.

Dentro de los métodos cualitativos se pueden encontrar varios, pero sólo haré mención de los perfiles de iso-resistividad debido a que son los más adecuados al problema de las zonas minadas. Es por esto que tampoco se entró a detalle en la interpretación cuantitativa.

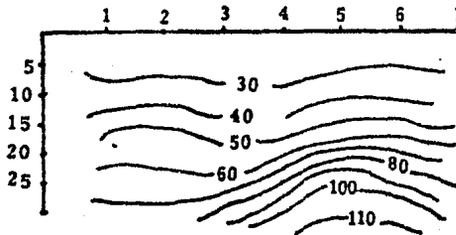
Perfil de Iso-resistividad.- Consiste en dibujar líneas de la misma resistividad aparente contra una profundidad aparente (abertura  $AB/2$ ).

Este tipo de interpretación es la que da mejor respuesta en nuestro objetivo. Al buscar oquedades, debemos esperar un aumento de la resistividad en comparación del medio circundante.

Los siguientes perfiles pueden explicar mejor la idea.



Este perfil acusa líneas iso-resistivas que pueden relacionarse con la geología estructural del lugar.



Este otro perfil además de acusar la geología estructural del lugar nos muestra una anomalía bastante marcada que puede asociarse con alguna oquedad.

Es importante remarcar que lo importante en este tipo de interpretación es el contraste de resistividad.

Hasta el momento, de todos los trabajos de SEV que he -

revisado, ninguno ha presentado algún tipo de interpretación más que perfiles de iso-resistividad.

6.- Correlación con la Geología, interpretación final y - establecimiento de las conclusiones y recomendaciones.

Una vez hechos los perfiles de iso-resistividad se prosigue a marcar las zonas que presenten anomalías. Estas - pueden ser debidas a oquedades o no, también se puede deber a algunos filones o lentes, o simplemente a un relleno.

La única manera de verificar si se trata de una oquedad es perforar en cada una de las anomalías obtenidas.

#### 4.- APLICACIONES.

En el capítulo anterior se mencionaron los principales arreglos que existen en la prospección eléctrica; en el presente capítulo explicaré sobre un dispositivo trielectródico usado en la prospección de cavernas, diseñado para este fin, llamado, B-63.

El factor geométrico de este arreglo es:

$$K = 2 \pi \cdot \left( \frac{a^2 + 4a}{4} \right) \quad \dots 28$$

donde "a" es la distancia del electrodo de corriente A al electrodo de potencial M.



Con el fin de lograr un mayor avance en campo, se colocan varios electrodos de potencial (ocho en nuestro caso) separados cada 4 metros uno del otro. Esta distancia se debe a que las dimensiones más generales de las minas están entre 2 y 4 metros. El electrodo de corriente A se va recorriendo hacia la izquierda, así como hacia la derecha hasta alcanzar una abertura de 50m, para cada posición.

La siguiente página muestra una hoja de campo utilizada para este fin.

Uno de los principales problemas del geofísico de campo es tratar de anticiparse a lo que pueda ser el problema real.

Una buena manera de lograr esto es hacer un modelado.

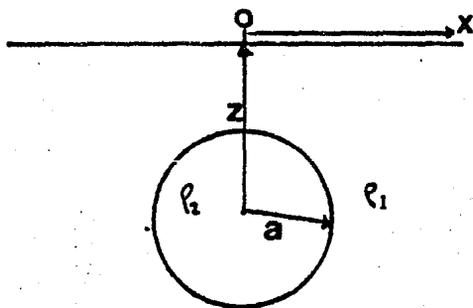
Para poder entender mejor la respuesta de una cavidad se procederá a hacer un modelo.



Un buen modelo para una mina se puede obtener de la sección de una esfera enterrada.

A esta esfera se le dará una resistividad muy alta - (puesto que se trata de aire) y el medio circundante tendrá una resistividad apegada al material de la zona.

Una ilustración para el problema sería:



donde:

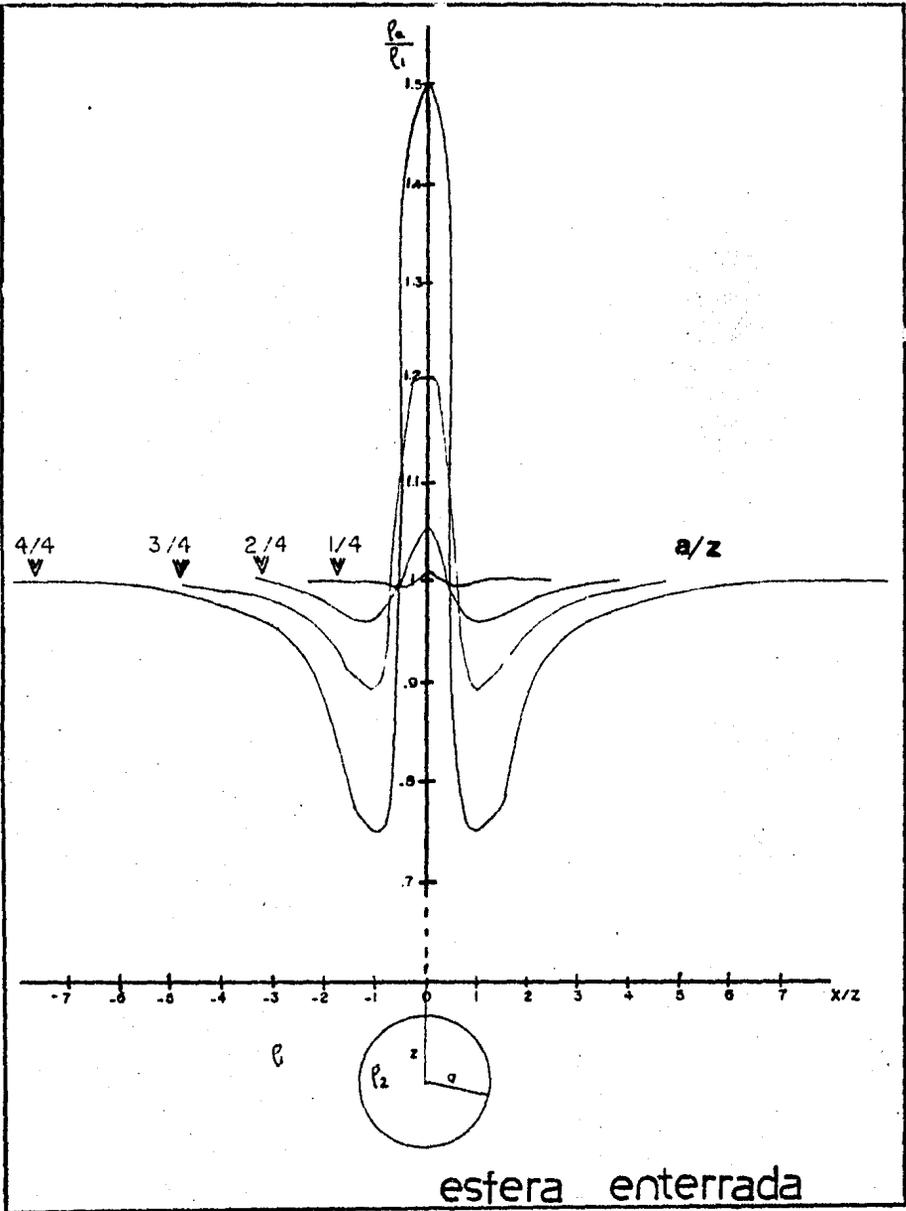
$\rho_1$  es la resistividad del medio encajonante

$\rho_2$  es la resistividad de la esfera (oquedad)

$a$  radio de la esfera

$z$  profundidad al centro de la esfera.

$x$  distancia del electrodo de potencial del punto - en la superficie hacia el origen.



Telford resuelve el problema aplicando la siguiente ecuación.

$$\rho_a = \left\{ 1 + \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \right) \left( \frac{a}{z} \right)^3 \frac{(2x^2/z^2) - 1}{(1 + x^2/z^2)^{5/2}} \right\} \dots 29$$

Al observar los resultados del modelo podemos concluir que entre más grande sea una cavidad o esté más cerca de la superficie su respuesta será mejor. También es notorio y lógico que al estar arriba de la cavidad la relación  $\rho_a/\rho_1$ , será el máximo. Otro resultado que es de esperarse es que al alejarse de la esfera (mina) la resistividad aparente tienda a la resistividad del medio encajonante, según los resultados esto pasa para  $X/Z$  mayor o igual a 5.

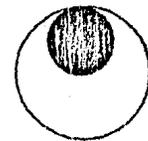
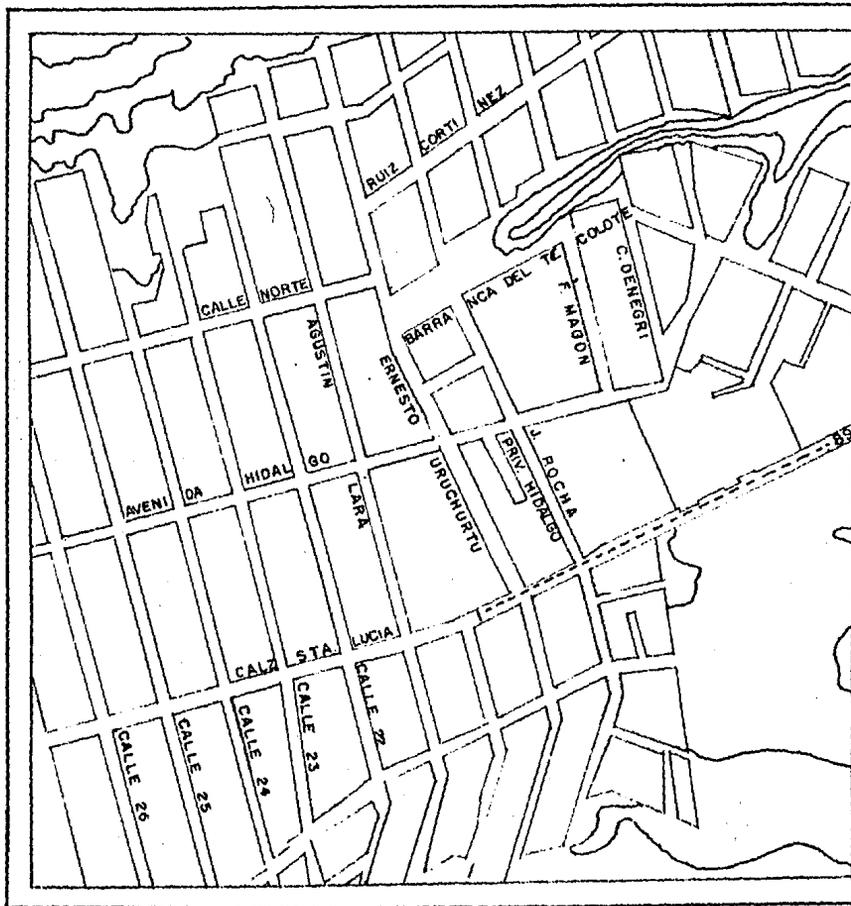
## 5.- RESULTADOS.

A continuación se presenta un estudio geoelectrico que se realizó en la Colonia Olivar del Conde en la Delegación Alvaro Obregón.

El plano 1 muestra la ubicación de la línea de sondeos sobre la Avenida Santa Lucía.

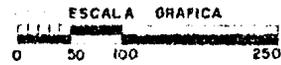
La interpretación de estos sondeos se hizo por medio de perfiles de iso-resistividades. Es recomendable configurar a escala 1:200 y a cada 10 ohms-metro puesto que se están buscando contrastes de resistividad fuertes.

Los altos contrastes de iso-resistividad se interpretan



 CURVA DE NIVEL

----- LINEA DE SONDEO



FACULTAD INGENIERIA  
 UBICACION DE SONDEOS  
 COL. OLIVAR DEL CONDE  
 ESCALA 1:5000    SEPTIEMBRE 64

como anomalías. Estas anomalías se deben de verificar por medio de un método directo o semidirecto. Las anomalías se marcaron con el signo + . La línea realizada tiene 89 sondeos espaciados 4 metros cada uno alcanzando una longitud total de 356 m. Una profundidad aparente de investigación de 30 m.

La zona investigada presenta características geoelectricas generales con resistividades medias de 50-60 ohms-m.

Hacia la parte izquierda del perfil se encuentran estos valores en la parte superficial, y hacia la parte final del perfil se encuentran estos valores en las partes profundas.

A continuación se describen cada una de las zonas de interés del perfil.

Debajo del sondeo 2 se localizan 2 anomalías. La primera es de tipo somero. Su cima se ubica a 4 m. y su cima a 10.0 m. alcanza valores de resistividad de 11.0 ohms-m. La segunda de tipo medio con una cima de 18 m. y base de 22 m; alcanza valores de resistividad de 100 ohms-m.

Debajo del sondeo 6 se encuentra una anomalía de tipo somero. Su techo se localiza a 1 m. y su base a 10 m.; alcanza valores máximos de 110 ohms-m.

Debajo del sondeo 7 se encuentra una anomalía de tipo profunda. Su cima se localiza a 28 m.; alcanza valores de 110 ohms-m.

Debajo del sondeo 10 se encuentra una anomalía de tipo somero. Su techo se localiza a 4 m. y su piso a 14 m.; - alcanza valores máximos de 120 ohms-m.

Debajo del sondeo 12 se encuentra una anomalía de tipo somera. Su parte alta está a unos 6 m. y su base a 10 m.; alcanza valores máximos de 80 ohms-m.

Debajo de los sondeos 15 y 16 se encuentra una anomalía de tipo medio. Su cima está aproximadamente a 14 m. y su base a 22 m.; alcanza valores máximos de 130 ohms.-m.

De los sondeos 17 al 21 se encuentra una zona sana.

Debajo del sondeo 22 se observan claramente 2 anomalías. La primera de tipo somero tiene un techo de 6 m. y una base de 10 m.; alcanza valores máximos de 140 ohms-m. La segunda es de tipo profundo, tiene una cima de 25 m.; alcanza - valores de 140 ohms-m.

De los sondeos 23 al 33 se observa una zona limpia de anomalías, y por lo tanto sana.

Debajo del sondeo 34 se encuentra una anomalía de carácter medio. Su cima está a 18 m. y su base a 22 m.; alcanza valores máximos de 90 ohms-m. Del sondeo 35 al 43 - hay una zona sana.

Debajo del sondeo 44 se encuentra una anomalía de carácter medio. Su cima está a 22 m. y su base a 26 m.; alcanza valores máximos de 100 ohms-m.

De los sondeos 45 a los 49 se observa una zona limpia.

Debajo del sondeo 50 se encuentra una zona anómala de tipo profunda. Su techo está a unos 26 m.; alcanza valores de 130 ohms-m.

Desde el sondeo 51 hasta el 65 se encuentra un terreno sano.

Debajo del sondeo 66 se encuentra una anomalía de tipo profunda. Su cima está a 28 m.; alcanza valores máximos - de 130 ohms-m. Esta anomalía probablemente se debe a la - influencia de la mina encontrada.

Debajo del sondeo 68 se encuentra una anomalía de tipo profunda. Su cima está a 28 m.; alcanza valores máximos de 120 ohms-m. Al verificar por un barrenos se encontró una - cavidad. Esta cavidad tenía un techo de 10 m. aproximada-

mente.

Debajo del sondeo 72 se encuentra una anomalía de tipo profunda. Su cima está a 26 m.; alcanza valores máximos de 80 ohms-m.

Debajo del sondeo 77 se encuentra una anomalía de tipo somero. Su cima está prácticamente en la superficie y su cima a 4 m.; alcanza valores máximos de 70 ohms-m.

Debajo del sondeo 80 se observa una anomalía de tipo medio. Su techo está a 22 m. y su base a 26 m.; alcanza valores de 90 ohms-m.

De los sondeos 81 al 89 se encuentra una zona libre de anomalías, por lo tanto es una zona sana.

#### CONCLUSIONES.

Mucha gente pretende que al usar algún método geofísico resolverá su problema a su necesidad, es decir que al buscar mineral se encuentran las minas del Rey Salomón, - que al prospectar para agua se le aparezca un gran acuífero o que al realizar estudios sobre hidrocarburos se tenga lo suficiente como para basar toda una economía en ellos.

Lo mismo sucede con los estudios geoeléctricos para detección de cavidades.

Lo que se obtiene de un estudio geofísico en general, - es la distribución de ciertas propiedades físicas en el subsuelo; en nuestro caso se obtiene la distribución de re-

sistividades, que al ser adecuadamente interpretadas proporcionará lo que conocemos con el nombre de anomalías.

No siempre se van a encontrar anomalías; esto indicaría una zona libre de cavidades. Pero no todas las anomalías implican una oquedad, la única manera de saber si la hay o no es verificar y esto se logra utilizando algún método semidirecto y directo.

Lo que sí es verídico es que este método proporciona una buena respuesta al problema de las zonas minadas, sin ser panacea y por supuesto es mucho más barato a una escala grande que programar barrenos por todas las colonias dañadas cada cuatro metros.

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

Abascal Cortés, J.M. (1977). Problemas y Soluciones en las Zonas Minadas del Distrito Federal, Tesis Profesional. I. P. N. México D. F.

Dobrin, M.B. (1975), Introducción a la Prospección Geofísica, Omega, Barcelona.

Koefoed, O. (1979). Geosounding Principles, 1, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

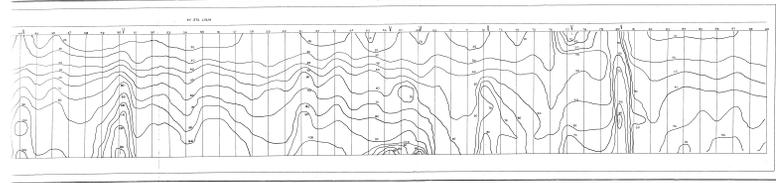
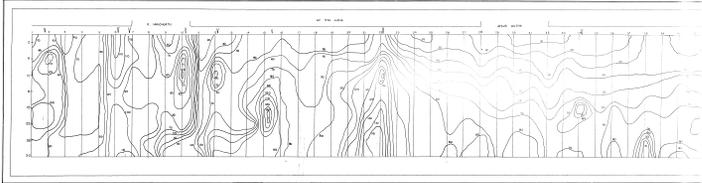
Orellana, E. (1972). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, Paraninfo, Madrid.

Reglamento para los Trabajos de Exploración y Explotación de Yacimientos de Arena. Cantera de Tepetate y Piedra en el Distrito Federal.

Publicado el 7 de abril de 1932 en el Diario Oficial.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. (1976). Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México, Simposio, México, D. F.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. (1980), Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.



SECCION

ESCALA DE HORIZONTAL: 1:500

ESCALA DE VERTICAL: 1:500

UNAM

FAC. DE INGENIERIA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO