

01131



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAPEO DE ZONAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS
ATRAVÉS DEL MÉTODO DE RESISTICIDAD. CASO PRÁCTICO:
CAMPO 10 DE POZA RICA, VERACRUZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :
HUMBERTO SAMUEL ARÉVALO LOPEZ



DIRECTOR DE TESIS:
M. EN C. AMBROSIO AQUINO LÓPEZ

MÉXICO, D.F.

ENERO DEL 2003.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

SR. HUMBERTO SAMUEL ARÉVALO LÓPEZ
Presente

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-0005

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Ambrosio Aquino López y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**MAPEO DE ZONAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS A TRAVÉS DEL
MÉTODO DE RESISTIVIDAD. CASO PRÁCTICO: CAMPO 10 DE POZA RICA,
VERACRUZ**


- I INTRODUCCIÓN**
- II MÉTODO DE RESISTIVIDAD**
- III CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO POR PRODUCTOS
PETROLEROS**
- IV ANÁLISIS DE DATOS DEL CAMPO 10 DE POZA RICA**
- V CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a 8 de enero de 2003
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Arévalo López Humberto Samuel
FECHA: 14-ene-03
FIRMA: 

GFB*RLLR*gtg


**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Agradecimientos

Le agradezco infinitamente a mis padres Humberto y Ángeles por haberme dado la vida, por todo su amor y por la carrera profesional que me dispongo concluir.

Le agradezco a mi mentor y director de tesis Doctor Vladimir Shevnin, toda la paciencia, tiempo y atención que me dedicó, no puedo expresar con palabras la admiración y respeto que le tengo. Muchas gracias.

Le agradezco al M en C. Ambrosio Aquino por su desinteresado y sincero apoyo que me brindó para la realización de esta tesis, nunca olvidando todo su esfuerzo en que mi aprendizaje fuera profesional.

Les agradezco al Doctor Martín Cárdenas, al Ing. Eduardo Amador, al Ing. Oscar Díaz, al Doctor Andrés Tejero y al Ing. Alejandro Arroyo por su apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

Les agradezco a todos mis maestros de la Facultad de Ingeniería por el conocimiento brindado, sin mayor interés que mi desarrollo personal.

Les agradezco a mis hermanos (Ángel y Paola), amigos (Roguer, Carlos, Rodrigo, Paco, Javier, Luis, Marco, Víctor, Arturo, Hugo, Jorge, Bernardo, Nahúm, Iván, Raúl, Gibrán, Edgardo, Said, Hesse, Lalo, Felipe, Antonio, Francisco, Esteban, Gerardo, Armando y tantos otros) y amigas (Abigail, Carina, Vanessa, Carmen, Iris, Laura, Miriam, Erika, Marisol, Cintya, Michiko, Liselda, Isabel, Rubí, Rosa María, Maru, Norma, Nora, Lidia, Ariadna, Adriana Bertha y muchas otras) por que si no fuera por ustedes no sería lo que soy ahora.

A todos y de todo corazón mil gracias

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi gran hija **Mariel**:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Índice

Capítulo I

Introducción

I.1 Resumen	1
I.2 Marco geológico	2
I.2.1 Lugar de estudio	3
I.2.2 Geología regional	6
I.2.3 El Campo 10 de Poza Rica	10

Capítulo II

Resistividad de las rocas

II.1.1 Conceptos básicos de electricidad	11
II.1.2 Resistividad y conductividad	12
II.1.3 Ley de Archie	15
II.1.4 Doble capa eléctrica	16
II.2 Teoría elemental del sondeo eléctrico vertical	20
II.2.1 Resistividad aparente	21
II.2.2 Sondeo Eléctrico Vertical	21
II.2.3 Arreglos geométricos	22
II.2.4 Método de las imágenes	25
II.2.5 Filtrado Lineal.	30
II.2.6 Conclusiones del apartado 2.2	33
II.3 Modelación en dos dimensiones	34
II.3.1 Programa IE2DL	34
II.3.2 Filtrado del Ruido Geológico	37
II.3.3 Perfilaje	43
II.3.4 Conclusiones del apartado 2.3	46

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo III

Contaminación del subsuelo por productos petroleros

III.1 Hidrocarburos	47
III.2 Suelo y microorganismos	48
III.3 Derrames de Hidrocarburos	49
III.4 Biorremediación	51
III.5 Conclusiones	52

Capítulo IV

Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

IV.1 Caso práctico	53
IV.2 Trabajo de campo y equipo	53
IV.3 Procesamiento	55
IV.4 Conclusión	61

Capítulo V		
	Conclusiones	62
Apéndices		
A		64
B		66
Bibliografía		70

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo I
Introducción



1.1 Resumen

En este trabajo se exponen los principios que permiten evaluar zonas contaminadas por derrames de hidrocarburos a través del método de resistividad.

La localización de la contaminación en el subsuelo se basa en la detección de alguna propiedad física que la diferencie del medio que la rodea, en este caso la resistividad. Por el que la localización no implique una labor mecánica intensiva, como podría ser excavar para encontrar la contaminación. La posibilidad de una localización basada únicamente en medidas obtenidas desde la superficie facilita la comprensión de la zona estudiada, permitiendo la planeación de algún método de remediación.

El método de resistividad consiste en introducir corriente en el suelo por medio de un par de electrodos y la medición de la diferencia de potencial en otro par de electrodos. La relación entre las dos magnitudes (de inyección y medición) proporciona una resistividad aparente que depende de la distribución de resistividad de los materiales presentes en el subsuelo, de su contenido de fluidos y de la geometría del dispositivo utilizado.

Al aumentar la distancia entre los electrodos de inyección de corriente y dejar fijos los de medición, la diferencia de potencial medida dependerá de la resistividad de materiales que se encuentran a mayor profundidad, permitiendo conocer la distribución vertical de la resistividad, procedimiento conocido como sondeo eléctrico vertical.

Existe teoría extensa sobre el método de resistividad, y su aplicación ha llegado hasta problemas ambientales, debido a la unión de diversas disciplinas (Biología, Química, etc.) se ha podido aplicar con éxito en la prospección de la contaminación por hidrocarburos en el subsuelo, que tiene características muy específicas, como son el cambio de la resistividad con el paso del tiempo.

En cualquier trabajo geofísico es necesario el máximo conocimiento de la zona de estudio; la información geológica descrita en el capítulo 1.2 muestra a Poza Rica, Veracruz como un lugar con alto potencial petrolero y debido a que las

tecnologías de extracción del petróleo implican la utilización de lubricantes en motores, bombas, camiones, etc. existe la necesidad de reciclarlo. El Campo 10 es una zona de reciclaje de aceite y está altamente propensa a la contaminación

La Geofísica está enfocada a situaciones donde las propiedades de la Tierra presentan diferencias, en el presente trabajo solamente se utilizará el método de resistividad y para esto es necesario el estudio de la resistividad de las rocas en condiciones ideales, tratado en el Capítulo 2.1.

Para aplicaciones prácticas es necesaria la teoría del método resistivo y la solución de problemas directos en modelos simplistas (1D), como es un medio horizontalmente estratificado, homogéneo e isótropo, analizado en el Capítulo 2.2.

El modelo horizontalmente estratificado es útil pero restringido. En este modelo no es considerado el ruido geológico (entendiendo por tal ruido anomalías que escapan a la resolución del método), común en zonas contaminadas, siendo necesaria su eliminación. Las posibilidades del modelado en dos dimensiones nos llevan a un método muy rápido y eficiente para estimar profundidades llamado perfilaje. Por lo anterior se estudian modelos bidimensionales en el Capítulo 2.3.

La contaminación está directamente vinculada al progreso de la humanidad; el presente estudio está enfocado a los derrames de hidrocarburos en el suelo, sus efectos, propiedades y métodos de remediación son analizados en el Capítulo 3.

La aplicación concreta del método de resistividad en un caso práctico, donde hay contaminación y alto ruido geológico está expuesto en el Capítulo 4.

1.2 Marco geológico

1.2.1 Lugar de estudio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La zona de estudio se localiza dentro del municipio de Poza Rica de Hidalgo en el Estado de Veracruz de los Estados Unidos Mexicanos (figura 1.1) con coordenadas 20°32" latitud norte del Ecuador y 97°27" longitud oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 50 metros sobre el nivel medio del mar.

Colinda al noreste y este con el municipio de Papantla; al sur con el de Coatzintla; al noroeste con el de Tihuatlán (fig. 1.2).

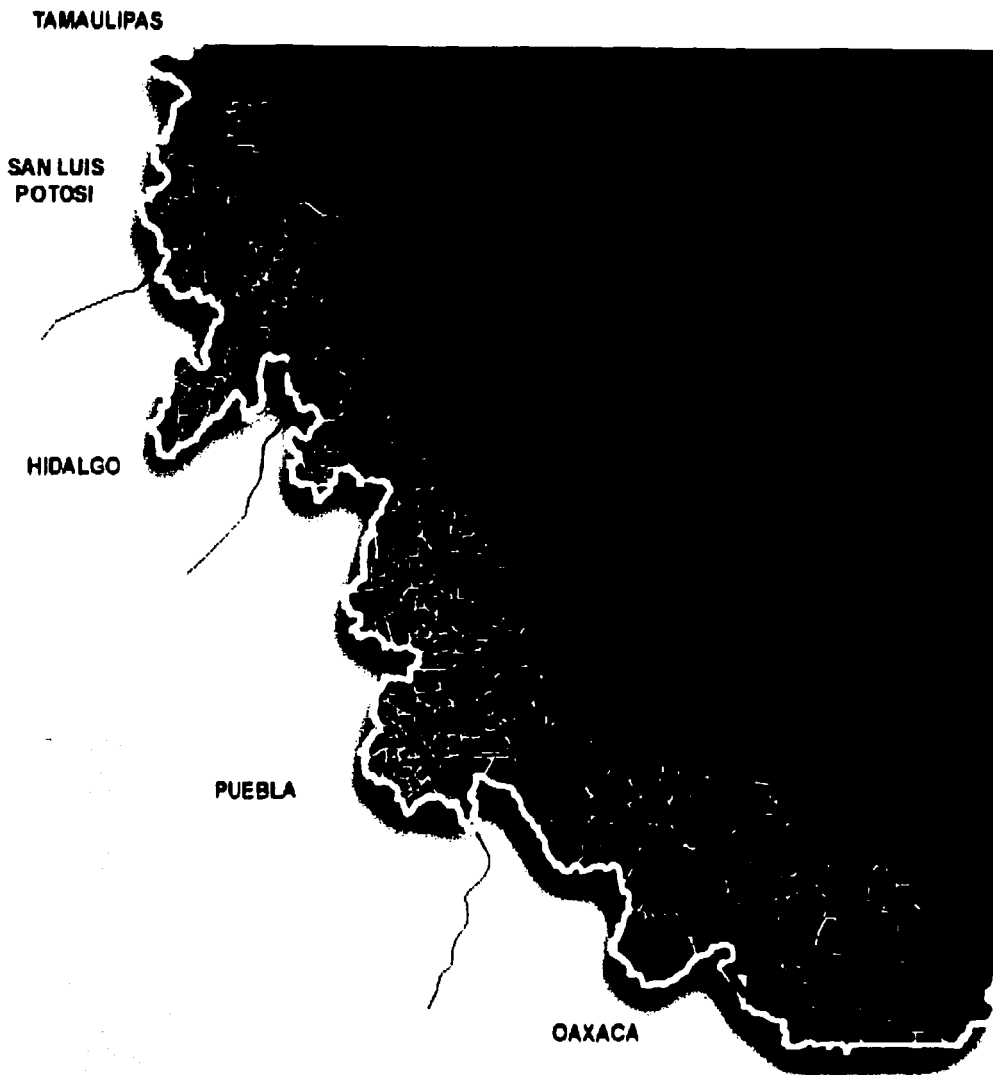


Figura 1.1
Localización del Municipio de Poza Rica en Veracruz

ESIS CON
FALLA DE ORIGEN

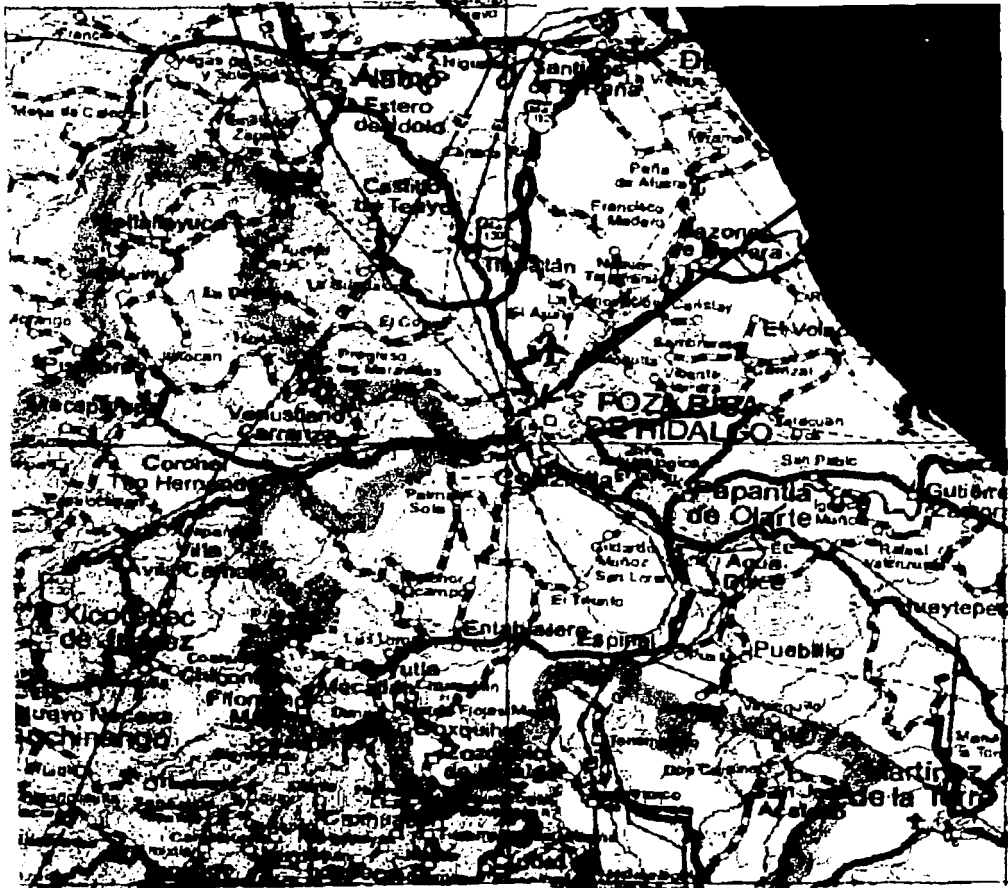


Figura 1.2
Mapa carretero de Poza Rica de Hidalgo y localización del Campo 10

La localización del Campo 10 de Poza Rica de Hidalgo (fig. 1.3) viniendo desde la ciudad de México por la carretera 130, exactamente antes de cruzar el Río Cazonés hay una desviación hacia la izquierda y en el lado derecho de tal calle está el Campo 10.

ANÁLISIS CON
FUENTE DE ORIGEN

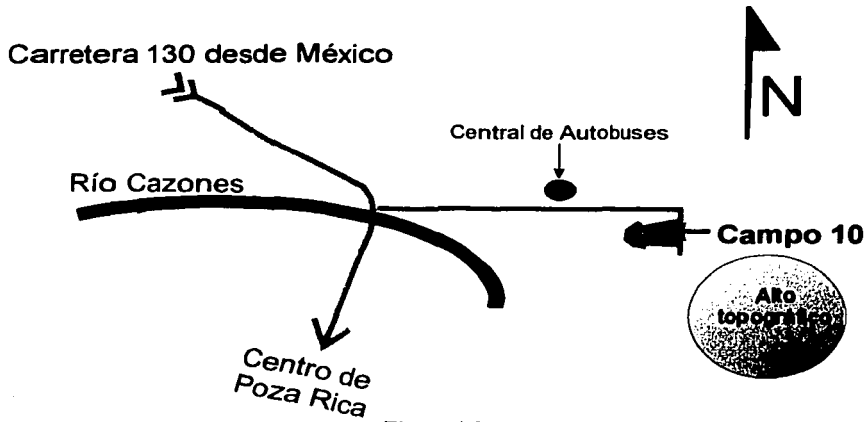


Figura 1.3
Localización del Campo 10 de Poza Rica

1.2.2 Geología regional

Poza Rica de Hidalgo se encuentra en la cuenca Tampico-Tuxpan (fig. 1.4), que abarca el norte del Estado de Veracruz y Puebla, el sur de Tamaulipas y las porciones orientales de San Luis Potosí e Hidalgo.

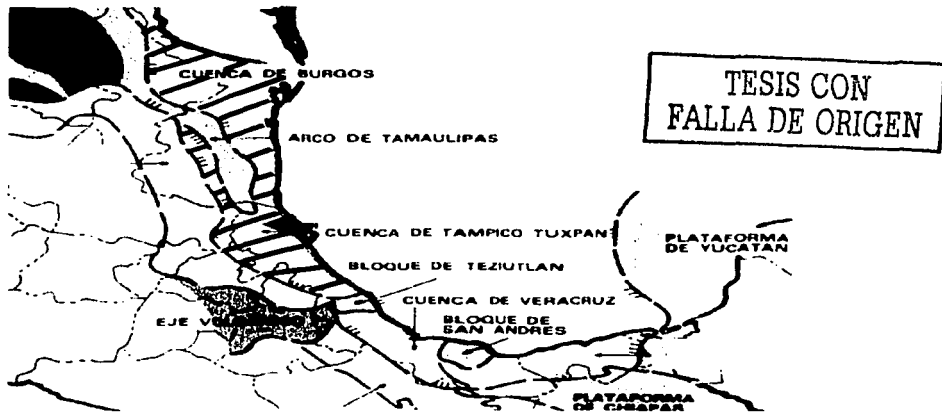


Figura 1.4
Localización de la Cuenca Tampico- Tuxpan

La cuenca Tampico-Tuxpan tiene forma de un arco semielíptico abierto hacia el Golfo de México, delimitada por el Arco de Tamaulipas y el Homoclinal Regional de San José de Las Rusias al norte, hacia el sur por el Bloque Tectónico de Teziutlán y al oeste por la Sierra Madre Oriental.

De los datos de pozos, se ha establecido que el basamento de la sección mesozoica y terciaria, está constituido por rocas ígneas y metamórficas de edad Paleozoico Tardío que sobrepasan los 4000 m de espesor.

Durante el Triásico Temprano y Medio, la región estuvo emergida, lo que favoreció el depósito de sedimentos arcillo-arenosos rojos de la formación Huizachal. En el Liásico hubo una invasión marina que provino del Océano Pacífico, dando lugar a la Cuenca de Huayacocotla constituida por lutitas y areniscas.

Al término del Jurásico Temprano, la cuenca Huayacocotla sufrió plegamientos y emersión, quedando expuesta durante el Jurásico Medio, propiciando el depósito de rocas continentales de la formación Cahuwasas.

Para el Calloviano-Oxfordiano hubo una transgresión marina desarrollando un sistema de archipiélagos en donde se depositaron rocas de alta energía (oolitas y calcarenitas) durante el Kimeridgiano, correspondientes a la formación San Andrés.

Al iniciarse el Cretácico, el clima es adecuado para la generación de núcleos arrecifales sobre las márgenes de las plataformas, que corresponden con el Atolón de la Faja de Oro (trampa petrolífera, fig. 1.5) y el complejo arrecifal que bordea la Plataforma de Valles; en las porciones más profundas, se depositaron calizas con pedernal, correspondientes a la formación Tamaulipas Inferior.

Durante el Cretácico Medio, los ambientes de depósito cambiaron un poco, dando lugar a un mayor volumen de calizas clásticas de talúd, que fueron dolomitizadas y dieron origen a la formación Tamabra (fig. 1.6).

En el Cretácico Tardío (UK en fig. 1.6) hubo un cambio brusco en los ambientes de depósito, el cual dió origen a formaciones calcáreo-arcillosas de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez. Al final del Cretácico inició la fase orogénica Laramídica que ocasiona el levantamiento de la Sierra Madre Oriental.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. Introducción

En el Paleoceno, al principiar los levantamientos de la Sierra Madre Oriental, se origina la Cuenca Tampico-Tuxpan que fue afectada en su margen occidental por una depresión, denominada antefosa de Chicontepec (almacenadora de aceite), en donde se depositaron sedimentos arcillo-arenosos de tipo turbidítico, correspondiente a las formaciones Chicontepec Inferior y Chicontepec Medio. Simultáneamente en la parte noroeste de la Cuenca, se desarrolló la subcuenca de Magiscatzin, rellena por sedimentos arcillo-arenosos y arcillosos de la formación Velasco.

Durante el Eoceno Temprano se mantuvieron las condiciones de depósito, representándose por facies arenosa de "Flish" (Chicontepec Superior) y una arcillosa (Velasco Superior). Al poniente del Atolón de la Faja de Oro, se desarrolló el Paleocanal de Chicontepec, relleno por sedimentos arcillo-arenosos de tipo turbidítico.

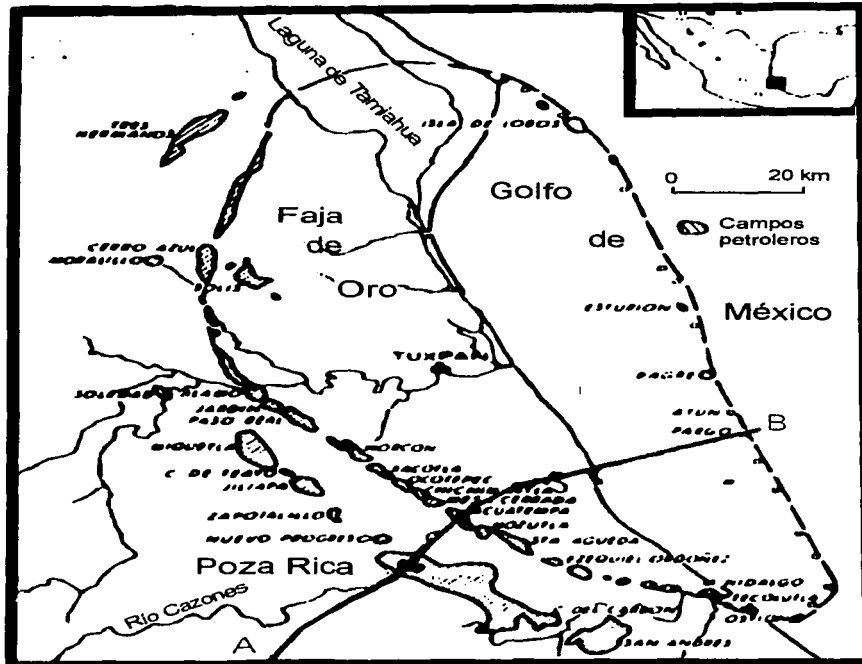


Figura 1.5
Región Veracruzana donde se encuentra el Campo 10 de Poza Rica

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. Introducción

El Eoceno Tardío presenta dos facies, una arenosa conglomerática de origen deltaico, conocida como Formación Tantoyuca, y otra arcillosa de aguas profundas de la formación Chapopote.

Para el Oligoceno y Mioceno la Cuenca fue sometida a transgresiones y regresiones, favoreciendo el depósito de sedimentos areno-arcillosos y a veces conglomeráticos como las Formaciones Palma Real Inferior, Palma Real Superior y Tuxpan; al finalizar este sistema, se presentó una regresión que tiene como límite la actual línea de costa.

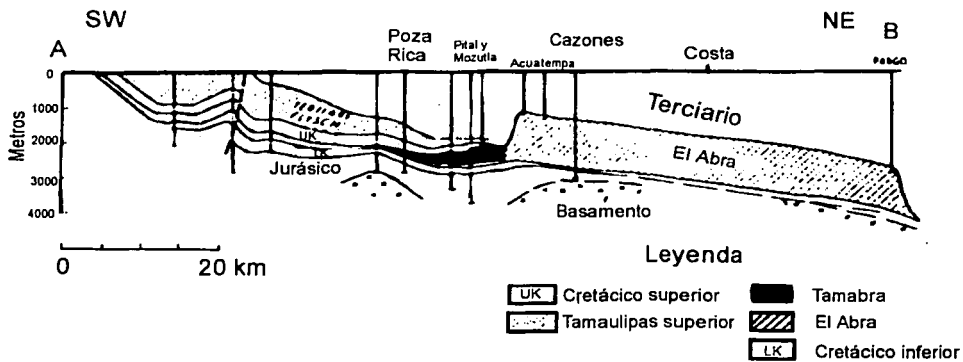


Figura 1.6
Corte geológico de la zona de Poza Rica, Veracruz

El hecho de que la Cuenca Tampico-Tuxpan esté expuesta al ciclo hidrológico, donde hay evaporación de los líquidos, condensación y precipitación de los mismos es evidente la meteorización y erosión del terreno (fig. 1.7) durante $\pm 1,600,000$ años, lleva a concluir que la geología superficial donde actualmente está el Campo 10 de Poza Rica es constituida por materiales acarreados, como son arcillas, arenas y gravas depositadas en el Cuaternario.

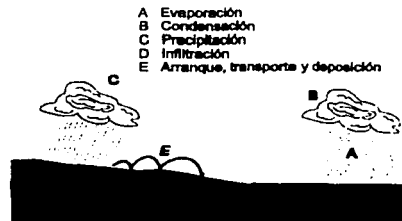


Figura 1.7
Esquema del Ciclo Hidrológico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2.3 El Campo 10 de Poza Rica

El Campo 10 de Poza Rica (fig. 1.8) es una zona en la que se deposita el aceite quemado de los camiones de PEMEX, para convertirlo en sólido e incendiar las partes volátiles del hidrocarburo.



Figura 1.8
Campo 10 de Poza Rica, Veracruz

El aceite ya inservible es depositado en dos tanques de contención, que están conectados con tres quemadores de sustancias volátiles a través de ductos en el subsuelo, en este momento se hayan activos un tanque y un quemador (fig. 1.9); en la zona de donde se encuentra el otro tanque y los otros dos quemadores, se han aplicado métodos de remediación en la zona del antiguo tanque.

Alrededor de la zona del tanque de descarga, se puede ver la contaminación en la superficie, siendo imperativa su delimitación y remediación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

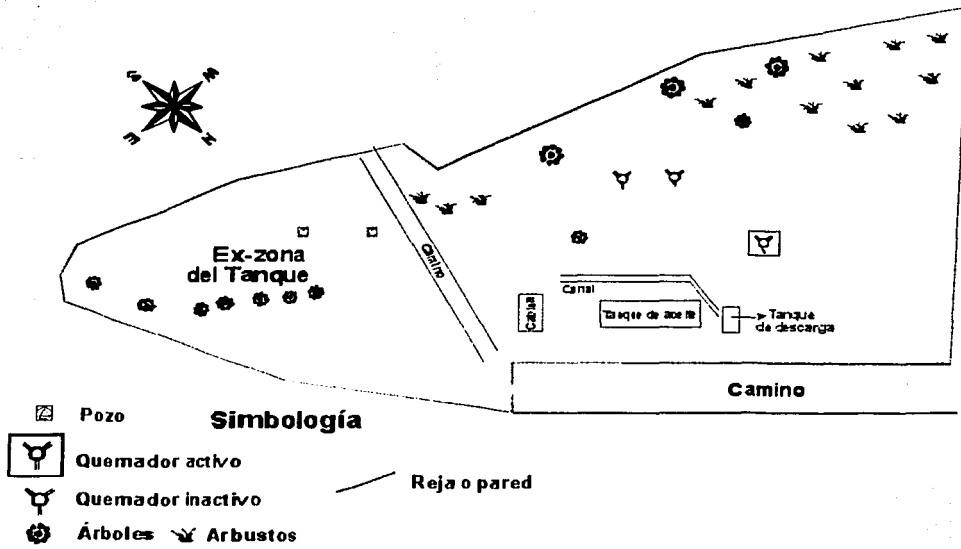


Figura 1.9
Esquema del Campo 10 de Poza Rica de Hidalgo Veracruz

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo II

Resistividad de las rocas

II.1.1 Conceptos básicos de electricidad

La base de la electricidad se remonta hasta Tales de Mileto (800 a. C.) cuando descubrió que frotando el ámbar (en griego ἤλεκτρον) con un pedazo de piel podía atraer pedacitos de paja, a la causa de estas atracciones se les llama electricidad, desde Gilbert & Boyle (s. XVII) y se dice que el cuerpo frotado se halla electrizado.

Al considerar la acción entre dos cuerpos electrizados muy pequeños, en 1785 Coulomb formuló una ley importante al descubrir que las dos fuerzas de atracción o repulsión de cada cuerpo electrizado son iguales y cada una de ellas varía en razón inversa del cuadrado de la distancia entre los dos cuerpos.

Cuando un cuerpo tiene exceso de electrones libres en sus átomos y otro cuerpo carece de ellos, llamado diferencia de potencial, hay una tendencia en la dirección de los electrones libres a desplazarse hacia el cuerpo con carencia, que es lo que se conoce como corriente eléctrica.

La diferencia de potencial puede obtenerse de varias formas: frotamiento, acción química, magnetismo, luz, calor o presión; generando voltaje entre dos puntos¹. La intensidad de la corriente, es la cantidad de electrones que pasan por segundo en un conductor². La naturaleza del conductor ofrece una resistencia que afecta el paso de la corriente³.

Las rocas y sus fluidos presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica, y es posible asociar tal resistencia con el tipo de roca; si se hace circular una corriente con intensidad conocida y en otro lugar se mide la diferencia de potencial que produce la corriente, se puede calcular la resistividad de la roca cuando la geometría es conocida.

¹ El volt es la fuerza que causa la corriente eléctrica con intensidad de un ampere a través de la resistencia de un ohm.

² El ampere es la intensidad de corriente eléctrica que con la diferencia de potencial de un volt, fluye por un conductor que tiene la resistencia de un ohm.

³ El ohm es la resistencia de un conductor que con una diferencia de potencial de un volt deja pasar una corriente de un ampere.

II.1.2 Resistividad y conductividad

Teóricamente se puede estimar la resistividad de cualquier volumen pero es simple para el caso de un cubo, la representación esquemática de un cuerpo de roca al que le hacemos pasar una corriente y medimos la diferencia de potencial entre las caras perpendiculares está en la figura 2.1.

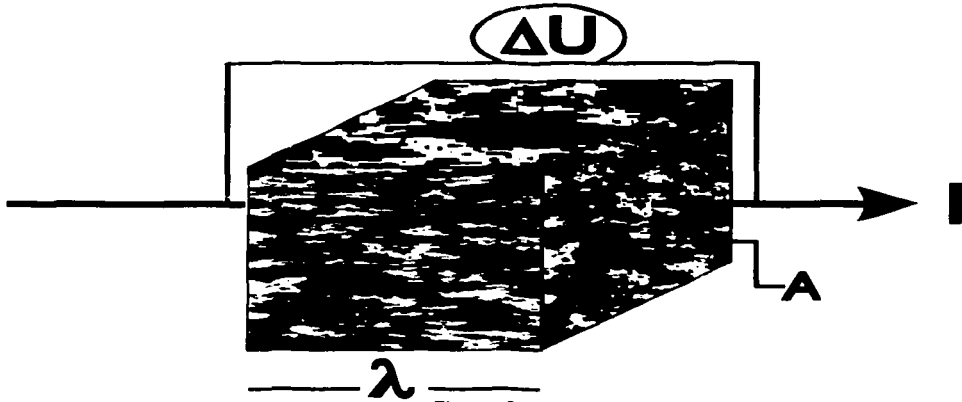


Figura 2.1

Cubo de lado λ , área A , al que se le aplica una corriente I y se mide la diferencia de potencial ΔU .

Partiendo de la ley de Ohm se define la resistividad por unidad de volumen, como la intensidad del campo eléctrico E dividido por la densidad de corriente eléctrica j :

$$\rho = \frac{E}{j}$$

No es posible medir ni E ni j pero sabemos que existen las siguientes equivalencias:

$$E = \frac{\Delta U}{\lambda}$$

y

$$j = \frac{I}{A}$$

TESTEO CON
FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

Donde ΔU es la diferencia de potencial, λ es la longitud de la unidad de volumen, I la intensidad y A es el área de la unidad de volumen.

De acuerdo a lo anterior la resistividad de un cubo cuya longitud sea λ y su sección transversal de área sea A , es:

$$\rho = \frac{\Delta U \cdot A}{\lambda \cdot I}$$

Donde ρ es la resistividad, que es una propiedad característica del material conductor. En el Sistema Internacional sus unidades son ohmio x metro [$\Omega \cdot m$].

Definiendo la resistividad de una sustancia como su capacidad para impedir la circulación de una corriente eléctrica a través de ella, a la facilidad de paso se le denomina conductividad, que expresada en términos de la resistividad es:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Las unidades en el Sistema Internacional de la conductividad, es el siemens [S].

Se denominan a los cuerpos que permiten el paso de la corriente eléctrica, cuerpos eléctricamente conductores, esto se explica porque tienen portadores de carga eléctrica que pueden ser de dos tipos: electrónicos (metales y semiconductores) e iónicos (electrolitos sólidos o dieléctricos y electrolitos líquidos).

La conductividad de los metales se presenta cuando los electrones de valencia tienen movilidad en la red cristalina, sin atravesar ninguna. La facilidad de este movimiento nos obligaría a creer que la conductividad es infinita en un metal en que sus átomos no se mueven y su red es regular, entonces la temperatura, impurezas y defectos en la estructura harán decrecer la conductividad. La resistividad de los metales a temperatura ambiente varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega \cdot m$, entre ellos están: oro, plata, cobre, estaño, níquel, platino, hierro, aluminio, etc.

Los minerales semiconductores deben su resistividad al alto grado de impurezas y a diferencia de los metales, su conductividad aumenta con la temperatura. Por esto, la resistividad de un mineral puede variar dentro de ciertos

II. Resistividad de las rocas

límites. En general los telurios y los arseniuros son conductores muy buenos, los sulfuros también con excepción de la blenda y el cinabrio, los óxidos y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, con excepción de la magnetita.

Los dieléctricos tienen un arreglo en el que los electrones están fuertemente ligados a los átomos, debido a enlaces covalentes o iónicos (electrolitos sólidos). La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo, presentando resistividades muy altas del orden de $10^7 \Omega \cdot m$. Algunos dieléctricos son: el petróleo, micas, cuarzo, azufre, cinabrio, calcita etc.

El paso de una corriente eléctrica en una solución iónica es un evento más complejo que el paso de corriente en un metal. En el metal, los electrones llevan la corriente. En una solución iónica la corriente es llevada por grandes cantidades de iones positivos y negativos. Consecuentemente, el paso de una corriente está acompañada por el transporte de materia (Darmois G., 1962).

Las rocas son estructuras con tres componentes: sólido, líquido y gas. Los principales minerales de las rocas (cuarzo, mica, feldespato, calcita, etc.) son dieléctricos, también el gas es dieléctrico y por lo tanto la resistividad depende del contenido líquido, en la mayoría de los casos.

II.1.3 Ley de Archie

El primero en idealizar las rocas como medios de matriz aislante, donde la conducción sólo se efectúa a través de canales irregulares que unen los poros, rellenos de electrolito, a los cuales se debe la conductividad del conjunto fue Archie, dando origen a lo que se conoce como Ley de Archie donde la conductividad de la roca depende solamente de su porosidad y la conductividad del líquido en los poros (Orellana E., 1982)

Para el estudio de la resistividad de las rocas, la tortuosidad T se define como la relación entre la longitud media de los poros dividido por la longitud de la roca, que variará de 1.3 a 2 para medios sedimentarios. La porosidad P se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen de la roca; estas definiciones relacionadas con la resistividad del agua en los poros quedaría:

$$\rho_{roca} = \frac{T^2}{P} = F \cdot \rho_{agua}$$

Donde F es el factor de formación y depende de la textura de la roca a que oscila entre 0.5 y 1.5 para medios sedimentarios, el factor de cementación m varía entre 1.3 y 2.3 para el mismo tipo de medio, la fórmula que define esto es:

$$F = \frac{a}{P^m}$$

Los resultados anteriores fueron experimentales, pero se refieren a formaciones "limpias" esto significa que no contiene una cantidad de arcilla perceptible, por lo que la resistividad de la formación es proporcional a la resistividad de la solución salina en el terreno.

II.1.4 Doble capa eléctrica

En el contacto entre las partículas de arcilla y los fluidos que rellenan los poros de la roca tiene lugar un fenómeno conocido como doble capa eléctrica, que propiciará el aumento de la conductividad.

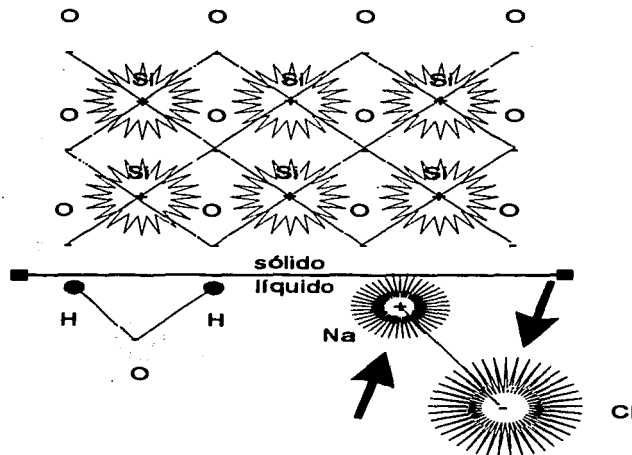


Figura 2.2
Fenómenos de la doble capa eléctrica, atracción del átomo de sodio, de una molécula de cloruro de sodio.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

En la interfase sólido-líquido (fig. 2.2), debido a las cargas electroestáticas externas que hay en el mineral, se forma una doble capa eléctrica que acomoda las moléculas iónicas asociadas a las sales con respecto a las cargas del sólido y permite un flujo de electrones más fácil que se refleja en un descenso en la resistividad.

Para el estudio de ésta propiedad se obtendrán mediciones sintéticas utilizando el programa "Petrophysics" (Rylov A., 2000) que consiste básicamente en:

- 1º Cálculo de la resistividad del agua con diferentes sales o ácidos tales como: HCl, KCl, NaCl, MgCO₃, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaSO₄, etc.
- 2º Cálculo del efecto en la medición de potencial de la doble capa eléctrica, que depende de la capacidad de intercambio iónico, siendo máxima para la arcilla.
- 3º Cálculo de la resistividad de las rocas, dependiendo de su porosidad, radio de los poros, humedad, etc.

Los resultados presentados a continuación fueron tomados de este programa y consisten en mediciones de resistividad contra concentración de la sal disuelta en el agua que contiene la roca.

Para el caso de CaHCO₃ variando de arenas al 100% hasta arcillas al 100% en ejes coordenados de resistividad contra el contenido de la sal (fig. 2.3).

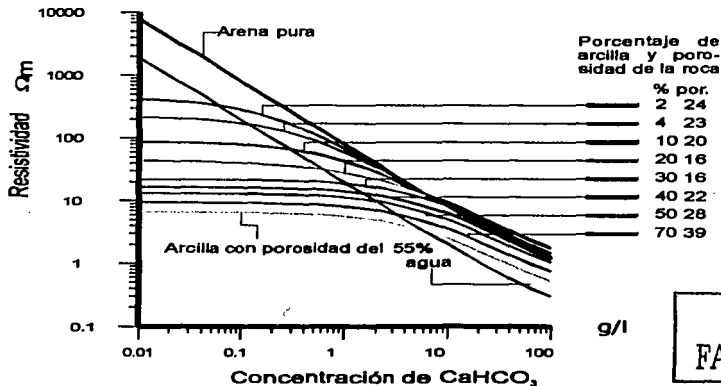
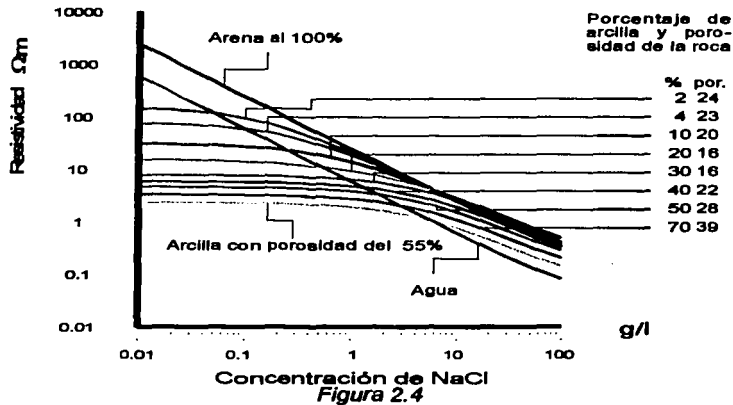


Figura 2.3
Cambios en la resistividad de arenas hasta arcillas, contra la concentración del carbonato de calcio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

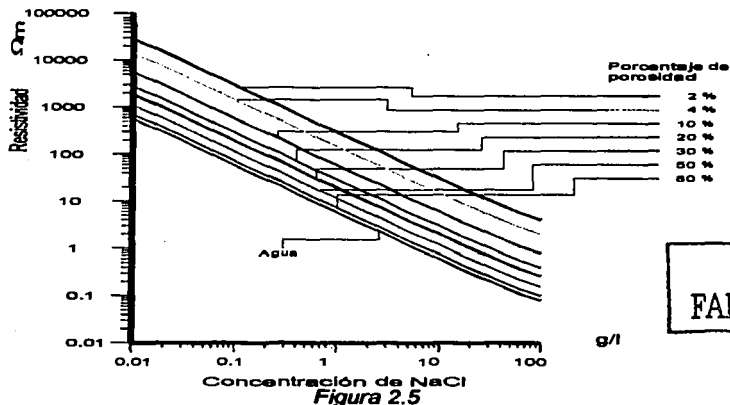
II. Resistividad de las rocas

Ahora comparando el mismo tipo de gráfica para una sal diferente, en éste caso NaCl, tenemos que el mismo patrón se reproduce (fig. 2.4).



Cambios en la resistividad de arenas hasta arcillas, contra la concentración del cloruro de sodio

En las gráficas tenemos que la resistividad para la arena y el agua se comportan de manera paralela conforme aumenta la concentración de sales, con las diferencias para cada tipo de sal; para el caso cuando la concentración es baja y hay contenido de arcillas se produce el fenómeno de la doble capa eléctrica que hace disminuir la resistividad hasta que comienza a aumentar la concentración, se recupera el nivel que debería esperarse. Hay casos en que este fenómeno no se presenta, por ejemplo, para rocas ígneas con concentraciones de NaCl (fig. 2.5).



Cambios en la resistividad de lava con distintas porosidades, contra la concentración de cloruro de sodio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

En este caso la resistividad cambia linealmente para la variación en la concentración, debido a que el fenómeno de la doble capa eléctrica se intensifica en los primeros 100 Å, los poros que hay entre las arenas y las rocas ígneas es mayor a esta distancia, cosa que no se cumple para las arcillas cuyo diámetro está entre 1000 Å y 100 Å.

El agua pura (destilada) tiene resistividad del orden de $10^5 \Omega\cdot m$, sin embargo, en la naturaleza la encontramos con sales disueltas, generalmente NaCl, dando resistividades de entre 5 y 100 $\Omega\cdot m$ en los lagos y arroyos, en cambio las aguas subterráneas varían de 1 a 20 $\Omega\cdot m$, las aguas marinas tienen una resistividad promedio de 0.35 $\Omega\cdot m$.

La resistividad de las rocas no depende únicamente de los materiales constituyentes sino de la proporción que tienen de poros, generalmente ocupados por electrolitos que provoca un comportamiento de conducción iónica, provocando una resistividad muy variable. Entonces la resistividad de las rocas va a variar en función de la distribución de los poros, el contenido de agua y la salinidad de ésta. La figura 2.6 representa los márgenes comunes de variación de resistividad.

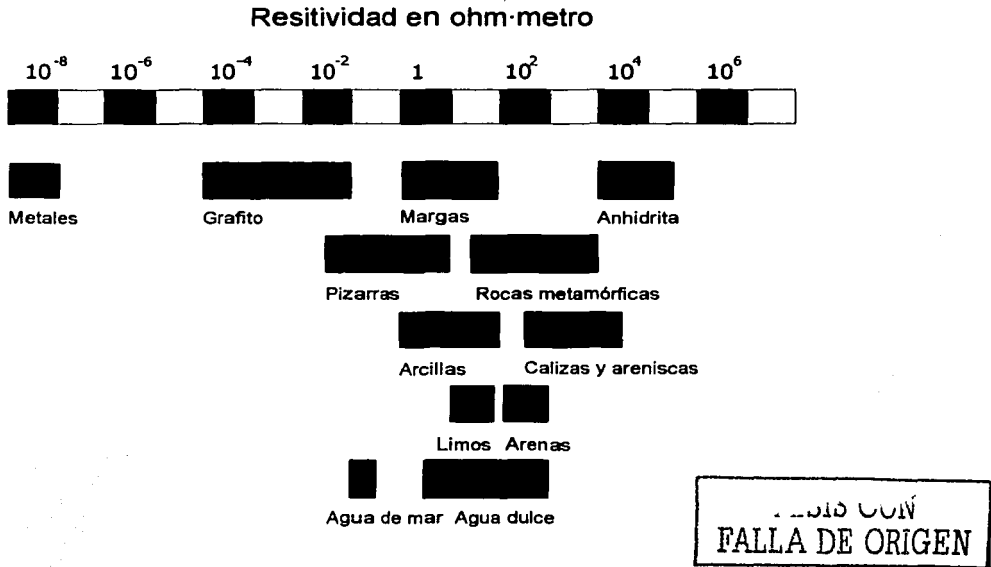


Figura 2.6
Rango de resistividad de varios minerales y rocas. (Orellana E., 1982)

II. Resistividad de las rocas

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y materiales orgánicos e inorgánicos. La resistividad del suelo va a depender de su composición y por ser una mezcla también de la temperatura, la humedad, presión, etc. que provocan cambios de resistividad con respecto al tiempo para un mismo suelo.

De todos los factores que alteran la resistividad, la humedad es el más importante. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno propician la generación de ruido o resistividades desiguales, lo que llevaría a dificultades en la interpretación.

II.2 Teoría elemental del sondeo eléctrico vertical

II.2.1 Resistividad aparente

La medición de la resistividad a través de sondeos eléctricos fue aplicada por primera vez por Conrad Schlumberger en el verano de 1912 (Kunetz G., 1966).

El método de resistividad consiste en determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo. Se lleva a cabo sobre la superficie de la Tierra, inyectando corriente a través de 2 electrodos de corriente enterrados en el suelo y midiendo el voltaje entre otros dos electrodos de potencial (fig. 2.7).

Obteniendo los datos de la intensidad de la corriente inyectada (regulada en el generador) y los datos de voltaje (diferencia de potencial entre los electrodos de potencial) se puede calcular:

$$\rho_a = K \frac{V}{I}$$

Donde el V es el voltaje medido, I es la intensidad de la corriente y K es el factor geométrico que depende de las posiciones relativas entre los electrodos utilizados (arreglo).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La ρ_a es la resistividad aparente que debe ser igual a la resistividad real si el medio fuese homogéneo. Ya que en la realidad hay medios heterogéneos la resistividad calculada debe ser interpretada; la relación entre ambas es muy compleja y dependiente de cada tipo de arreglo.

II.2.2 Sondeo Eléctrico Vertical

El sondeo eléctrico vertical (SEV) es útil para averiguar la distribución de las resistividades aparentes, de capas horizontales en un subsuelo estratificado, a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie.

Prácticamente el SEV consiste en aumentar progresivamente la distancia entre los electrodos de inyección de corriente, manteniendo un punto central fijo.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica dependerá de la separación entre los electrodos de inyección de electricidad y la profundidad de investigación de acuerdo a la práctica puede variar dentro del siguiente rango:

$$\text{Profundidad} \approx \text{desde } \frac{AB}{3} \text{ hasta } \frac{AB}{10}$$

Para un medio estratificado de varias capas, en donde cada una de ellas es homogénea e isotrópica es posible hacer cálculos de la resistividad aparente que serían obtenidos en superficie a través del método de las imágenes y el filtrado lineal.

II.2.3 Arreglos geométricos

Con el objeto de escoger el arreglo óptimo para realizar la investigación del subsuelo se analizan algunos de los diversos arreglos geométricos a continuación, donde las letras **A** y **B** representan los electrodos donde se realizan las mediciones y las letras **M** y **N** representan los electrodos de inyección de corriente.

a) Dispositivo Polo-polo o Potencial

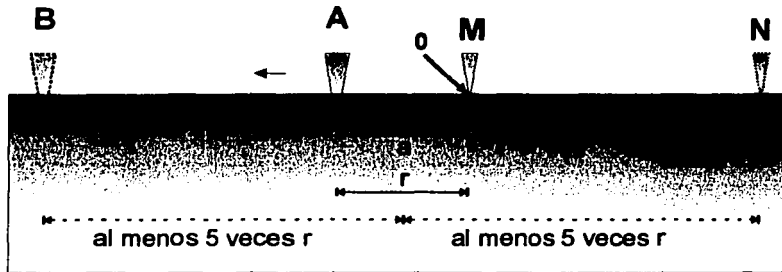


Figura 2.7

Geometría del arreglo Potencial, el O es el punto de asignación, a es la distancia entre el electrodo de potencial M y el electrodo de corriente A .

En el arreglo Polo-polo o Potencial es necesario que tanto un electrodo de corriente como uno de potencial estén al menos 5 veces la distancia r , que es la separación entre el centro de asignación y el electrodo de corriente; el centro de asignación es elegido sobre el electrodo M con el objeto de facilitar el posicionamiento y el reconocimiento posterior de los datos (fig. 2.7).

b) Dispositivo Wenner

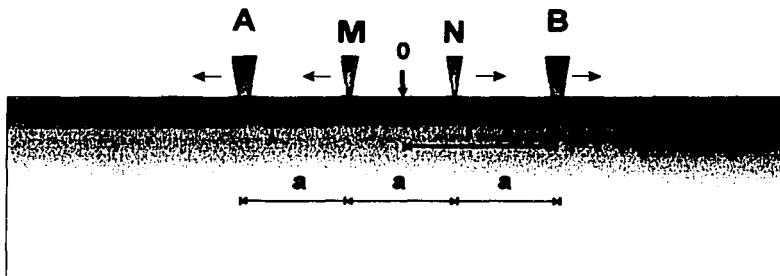


Figura 2.8

Geometría del arreglo Wenner, el O indica el punto de asignación del sondeo, a permanece constante.

Donde la distancia interelectrónica es a , cuando se mueven los electrodos la distancia a cambia para los 4 electrodos (fig. 2.8).

c) Dispositivo Schlumberger

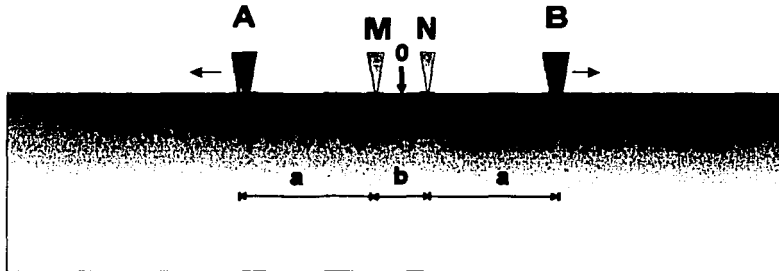


Figura 2.9

Geometría del arreglo Schlumberger, b permanece fijo y solamente a varía, el O es el punto de asignación.

Donde el centro de atribución es O , la distancia b permanece constante durante el aumento de la distancia a , aunque dependiendo de la resolución del voltímetro habrá que aumentar la distancia b , proceso denominado empalme (fig. 2.9).

d) Dispositivo Dipolo-Dipolo axial

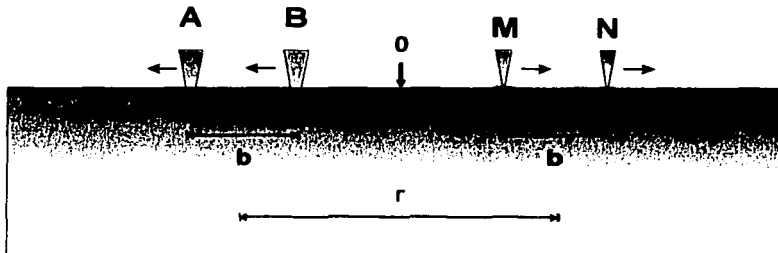


Figura 2.10

Geometría del arreglo Doble Dipolo, b permanece fijo cuando varía r , el O es el punto de asignación.

Donde la distancia entre los electrodos del mismo tipo será b y la distancia entre los dos tipos de pares de electrodos será r (fig. 2.10).

e) Dispositivo Polo-Dipolo

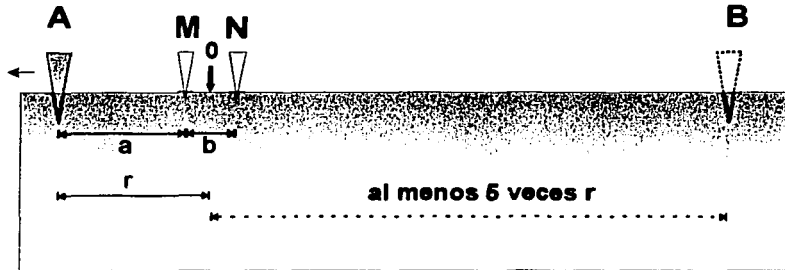


Figura 2.11
Geometría del arreglo Polo-Dipolo, a va aumentando y el electrodo de corriente B debe estar al menos 5 veces r alejado del centro.

Donde la distancia entre B y el centro de asignación debe ser al menos cinco veces la distancia r , que es la distancia entre A y el centro de asignación O (fig. 2.11).

f) Dispositivo Lineal.

La realización práctica de este dispositivo es difícil ya que requiere que la inyección de corriente sea a través de cables en contacto con el suelo con muchos electrodos en una distancia grande, pero su utilidad radica en la modelación de 2 dimensiones.

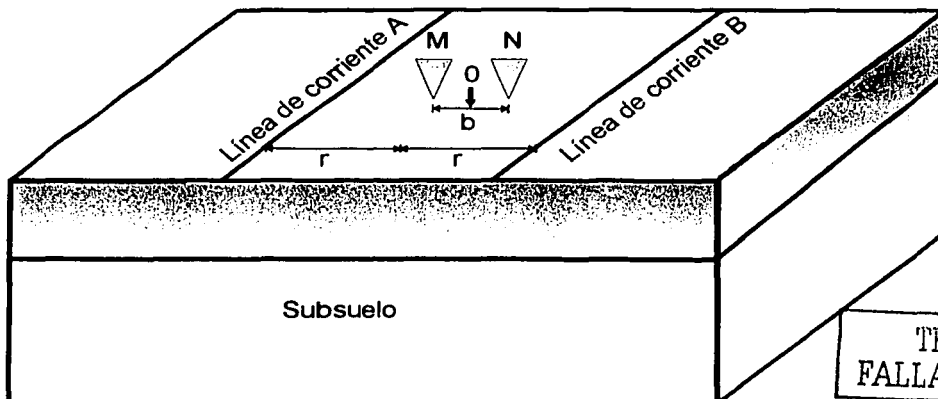


Figura 2.12
Geometría del arreglo Lineal, el O corresponde al punto de asignación, A y B son líneas de corriente con muchos electrodos conectados al suelo.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

El dispositivo Lineal implica que las líneas **A** y **B** estén en contacto con todo el terreno, siendo $2r$ la distancia entre éstas, el **O** es el punto de asignación y la distancia b corresponde a la distancia entre los electrodos **M** y **N** (fig. 2.12).

El dispositivo que ofrece mayor velocidad al instalarlo en un terreno es el Polo-Polo ya que se alejan uno de los electrodos de potencial y uno de medición una distancia mayor a 5 veces la distancia entre los otros dos electrodos y ya no se mueven, pero habrá que analizar la respuesta del subsuelo para cada uno de los arreglos para escoger entre ellos.

II.2.4 Método de las imágenes

A través del método de las imágenes es posible obtener los valores de ρ_a que se obtendrían en un medio de dos capas horizontalmente estratificadas, homogéneas e isotópicas; tomando en cuenta los coeficientes de reflexión entre los diferentes medios y suponiendo fuentes secundarias a parte de la fuente primaria.

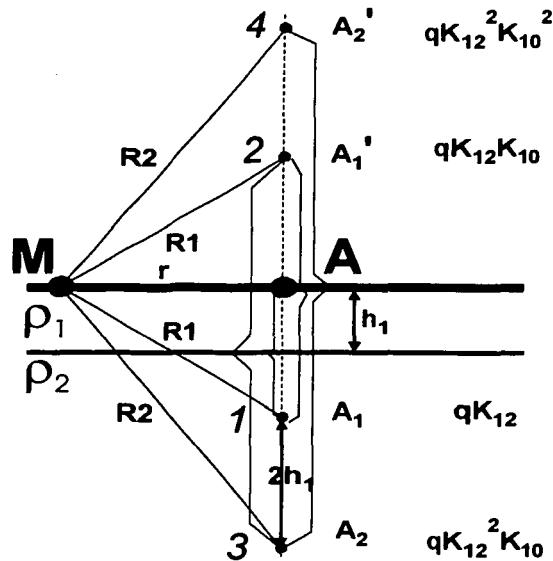


Figura 2.13

Método de las imágenes. Se calcula ρ_a en función de **A**, **A**₁, **A**₁', **A**₂, **A**₂', etc.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El coeficiente de reflexión K entre dos medios de distinta resistividad se define como:

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Para encontrar el valor de ρ_a para la separación r (fig. 2.13) hay que calcular el potencial total definido como:

$$U_{total} = U^0 + U^A$$

U^0 se define como:

$$U^0 = \frac{\rho_1 * J}{2 * \pi * r}$$

Donde J es la corriente en la fuente primaria A , ρ_1 es la resistividad real del subsuelo en la capa más cercana a la superficie y r es la distancia entre la fuente A y el electrodo de medición M .

Para calcular el potencial total medido en M se consideran múltiples fuentes secundarias que son producto de la reflexión de la energía inyectada en A , esta operación requiere de cálculos iterativos.

Para calcular J_1 que es la corriente en la fuente imaginaria A_1 se supone una reflexión entre ρ_1 y ρ_2 , con K_{12} como coeficiente de reflexión y se multiplica por J ; para calcular J'_1 en la fuente A'_1 , se supone una reflexión entre el suelo y el aire, con un coeficiente de reflexión igual a K_{10} multiplicado por J_1 , dando por resultado $J''_1 = J \cdot K_{12} \cdot K_{10}$; para calcular J_2 en la fuente A_2 se considera la reflexión entre ρ_1 y ρ_2 , quedando $J_2 = J'_1 \cdot K_{12}$; para calcular J'_2 en la fuente imaginaria A'_2 se considera la reflexión entre el suelo y el aire K_{10} quedando $J''_2 = J_2 \cdot K_{12}$ que desarrollando para tenerla en términos de J es: $J''_2 = J \cdot K_{12}^2 \cdot K_{10}^2$, de donde es obvio que $K_{10}^n = (-1)^n$ y también que seguirá el proceso en un número infinito de fuentes imaginarias, para calcularlo será necesario programar un algoritmo que realice tales operaciones, que son diferentes para cada sondeo, como se ve en las fórmulas que siguen.

Para el arreglo geométrico tipo Potencial la fórmula para calcular la resistividad aparente a través del método de las imágenes en la superficie es:

$$\rho_{aU} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r}{\left[r^2 + (2nh_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

La parte inferior de la fórmula es la hipotenusa entre r y h, que corresponde a la fuente imaginaria.

Para el arreglo geométrico tipo Schlumberger la fórmula es:

$$\rho_{aS} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^3}{\left[r^2 + (2nh_1)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

Para el arreglo geométrico tipo Wenner la fórmula es:

$$\rho_{aW} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \cdot \frac{2r}{3} \cdot \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{2r}{3} \right)^2 + (2nh_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\left[\left(\frac{4r}{3} \right)^2 + (2nh_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}$$

Para el arreglo geométrico tipo Dipolo axial la fórmula es:

$$\rho_{aD} = \rho_1 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^3 \cdot [2r^2 - (2nh_1)^2]}{\left[r^2 + (2nh_1)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \right\}$$

Para el arreglo geométrico tipo Lineal la fórmula es:

$$\rho_{al} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^2}{r^2 + (2nh_1)^2} \right\}$$

La ayuda de las computadoras en el problema de construcción de curvas de resistividad aparente es ahora de común uso para la ingeniería geofísica. Para esto utilizaremos un programa en boga llamado Matlab® versión 5.03.0.1 diseñado por Mathworks®, debido a su facilidad de lenguaje y alta capacidad en visualización de resultados.

II. Resistividad de las rocas

El problema principal al que nos enfrentamos al utilizar series es que representan procesos iterativos infinitos y para hacerlo calculable se tiene que limitar la suma de las series a un número finito de términos que dependen de la aproximación necesaria.

Si se considera la suma de los términos acumulados de las fórmulas para calcular la resistividad aparente igual a S y dS igual a cada término que se va aumentando, al tomar el valor absoluto de la relación dS/S y haya un cambio menor a $.00000001$, se detendrá el proceso. Una vez alcanzada la resistividad aparente se calcula el siguiente punto dependiente de la abertura interelectródica. Los programas se encuentran en el Apéndice A, pero tomaremos las dos gráficas siguientes para hacer comparaciones entre los diferentes arreglos geométricos.

Las gráficas obtenidas por medio de series para los diferentes dispositivos están en las figuras 2.14 y 2.15.

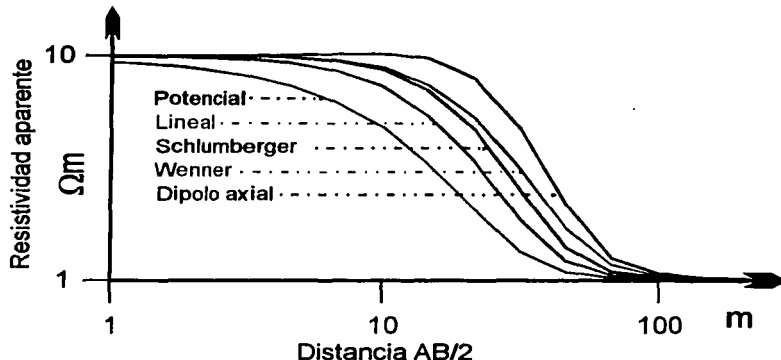


Figura 2.14
Resistividades aparentes calculadas para un medio estratificado con 2 capas. La 1ª capa con resistividad real de $10 \Omega m$ y espesor de 10 m., la 2ª con resistividad real de $1 \Omega m$ y espesor infinito.

Analizando la figura 2.14 se encuentra que el arreglo que tiene reacción más temprana a la diferencia de resistividad es el Potencial, siguiendo el Lineal hasta llegar al que menos reacciona es el Dipolo axial, tal orden de rapidez está directamente asociada con la profundidad de investigación.

El hecho de que la curva correspondiente al arreglo Potencial sea suave y la del Dipolo axial de repente se dirija bruscamente a la resistividad de la segunda capa, nos permitirá definir con mayor exactitud el límite entre las diferentes capas

para arreglo Dipolo axial y por ende mucho más difícil definir para el arreglo Potencial.

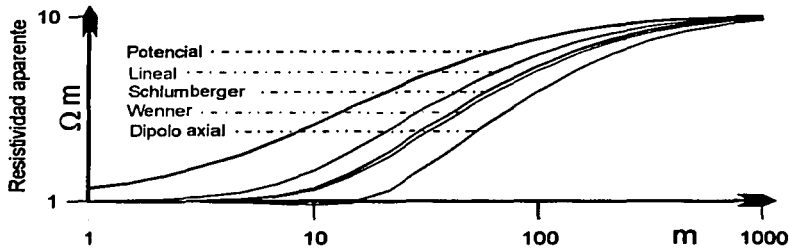


Figura 2.15

Resistividades aparentes calculadas para un medio estratificado de 2 capas. La 1ª capa con resistividad real de 1 Ω·m y espesor de 10 m., la 2ª con resistividad real de 10 Ω·m y espesor infinito.

Comparando la figura 2.14 y la 2.15 se observa que se necesita un intervalo mayor en las separaciones para llegar a la resistividad real cuando $\rho_1 < \rho_2$, por ejemplo en las gráficas en que $\rho_1 > \rho_2$ se necesita una separación $A0 \approx 50m$ para alcanzar el valor de ρ_2 y cuando $\rho_1 < \rho_2$ se necesita $A0 \approx 300m$ para llegar al valor de ρ_2 y es obvio ya que la corriente circula más fácil en un medio menos resistivo y le cuesta trabajo llegar a la capa con más alta resistividad.

II.2.5 Filtrado Lineal.

La relación entre la resistividad aparente $\rho_a(r)$ y la función kernel $R(m)$ de resistividad es de naturaleza lineal (Vozoff K., 1956). La función de transformación está relacionada con la integral de Fourier-Bessel:

$$\rho_a = \rho_1 * r^2 * \int_0^{\infty} R_1(m) * J_0(m * r) * dm$$

Donde r es la separación entre el centro del sondeo y el electrodo de corriente, m es la frecuencia de onda y J_0 es la función de Bessel de primera clase, de orden 0 y R_1 es:

$$R_1 = \coth \left\{ m * h_1 + \operatorname{arcth} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) * \coth \left[m * h_2 + \operatorname{arcth} \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right) * \coth (m * h_3 + \dots) \right] \right\}$$

Debido a tal linealidad es posible derivar una serie de coeficientes G que actúan en los datos muestreados de la resistividad aparente para obtener la

función T, donde $T = \rho_1 \cdot R_1(m)$ llamada función de transformación, operación realizada la primera vez por Ghosh en 1969. Ahora intentaremos hacer el proceso inverso, a través del kernel y los coeficientes obtendremos la resistividad aparente, idea de Ghosh en 1971.

La idea general es que la función de transformación T solamente depende del espesor y la resistividad de las capas para una sección geoelectrica específica y puede ser calculada fácilmente por medio de un programa.

Entonces esta técnica de transformación lineal puede ser utilizada para obtener una curva de resistividad aparente desde una función de transformación para cualquier modelo de capas estratificadas, homogéneas e isotropas.

La fórmula del filtro será:

$$\rho_a(r_j) = \rho_1 \cdot \sum_{k=1}^{KF} R(X_{k+j-1}) \cdot G(k),$$

El desarrollo esquemático del algoritmo está en la figura 2.16, donde a través de multiplicar cada uno de los coeficientes G por el periodo espacial para una sola abertura obtenemos el valor de resistividad para esta abertura.

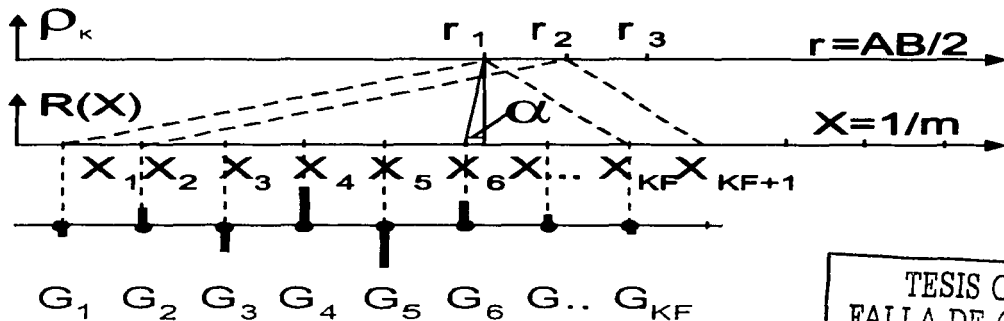


Figura 2.16
Desarrollo esquemático del algoritmo de filtrado lineal

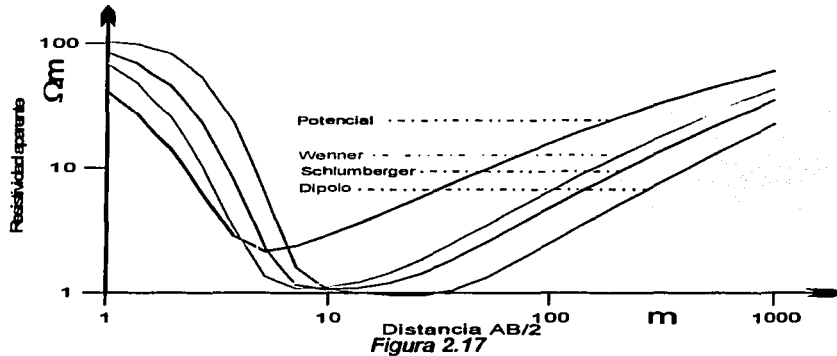
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los valores de los coeficientes serán muestreados a partir de la respuesta a una función especial en el filtro inverso que permite integrar analíticamente y tiene un comportamiento similar a la función de transferencia T, independiente para cada arreglo eléctrico. La respuesta a esta función especial está definida como la respuesta del filtro inverso a una entrada de una función que puede ser Seno de la forma $\sin(x)/x$, o exponencial, con periodo determinado por el intervalo de

II. Resistividad de las rocas

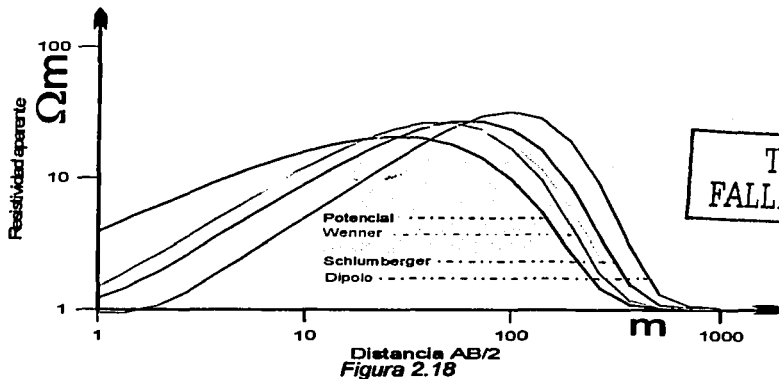
muestreo usado en la función de transformación (Ghosh define que el adecuado es de 6 muestras por cada ln 10).

Utilizando el método de filtrado lineal (Apéndice B) para modelar un medio estratificado de 3 capas obtenemos las siguientes gráficas:



Resistividad aparente calculada para un medio estratificado de 3 capas de tipo H. La 1ª capa con resistividad de 100 Ωm y espesor de 1 m, la 2ª capa con resistividad de 1 Ωm y espesor de 20 m, la 3ª capa con resistividad de 100 Ωm y espesor infinito.

De la figura 2.17 se observa que se necesita muy poca distancia para alcanzar la resistividad de la capa de en medio y el dispositivo Polo-Polo no logra alcanzar el valor.



Resistividad aparente calculada para un medio estratificado de 3 capas de tipo K. La 1ª capa con resistividad de 1 Ωm y espesor de 1 m, la 2ª capa con resistividad de 20 Ωm y espesor de 20 m, la 3ª capa con resistividad de 1 Ωm y espesor infinito.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

Comparando la figura 2.18 (Modelo K) con la figura 2.17 (Modelo H) se observa que se necesitan separaciones mayores para alcanzar a definir el modelo H que el K, por el hecho de que le cuesta más trabajo a la corriente llegar hasta los valores de alta resistividad presentes en el modelo H.

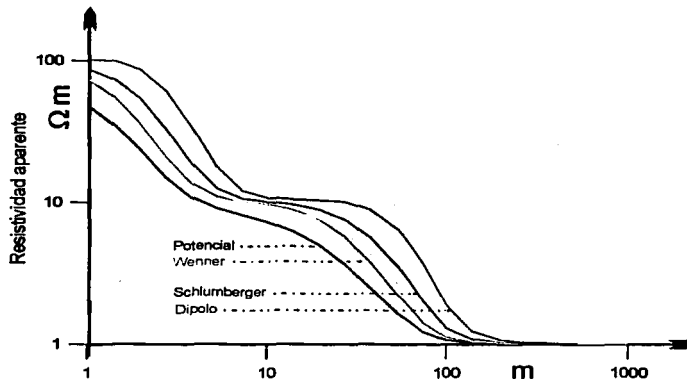


Figura 2.19

Resistividad aparente calculada para un medio estratificado de 3 capas de tipo Q. La 1ª capa con resistividad de $100 \Omega m$ y espesor de 1 m, la 2ª capa con resistividad de $10 \Omega m$ y espesor de 20 m, la 3ª capa con resistividad de $1 \Omega m$ y espesor infinito.

Analizando la figura 2.19 se observa que se alcanza la resistividad de la última capa con separaciones menores que en los otros tipos.

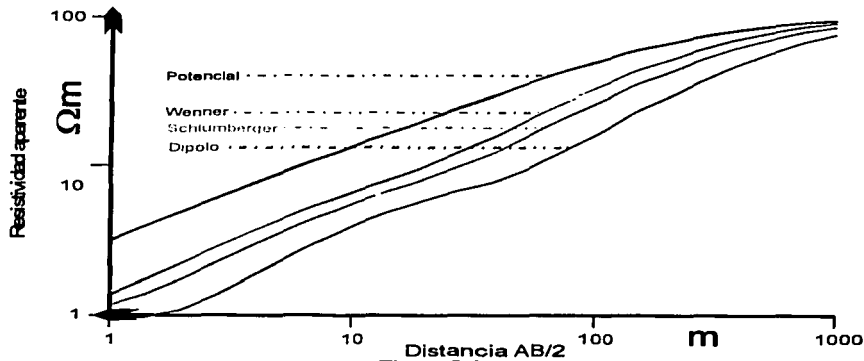


Figura 2.20

Resistividad aparente calculada para un medio estratificado de 3 capas de tipo A. La 1ª capa con resistividad de $1 \Omega m$ y espesor de 1 m, la 2ª capa con resistividad de $100 \Omega m$ y espesor de 20 m, la 3ª capa con resistividad de $1 \Omega m$ y espesor infinito.

En la figura 2.20 se observa que para el caso de curvas tipo A, sólo se ven 2 capas, la primera y la última, a este fenómeno se le denomina Principio de Supresión, que puede llevar a interpretaciones erróneas como sería el que consideremos un medio estratificado de 2 capas.

II.2.6 Conclusiones del apartado 2.2

Para la interpretación de las curvas obtenidas en campo es necesario aplicar la solución al problema inverso (con base en mediciones obtener los parámetros del medio, tales como espesor y resistividad real de las capas).

Para la solución del problema inverso es necesario conocer el problema directo, utilizando para esto dos ideas, el desarrollo en series y el filtro lineal. La solución en series es el primer método en la historia para calcular el problema directo del SEV, la ventaja que tiene es que puede ser determinada la exactitud en su cálculo y su principal desventaja es que para aplicarlo a más de 2 capas, es necesario un desarrollo matemático extenso. La solución a través del filtrado lineal, es mucho más rápido que el de series, la desventaja es que sólo se puede controlar su exactitud comparándolo con otros métodos directos, en este caso, el método de las imágenes.

De los diferentes tipos de curvas para un medio estratificado de 3 capas, la situación geológica que nos permitirá una interpretación más sencilla será el tipo Q, después H, luego el K y por último el A, ya que en el tipo Q hay menos supresión entre las capas por lo tanto habrá más exactitud en la interpretación y tendrá mejor penetración en el subsuelo.

II.3 Modelación en dos dimensiones

II.3.1 Programa IE2DL

Con objeto de aproximarnos al tipo de datos que obtendríamos de mediciones de resistividad del subsuelo, se modelarán situaciones geológicas con la ayuda del programa IE2DL[®] v.3.1 (Bobachev A.A. et al, 1998), cuyo nombre significa "Integral Equation of two dimension with linear current electrodes", con el cual obtenemos las mediciones de resistividad aparente dando el modelo geológico.

II. Resistividad de las rocas

Planteando un caso geológicamente posible (Modelo A) y tomando en cuenta un nivel freático inclinado con variación en su espesor y la existencia de alguna fractura (fig. 2.21) en el que solo hay 3 diferentes resistividades tenemos:

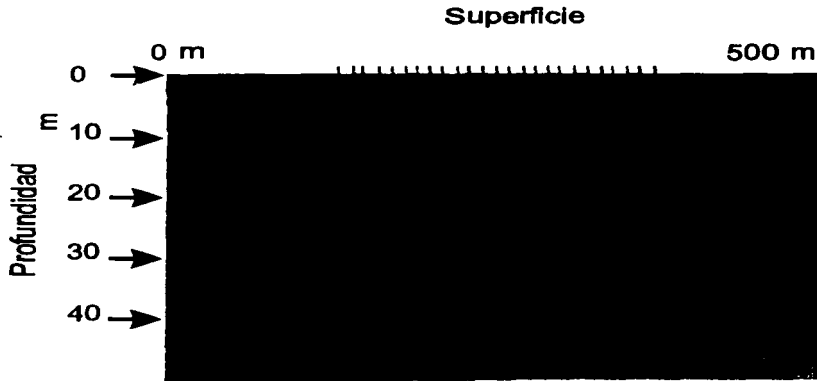


Figura 2.21
Modelo geológico A

Para el modelo A, se utiliza el sondeo tipo Schlumberger a cada 5 m entre SEVs y para cada SEV se modelan 10 aberturas entre los electrodos con incrementos de 5 m cada una, esto es 5, 10, 15, ..., hasta 50 m. Después de tener los datos de resistividad aparente, hay que interpretarlos, para esto se usará otro programa llamado IPI2WIN® (Bobachev A. A., et al 1990-2000), que significa "Induced Polarization Inversión for Windows®" que a través de interpretación para un medio estratificado (1D) permite la visualización del corte geoelectrico y sección de iso-resistividades, con el que después de invertir los resultados se obtiene la resistividad real contra la profundidad (fig. 2.22).

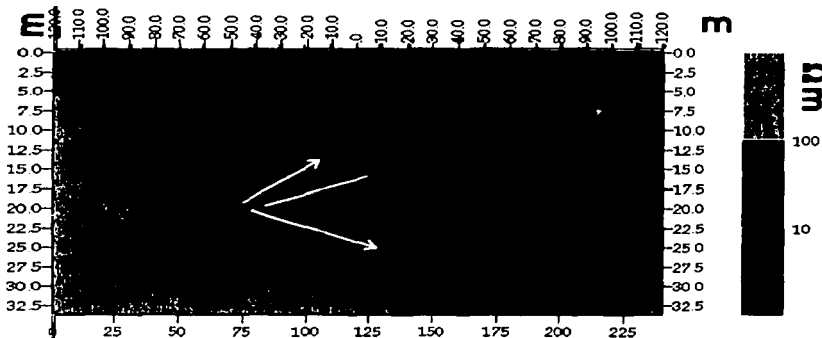


Figura 2.22
Interpretación y sobreposición del Modelo A

II. Resistividad de las rocas

Los errores obtenidos de esta inversión varían de entre 1.41% para el punto +100 y 27.8% para el punto +10, es posible observar que se pierde definición en las pendientes y también para los datos de la base, pero en general se aproxima bastante al modelo geológico inicial en su parte superior. Analizando que pasa cuando eliminamos las pendientes fuertes y los cuerpos profundos, como en el caso de la figura 2.23.

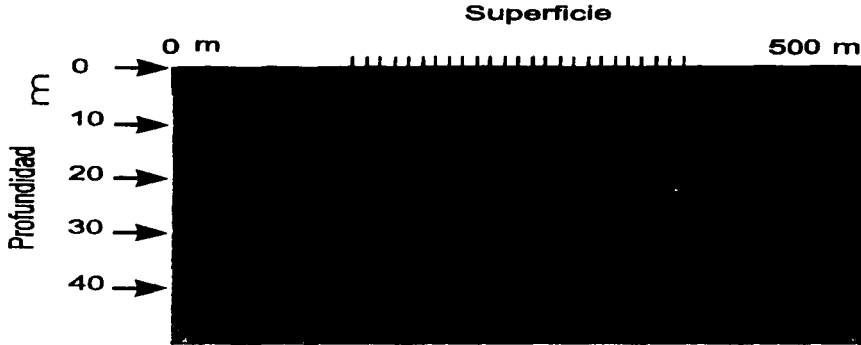


Figura 2.23
Modelo geológico B

El modelo B tiene resistividades de 100, 2 y 200 $\Omega \cdot m$ con la primera en lo más somero y así sucesivamente, se toman 25 puntos de sondeo, con separaciones de 10 m entre ellos y las aberturas aumentan de 5 en 5 metros hasta llegar a 50 m, se realizan mediciones de tipo Schlumberger, los resultados interpretados están en la figura 2.24.



Figura 2.24
Interpretación y sobreposición del Modelo B

II. Resistividad de las rocas

El resultado obtenido es mejor en comparación con el Modelo A; el máximo error es de 3.13% para el punto +48 y el menor de .25% para el punto +68. Ahora si a tal modelo se le añaden inhomogeneidades cercanas a la superficie, el modelo geológico queda como la figura 2.25.

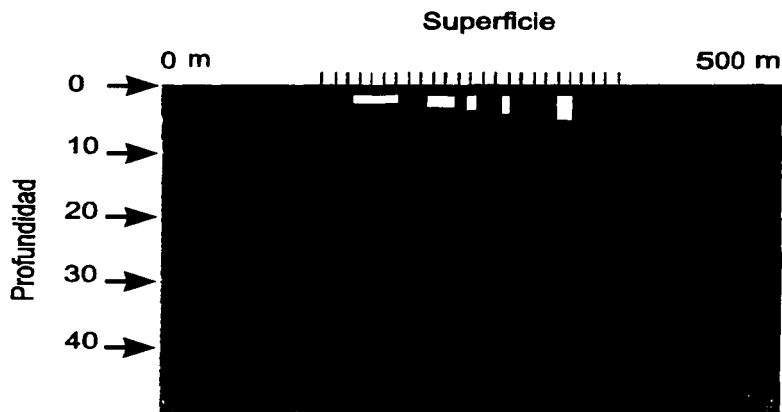


Figura 2.25
Modelo geológico C

El modelo C es similar al B, con los mismos puntos de medición y separación entre los electrodos, añadiendo la inhomogeneidades cercanas a la superficie, los resultados obtenidos de la interpretación de los datos están en la figura 2.26.

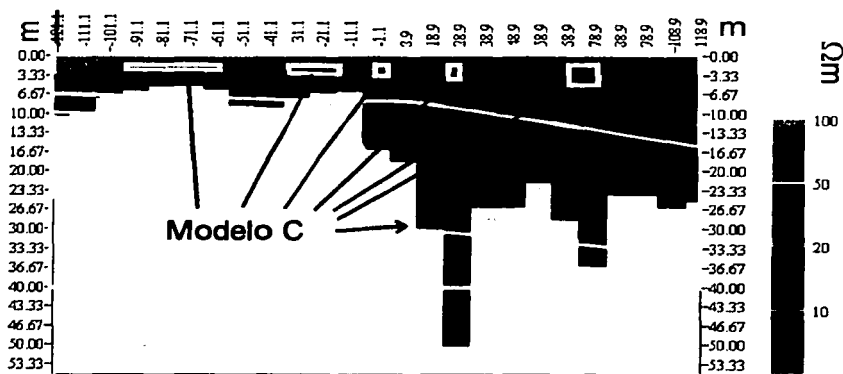


Figura 2.26
Interpretación y sobreposición del Modelo C

II.3.2 Filtrado del Ruido Geológico

Las pequeñas inhomogeneidades agregadas al modelo producen una distorsión claramente perceptible, para poder eliminarlos es necesario hacer un análisis de los tipos de ruidos que se pueden obtener.

Para poder visualizar los ruidos por separado se utilizará el arreglo polodipolo, donde sumando los datos de este método y dividiéndolos entre 2 son idénticos a los que se obtendrían con el arreglo Schlumberger.

Cuando se trabaja en campo, para diferentes posiciones del centro del sondeo, y si los electrodos de corriente se colocan sobre alguna inhomogeneidad, se presenta una distorsión de los datos en exactamente 45° , Ritz M, et al, 1999 (fig. 2.27).

Los datos que corresponden a esta distorsión se les llamará efecto C, asociado al electrodo de corriente, que serán diferentes para cada sondeo polodipolo.

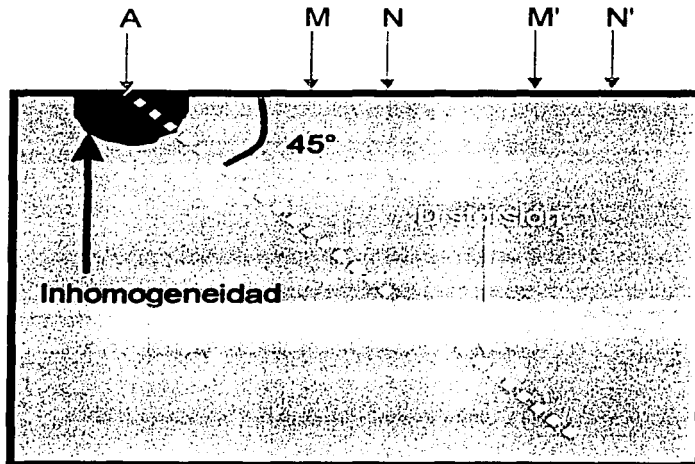


Figura 2.27
Efecto de distorsión provocado por el electrodo de corriente (efecto C)

Cuando se mueven los electrodos de corriente y los estáticos (potencial) son los que están sobre la inhomogeneidad, las distorsiones serán en sentido vertical (fig. 2.28).

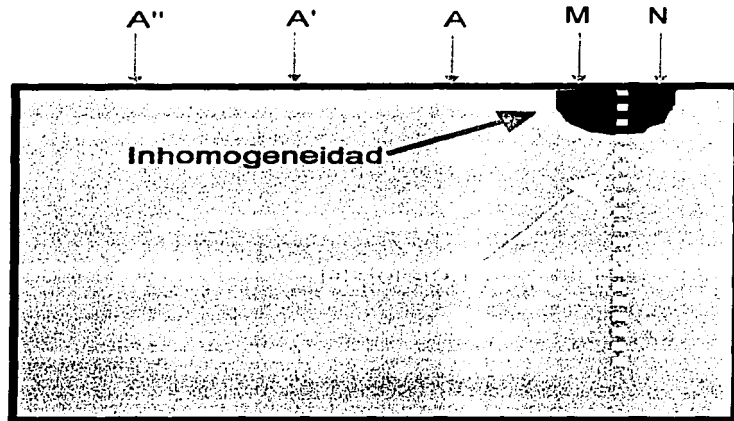


Figura 2.28
Efecto de distorsión provocado por electrodos de medición de potencial (efecto P)

Una vez que se sabe el tipo de distorsiones que pueden obtener, y teniendo en cuenta que el efecto se va a definir cuando utilizamos un arreglo polo-dipolo, es posible la aplicación de un algoritmo para eliminar el ruido producido por las inhomogeneidades, para la matriz de datos de ambos sondeos (AMN y MNB), pudiéndolo dividir en varios pasos:

- 1° Separación de la parte que corresponde a las capas horizontales.
- 2° Separación de la parte asociada al efecto P.
- 3° Separación de la parte asociada al efecto C para AMN y MNB.
- 4° Obtención de la parte residual.
- 5° Separación de cada una de las partes anteriores en regional y local, a través del algoritmo de la mediana, que consiste en ir eliminando de los datos ordenados, los que corresponden a los extremos (locales) hasta llegar al dato que se encuentra en el centro.
- 6° Iterar los pasos anteriores 20 veces, para garantizar una perfecta separación.

Esquemáticamente podemos ver el algoritmo para eliminar el ruido geológico en la figura 2.29.

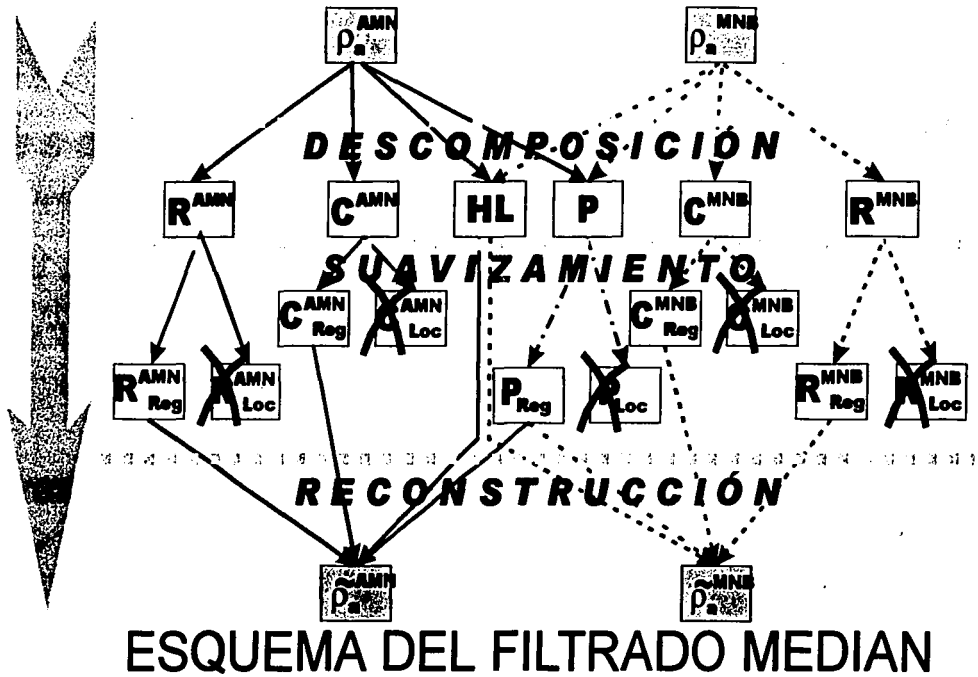


Figura 2.29

1° Separación de los datos en efectos C_{amn} , C_{mnb} , P , estratificación horizontal (HL) y la parte residual (R) 2° Eliminación tomando la mediana 3° Reconstrucción

Para mostrar la separación gráficamente, partimos de datos sintéticos para los sondeos tipo polo-dipolo AMN y MNB, como primer paso se estima la mediana de la parte que corresponde a la estratificación horizontal, y se resta de los datos (fig. 2.30).

Paso 1. Separación de la componente de estratificación horizontal.

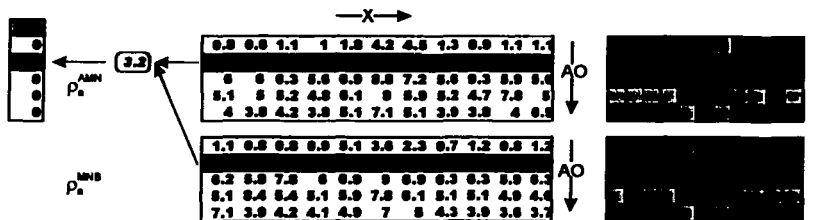


Figura 2.30

Separación y mediana de la estratificación horizontal

II. Resistividad de las rocas

Para eliminar el efecto del ruido cuando los electrodos de potencial están sobre una inhomogeneidad (efecto P) se separan tomando la mediana de las columnas en ambos secciones y se resta de los datos (fig. 2.31).

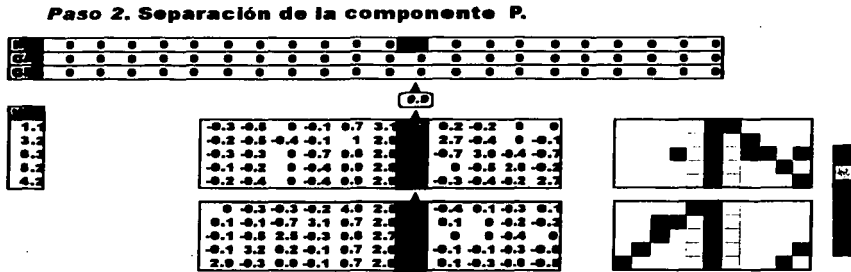


Figura 2.31

Separación y mediana del ruido asociado a la medición del potencial

Para eliminar el ruido geológico producido por una inhomogeneidad debajo del electrodo de corriente, hay que estimar la mediana para los dos perfiles por separado, en la diagonal a 45°, y restárselo (fig. 2.32).

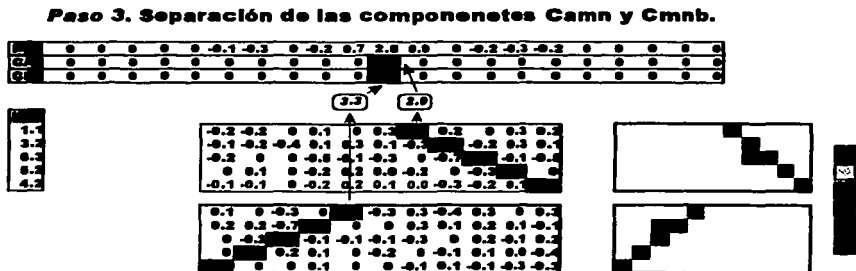


Figura 2.32

Separación y mediana del ruido asociado a los electrodos de corriente

Ya con los datos por separado se siguen iterando las operaciones anteriores con el fin de separar completamente los efectos; en cada iteración la mediana encontrada se le suma a los valores anteriores. Se observan en la figura 2.33 los residuales de la operación de separación.

Paso 4. Resultado y regreso al paso 1.

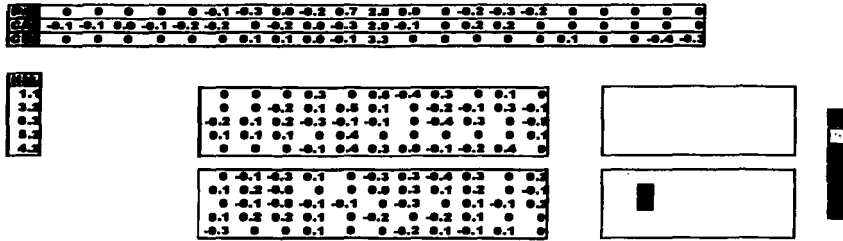


Figura 2.33
Resultado de la separación (Residuales)

Ya con los datos medianizados de HL, P, C_a y C_b, se reconstruyen los perfiles con los datos regionales, habiendo ya eliminado las partes locales.

Para probar la eficacia del algoritmo se incrementa la relación entre las resistividades y el tamaño de las inhomogeneidades (fig. 2.34), para aproximarnos a un medio real, en el cual es difícil la interpretación en casos de alta contaminación.

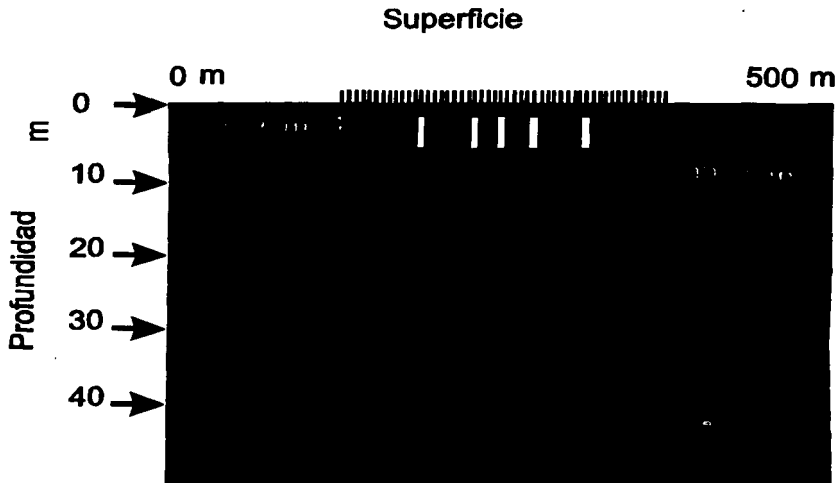


Figura 2.34
Modelo geológico D

Ahora con el programa IPI2win son interpretadas las curvas de resistividad aparente obtenidas, dificultando ésta operación las inhomogeneidades (fig. 2.35).

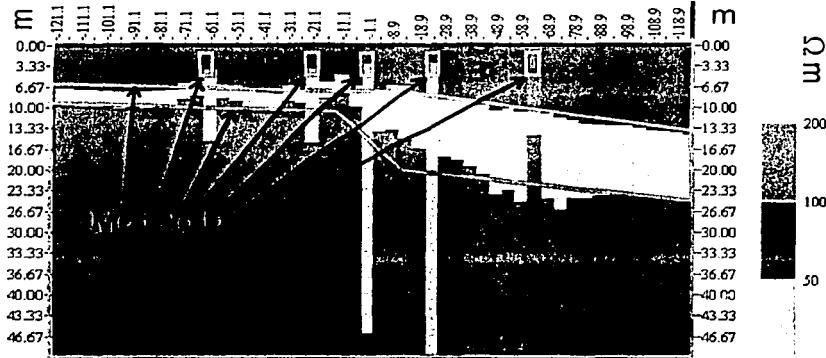


Figura 2.35
Interpretación y sobreposición del modelo geológico D

Aplicando el filtrado de la mediana y sobreponiendo el modelo D tenemos la figura 2.36.

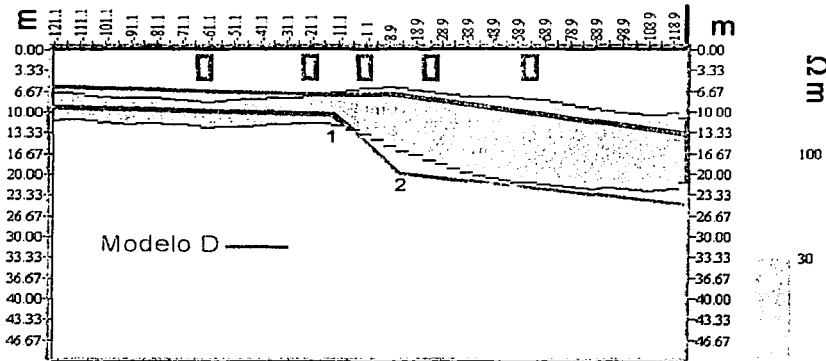


Figura 2.36
Interpretación de los datos filtrados y sobreposición del modelo geológico D

Podemos ver comparando las figuras 2.35 con 2.36, que hay distorsiones que el filtrado no puede eliminar (zonas 1 y 2 de la figura 2.36), que son las asociadas a donde hay puntos de inflexión en el modelo.

Hay discrepancia entre la profundidad del modelo y de los resultados filtrados (en la figura 2.36 de $x=-121$ hasta $x=11$) en la altura y espesor de la capa pero cualitativamente no es significativo.

Se puede observar que el filtrado de la mediana responde al objetivo de eliminar el ruido provocado por las pequeñas inhomogeneidades cercanas a la superficie.

II.3.3 Perfilaje

El método de resistividad tiene diversas técnicas para su aplicación, tales como sondeo eléctrico vertical, perfilaje y estudios azimutales (no utilizados en el presente trabajo).

El perfilaje es una tecnología en la que el arreglo de resistividad es desplazado a lo largo de una línea, sin cambiar el espaciamiento entre los electrodos sino más bien el centro del sondeo.

En los sondeos de resistividad se utilizan curvas en un sistema cartesiano de resistividad aparente ρ_a contra la distancia entre el centro del sondeo y uno de los electrodos de medición r ó $AB/2$. Para las curvas teóricas utilizamos la resistividad aparente entre la resistividad de la primera capa ρ_a / ρ_1 contra la distancia del centro a un electrodo dividida por el espesor de la primera capa, esto es, r/h_1 ; ésta última es una función de ρ_a dependiente del argumento r/h_1 , cuando varía r es un sondeo eléctrico vertical, y en los casos cuando r es fija y h varía a lo largo de una línea lo que tenemos es el caso de un perfil. En este caso se utilizan las curvas teóricas calculadas con el método de series como base para interpretar el perfilaje del método de resistividad.

Para obtener un "perfil de resistividad aparente" a través del programa IE2DL, se utiliza un espaciamiento único, tipo Schulmberger, cada 50 metros, en una línea en la superficie sobre el modelo geológico E (fig. 2.37) que supone una zona en la que varía la distribución y cercanía de la resistividad menor a la superficie.

A través de los datos de perfilaje y los cálculos de resistividad aparente para el arreglo lineal, bajo la premisa de que los valores de resistividad son uniformes para las diferentes capas, podemos llegar desde los valores de resistividad del perfil, a los de datos de profundidad del modelo E; con esto se puede calificar el método de perfilaje a través de la estimación del error entre la profundidad verdadera y la calculada.

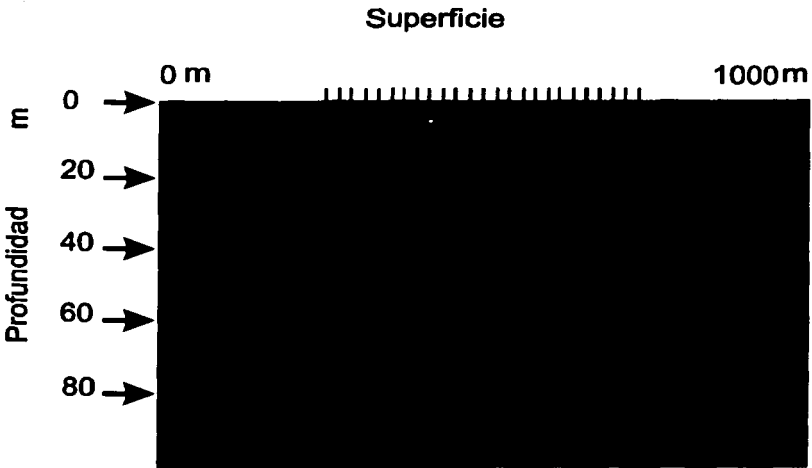


Figura 2.37
Modelo geológico E

Los valores obtenidos del perfil con el programa IE2DL están en la figura 2.38.

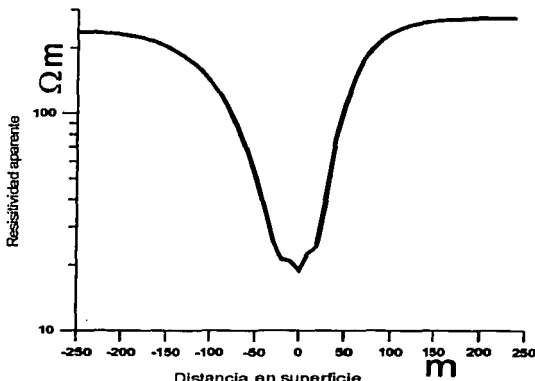


Figura 2.38
Resultado del perfilaje

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una vez teniendo los datos del perfil, hay que hacer los cálculos de resistividad aparente para el arreglo lineal, para este objeto se utiliza el programa de filtrado lineal que aparece en el Apéndice B, arrojando los datos de la figura 2.39.

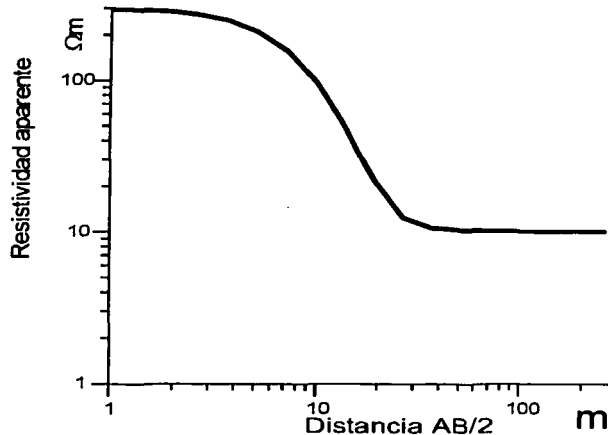


Figura 2.39
Resistividad aparente para SEV calculada con el Filtrado Lineal, para $\rho_1=300 \Omega m$, $h_1=5$ y $\rho_2=10 \Omega m$

Los datos que se obtienen de resistividad aparente son función de la distancia interelectrónica, si dividimos la distancia entre profundidad de la primera capa se obtendrá un reflejo de la figura de la figura 2.39 con respecto al eje de resistividad, siendo necesario reflejarla sobre el mismo eje, como la figura 2.40.

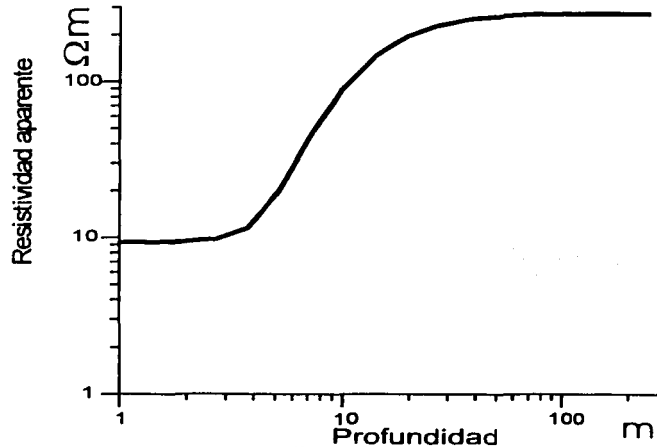


Figura 2.40
Cambio de Resistividad aparente contra profundidad en el modelo E

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Resistividad de las rocas

Llevando cada dato de resistividad de la figura 2.38 a los valores de la figura 2.40, podremos encontrar la profundidad del límite entre las dos capas. Sobreponiendo el resultado de esta inversión con el modelo E podemos ver la diferencia entre ambos en la figura 2.41.

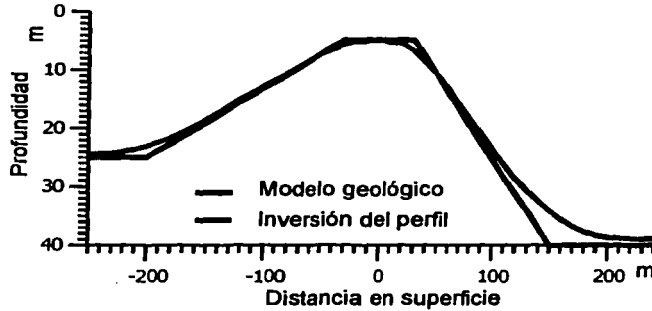


Figura 2.41
Sobreposición de la inversión del perfilaje en el Modelo geológico E

Restando los datos obtenemos el error absoluto (fig. 2.42) definido por la fórmula:

$$\text{Error absoluto} = \sum |h_{\text{interpretada}} - h_{\text{real}}|$$

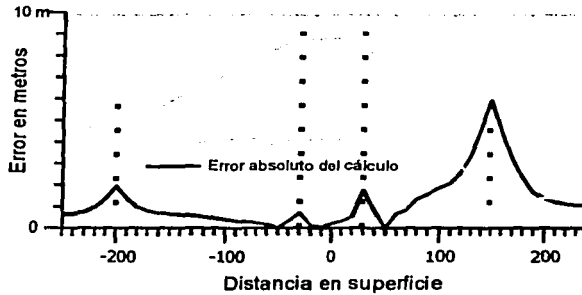


Figura 2.42
Sobreposición del Modelo E contra el error absoluto entre el modelo y la inversión del perfilaje

Es posible observar que el mayor error es de 5.97 metros y el menor de 7 mm., el error absoluto promedio es de 1.24 m, si ahora se calcula el error relativo (fig. 2.43) definido por la siguiente fórmula:

$$\text{Error relativo} = (\sum (h_{\text{interpretada}} - h_{\text{real}}) / (h_{\text{real}})) * 100\%$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

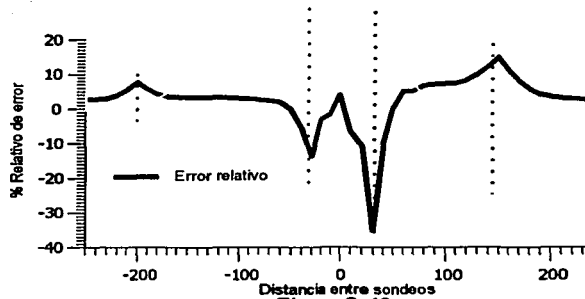


Figura 2.43
Sobreposición del Modelo E contra el error relativo entre el modelo y la inversión del perfilaje

El error relativo oscila entre -35.51% y 14.85% , el error relativo promedio es 5.89% , muy buen resultado considerando que se toman datos desde el programa IE2DL, se utiliza el filtrado lineal y de ahí se invierte en profundidad.

II.3.4 Conclusiones del apartado 2.3

A partir de los errores del perfilaje entre los valores calculados y la inversión, se observa el aumento de los errores en los puntos de inflexión, esto es evidente ya que en la naturaleza no hay tales límites angulares, sino que los cambios son graduales, pero aún así los errores son del 6% , lo cual habla de su utilidad en la determinación de límites horizontales cuando las resistividades de las capas son uniformes.

La resolución obtenida no fue calculada al primer intento, hubo que hacer varias pruebas para diferentes espaciamientos y el óptimo resultado es el que se ha presentado.

Los resultados de la interpretación de datos con el ruido filtrado y su comparación con la interpretación sin filtrar lleva a concluir, que si no indispensable es bastante útil su utilización en los casos de alto ruido geológico como el asociado a zonas contaminadas por hidrocarburos o a zonas urbanas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo III Contaminación del subsuelo por productos petroleros

III.1 Hidrocarburos

Los hidrocarburos constituyen una familia de las más importantes en lo que a contaminación del agua subterránea se refiere.

Familia química de hidrocarburos y derivados	Ejemplo de Componentes
Combustibles	Benceno, tolueno, o-xilenos, butano
Hidrocarburos poliaromáticos	Antraceno, Fenantreno
Alcoholes	Metanol, glicerol
Creosota*	m-cresol, o-cresol
Ketonas	Acetonas
Alifáticos halogenados	Tetracloretano, tricloretano, diclorometano
Aromáticos halogenados	Clorobenceno, diclorobenceno
Bifenilos Policlorinados	2,4'-PCB, 4,4'-PCB

*Antiséptico
(Domenico P.A. & Schwartz F.W., 1998)

Tabla 3.1

Familias importantes de contaminantes orgánicos encontrados en el agua subterránea

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de hidrógeno y carbono, presentes principalmente en el petróleo (mezcla compleja de gases, líquidos y sólidos), en general tienen una proporción del 10 a 14% de hidrógeno y 76 a 86% de carbono, la variación de estos contenidos C_nH_m provoca cambios en la temperatura de fusión ($-182^\circ C$ hasta $100^\circ C$) y densidad (gas hasta $.93 g / cm^3$); desde el metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), hasta llegar a los polietilenos ($C_{2000}H_{4002}$). Están caracterizados por tener una alta resistencia al flujo de la corriente eléctrica, inclusive algunos son utilizados como aislantes, por ejemplo, en transformadores.

III.2 Suelo y microorganismos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El suelo es una compleja mezcla de materia inorgánica (rocas y minerales), materia orgánica, agua, aire y organismos vivos.

III. Contaminación del subsuelo por productos petroleros

Toda la materia orgánica viene de los restos de microorganismos, plantas, animales, de sus productos de desecho y de las actividades bioquímicas de los microorganismos. Una gran porción de tal materia orgánica tienen su origen en las plantas (raíces muertas, madera, corteza y hojas caídas). Otra gran fuente es el vasto número de bacterias, hongos, algas, protozoarios y virus, que pueden sumar millones por gramo en suelo fértil. Estos organismos degradan las sustancias orgánicas, produciendo y manteniendo un abastecimiento continuo de sustancias inorgánicas, que plantas y otros organismos requieren para crecer.

El aumento de materia orgánica completa o parcialmente descompuesta, es esencial para la fertilidad del suelo, de hecho los organismos que mueven el suelo previenen la formación de capas endurecidas, y esto incrementa la ventilación y retención de agua.

La vida microbiológica en el suelo depende de la existencia de agua, que disuelve mucha materia orgánica e inorgánica, permitiendo habitar el medio. Sin embargo, si el contenido de agua es muy alto, el oxígeno de la atmósfera no puede penetrar fácilmente en el suelo, y este factor limita la eficiencia en el crecimiento y los tipos de organismos que pueden ahí vivir. Generalmente, por la respiración de los organismos en el suelo, los gases que contiene, son en gran proporción dióxido de carbono y poco oxígeno. La mayor parte de éstos existen en los espacios entre poros o son disueltos por el agua.

El suelo es el principal expositor de la biomasa terrestre y por lo tanto de la vida microbiológica:

Profundidad	Bacterias	Actinomicétes	Hongos	Algas
3 a 8 cm	9,750,000	2,080,000	119,000	25,000
20 a 25 cm	2,179,000	245,000	50,000	5000
35 a 40 cm	570,000	49,000	14,000	500
65 a 75 cm	11,000	5000	6000	100
135 a 145 cm	1,400	—	3,000	—

Bacteria filamentosas.
(Alexander M., 1977)

Tabla 3.2
Población en el subsuelo con respecto a la profundidad

Cuando se agregan nutrientes al suelo, las poblaciones de microbios y su actividad crecen rápidamente hasta que se acaban los nutrientes y la actividad microbiológica regresa a sus niveles bajos otra vez.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. Contaminación del subsuelo por productos petroleros

Los organismos más numerosos en el suelo son las bacterias. El suelo de un jardín típico tiene millones de bacterias en cada gramo. Como se ve en la tabla 3.2 la población es altísima en la superficie y declina con la profundidad. Estas poblaciones son estimadas contando los elementos nutrientes, y los números reales son probablemente subestimados por este método. No hay un medio nutriente único o una condición única para el crecimiento que abarque todas las miriadas de nutrientes y otros requerimientos de los microorganismos del suelo.

Hay bacterias en el suelo que son capaces de comer los hidrocarburos, los derrames proveen de alimento a estas bacterias y a otras las mata, dando por resultado un incremento en la población (casi 10 veces), en los surfactantes (utilizados para romper las largas cadenas de hidrocarburos) y en la cantidad de CO₂.

III.3 Derrames de Hidrocarburos

El término contaminación es usado para referirse a constituyentes disueltos o a líquidos de fase no acuosa (NAPLs como gasolina, aceite o solventes industriales) agredados al agua como consecuencia de la actividad humana.

El estudio de la contaminación por constituyentes disueltos es más sencillo que en presencia de NAPLs, ya que estos últimos pueden migrar en tres fases: 1° líquido separado, 2° disuelta en el agua o 3° en forma de vapor.

Cuando hablamos de derrames de hidrocarburos podemos clasificarlos en 2 tipos generales:

- a) Derrame superficial (debido a un impacto directo sobre el terreno)
- b) Derrame subterráneo (debido a fisuras en un tanque subterráneo o ducto)

Así mismo, pueden ser clasificados con respecto al tiempo de exposición sobre el suelo, como sigue:

- a) Derrames intermitentes (subcontinuos).
- b) Derrames instantáneos (una sola vez).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. Contaminación del subsuelo por productos petroleros

Los derrames subterráneos afectarán un volumen mínimo de sedimentos pero los superficiales afectarán un área mucho mayor, siendo ambos casos a los que nos enfrentamos. Ya sean intermitentes o instantáneos hay tres factores que pueden cambiar las propiedades resistivas de los hidrocarburos a saber:

a) Biodegradación

Se han encontrado que existen más de 300 tipos de bacterias, que son capaces de degradar los hidrocarburos en los primeros 1,200 m desde la superficie, su acción se debe a que utilizan surfactantes (moléculas polares, hidrofóbicas en un polo y el otro no) emulsificando¹ el petróleo.

Las bacterias más eficientes son las que están en ambientes aeróbicos, pero las anaeróbicas tienen también la capacidad de degradar; el resultado de las reacciones de surfactantes en ambientes anaeróbicos son CO₂, H₂O y ácidos orgánicos. El CO₂ se combina con el agua y se forma ácido carbónico, produciendo una reducción del pH en el suelo.

b) Disolución de sales

La reducción del pH produce la lixiviación² de los sedimentos, y el agua, en la zona donde se produce el ácido, adquiere un alto contenido en sólidos disueltos (TDS); el efecto de la disolución de las películas que cubren las partículas sedimentarias es un aumento en la conductividad eléctrica, alcanzando un contenido de casi cinco veces la cantidad original de sal.

c) Movilidad de los hidrocarburos

Los poros en el suelo están llenos de agua o aire, dejando un máximo de 50% del espacio poral libre para cuando hay un derrame de hidrocarburos, la fuerza de gravedad los drena, dejando un promedio de 29% del derrame como residual, el porcentaje restante es la parte considerada móvil, que cuando llueve, ocurre una dispersión más o menos vertical del derrame y cuando hay sequía el nivel freático baja y hay descenso de los residuos; estos movimientos hacia arriba y abajo deja una compleja mezcla de los sedimentos con el producto líquido de los hidrocarburos, el agua y/o aire. Ésta mezcla crea óptimas condiciones para la

¹ Emulsificación: separación de un líquido en glóbulos microscópicos en otro con el que no se mezcla.

² Lixiviar: Disolver en agua una sustancia alcalina.

III. Contaminación del subsuelo por productos petroleros

acción microbiana aeróbica, que con el agua oxigenada de la lluvia, producirá lixiviación y, por ende, alta conductividad (William A. Sauck, 1998).

III.4 Biorremediación

La presencia de hidrocarburos en el agua subterránea es de alto riesgo para el ser humano, debido a su capacidad cancerígena, mutagénica, daño al hígado, disfunciones cardiovasculares, depresiones nerviosas, daños cerebrales y otras.

Existen en general 4 alternativas para tratar con la contaminación:

- a) Contener los contaminantes en el lugar.
- b) Atenuar la posibilidad de daños a través de instituciones gubernamentales (clausurar los pozos cercanos al derrame).
- c) Remover los contaminantes con todo y suelo.
- d) Tratamiento de los contaminantes in situ.

La forma más viable es el tratamiento de los contaminante in situ y es necesario que las zonas contaminadas sean restauradas para no afectar a la gente que utiliza el agua, de alguna de las siguientes maneras:

- a) Fitodegradación: proceso mediante el cual las plantas degradan los contaminantes orgánicos, debido a la acción enzimática, los fragmentos de los contaminantes se incorporan al tejido nuevo de las plantas.
- b) Biodegradación intensificada de la rizosfera: se produce en la tierra que rodea a las plantas, debido a las substancias naturales que liberan, alimentan a los microorganismos del suelo, además de que las plantas aflojan la tierra y transportan agua al lugar, facilitando la biodegradación aeróbica.
- c) Bombeo orgánico: cuando las raíces de los árboles llegan hasta el manto freático forman una masa densa, que absorbe una gran cantidad de agua, disminuyendo la tendencia de los contaminantes superficiales a descender.
- d) Fitovolatilización: se produce a medida de que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben el agua contaminada, descomponiendo los hidrocarburos, llevándolos hasta las hojas y volatilizándose en la atmósfera.
- e) Inyección de corriente continua: en pruebas de laboratorio ha dado muy buen resultado dejar una fuente inyectando corriente directa, evidenciando después de varios meses desplazamiento de la contaminación.

III.5 Conclusiones

Los estudios geofísicos de Atekwana y Sauck (desde 1998 hasta 2001) han identificado anomalías de alta conductividad dentro y abajo de la zona contaminada, después de cierto tiempo del derrame de hidrocarburos (LNAPL). Los experimentos de laboratorio (poniendo parte del suelo contaminado en tanques bajo observación) y modelado numérico han indicado que tales anomalías son resultado de la biodegradación de los LNAPL. Se han sintetizados los puntos más importantes de estos procesos en la tabla siguiente.

<p>Aumento de hasta 10 veces en la cantidad de bacterias Disminución de Oxígeno Aumento de Bióxido de carbono Aumento de hasta 5 veces la cantidad de sólidos disueltos en el agua El aumento de surfactantes y la emulsificación producen en los hidrocarburos a) Facilidad para las bacterias al degradarlo ya que disminuye su volumen b) Aumento en la movilidad facilitando la acumulación en poros pequeños Disminución de la resistividad con el tiempo</p>
--

Modificado de Sauck desde 1998 hasta 2001.

Tabla 3.3

Propiedades alteradas por la biodegradación de la contaminación

La contaminación en el subsuelo crea zonas de baja resistividad con el tiempo, por lo que es posible aplicar el método de resistividad.

La contaminación por hidrocarburos puede ser considerada como ruido geológico por su distribución espacial tan variable, para el mapeo de la distribución de zonas de baja resistividad asociadas a la contaminación es recomendable disminuir el nivel de ruido.

El filtrado de ruido geológico aplicado a los resultados del método de resistividad será un medio efectivo para estimar las zonas contaminadas, ayudando a la planeación métodos de biorremediación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo IV

Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

IV.1 Caso práctico

El Campo 10 de Poza Rica es una zona de depósito y tratamiento de aceite ya utilizado, donde por medio de la separación del agua se recupera el crudo para convertirlo en sólido, los desperdicios de ésta separación son quemados. En este momento se hayan activos un quemador y un tanque de descarga; el antiguo tanque se encuentra en la parte sureste, zona anteriormente expuesta a procesos de remediación.

Los tanques de descarga son la fuente de la contaminación, ya que es donde ocurren derrames de tipo superficiales, subterráneos, intermitentes y de acuerdo a la manera en que han sido utilizados podrían considerarse instantáneos para las zonas que han sido abandonadas.

La baja resistividad asociada a derrames de hidrocarburos después de cierto tiempo¹ permite aplicar el método de resistividad para crear un modelo geoelectrico del subsuelo de esta zona, estimando la posición, el grado y profundidad de la contaminación.

IV.2 Trabajo de campo y equipo

La tecnología de prospección utilizada corresponde a la medición del voltaje (ΔV) para un arreglo polo-dipolo, en 180 sondeos eléctricos verticales (SEV) repartidos en 8 perfiles por el Campo 10 (figura 4.1).

Cada perfil tiene separaciones de 4m entre SEV y las aperturas AO se incrementan en dos metros cada vez (2, 4, 6,.....,20), resultando 10 mediciones por SEV inyectando cada vez 10 mA; la separación entre los electrodos de potencial, donde se mide la diferencia de potencial, permanece constante para todos los sondeos (un metro entre M y N).

¹Decenas de años pasaron de los inicios de los derrames antes de que fueran tomadas las mediciones, por el Ph. D., Dr. Sc. Vladimir A. Shevnin y el Dr. Sc. Omar Delgado en 2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

El equipo utilizado fue:

- Receptor ERA (Equipo de Resistividad eléctrica en corriente Alterna) de baja frecuencia 4.88 Hz. precisión de 3 a 5 μV .
- Transmisor de 4.88 Hz., fijo a 10mA.
- Cables de conexión.
- Electrodos de acero.

Los perfiles para los sondeos aparecen en la figura 4.1

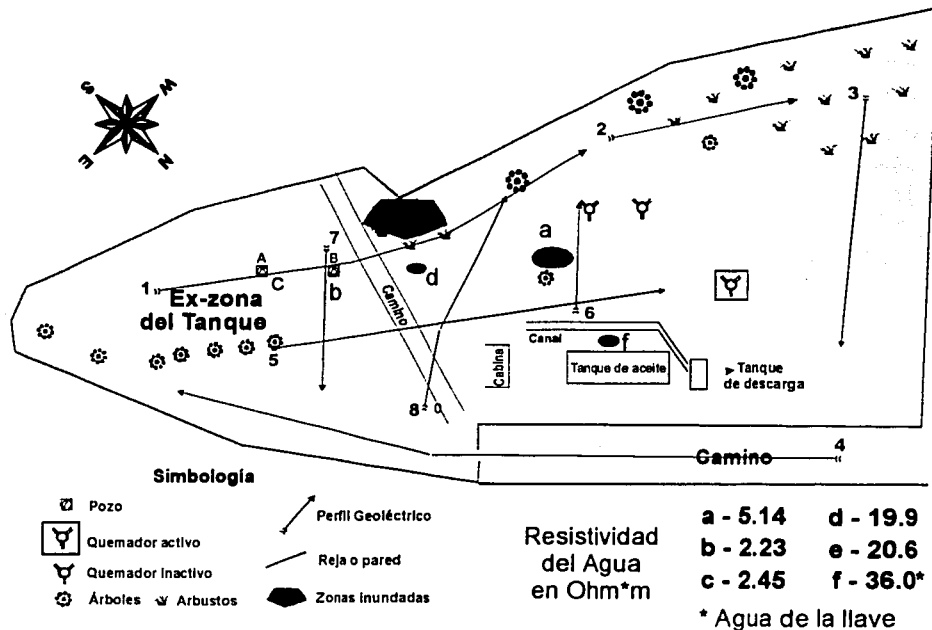


Figura 4.1
Distribución de los sondeos en el Campo 10 Poza Rica

IV.3 Procesamiento

Aplicando el filtrado del ruido geológico (ver capítulo II.3.2) a los datos de ρ_a y uniendo los sondeos AMN con los MNB, se obtienen SEV's del tipo Schlumberger (fig 4.2 y 4.3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

El análisis de los perfiles permite separarlos en dos, de alta y baja resistividad. Las gráficas de los perfiles más resistivos (1,5,7 y 8), se presentan a continuación (fig 4.2).

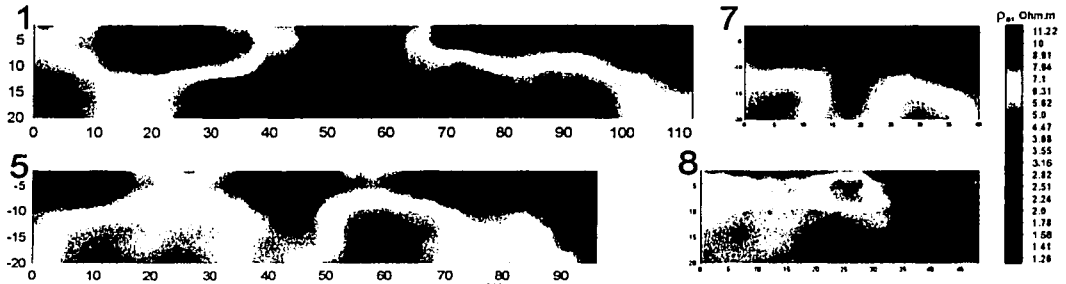


Figura 4.2
Perfiles 1,5,7 y 8 de resistividad aparente .

La figura 4.3 contiene los perfiles de los sondeos menos resistivos (2, 3, 4 y 6):

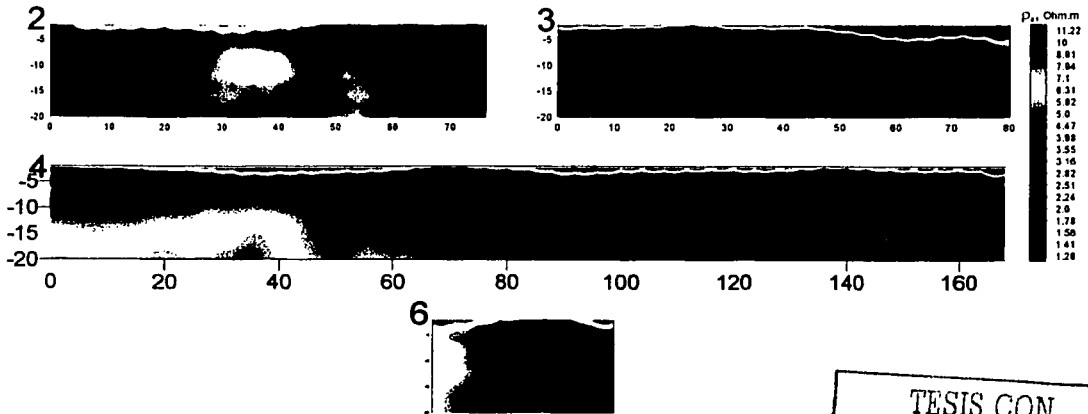


Figura 4.3
Perfiles 2,3,4 y 6 de resistividad aparente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para comparar el filtrado del ruido con la realidad, se toma la desviación estándar de los datos en bruto contra los filtrados para cada abertura electrónica (fig. 4.4). Se dividen los perfiles 1,5 y 8 de los perfiles 2,3 y 4, discriminando los perfiles 6 y 7, por ser poco representativos resistivamente hablando y menos extensos que los demás.

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

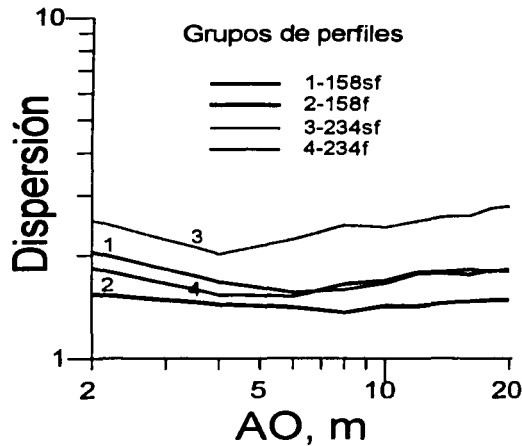


Figura 4.4
Comparación estadística de los datos en bruto (sf) con los filtrados (f)

Antes y después de filtrar podemos ver diferencia mayor entre los perfiles 2, 3 y 4 que en los 1, 5 y 8, por consiguiente el filtrado ha eliminado más ruido en los perfiles 2, 3 y 4, asociada a zonas de baja resistividad (contaminadas).

Haciendo análisis estadísticos² con los datos filtrados se obtiene la figura 4.5:

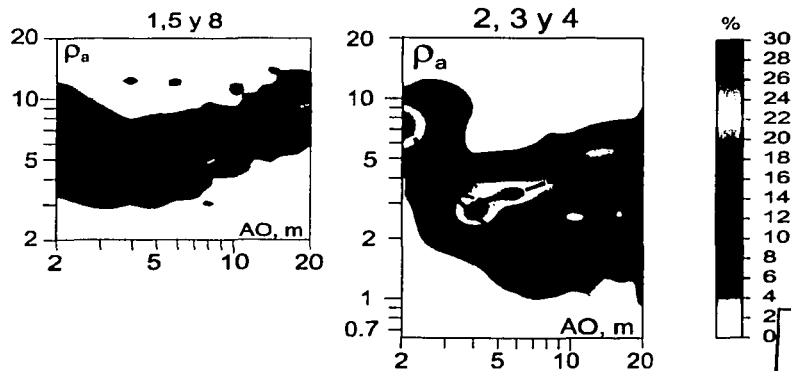


Figura 4.5
Datos estadísticos para los perfiles 1, 5 y 8, y los perfiles 2, 3 y 4

²Tomando una sola separación AO en cada uno de los perfiles para obtener su histograma, es posible unir todos los histogramas y representar los valores de frecuencia en una sola gráfica (fig. 4.5).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

Los datos para los perfiles 1, 5 y 8 varían de 4 a 10 $\Omega \cdot m$, con una curva tipo H, con el mínimo entre 3 y 5 m de AO, tenemos entonces 3 capas: una arriba del nivel freático, una exactamente abajo del nivel freático y el basamento.

Para los perfiles 2, 3 y 4 hay dos curvas principales, una similar al caso de los perfiles 1, 5 y 8 (3 capas), otra en la que el mínimo está entre 6 y 9 m de AO, con una resistividad aparente de 1 a 2 $\Omega \cdot m$, la existencia de estas dos curvas indica intuitivamente una zona limpia y una contaminada.

Asociando los resultados teóricos de resistividad (debido a la doble capa eléctrica) con los datos medidos de resistividad del agua del Campo 10, es posible delimitar la zona contaminada de la limpia (figura 4.6).

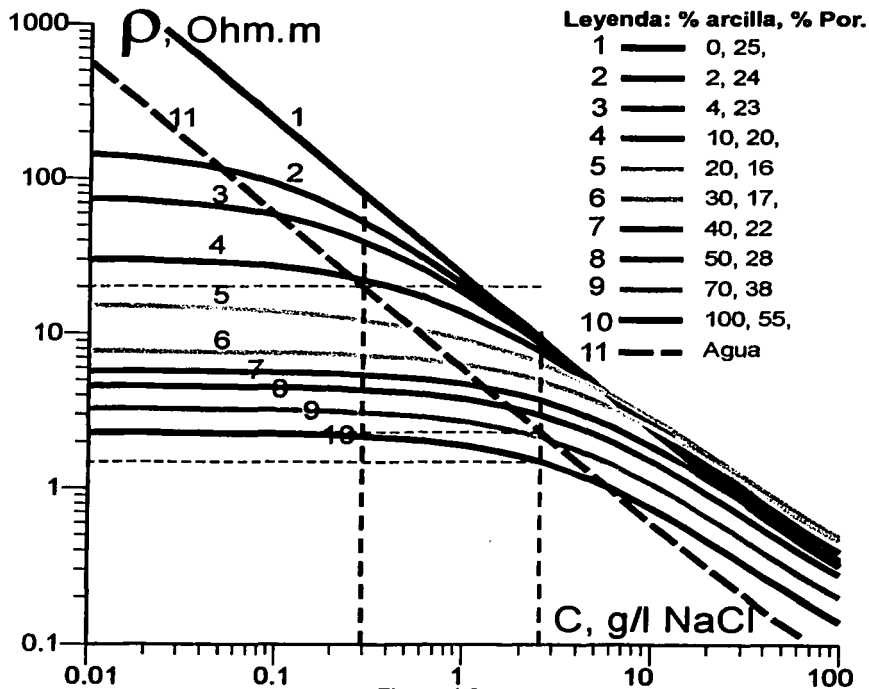


Figura 4.6
Datos teóricos de resistividad contra concentración de NaCl, para diferentes litologías

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

Para hacer los cálculos teóricos de la resistividad desde agua pura hasta completamente saturada de sales, se utiliza el programa Petrophysics® (Rylov, A. 2000) que emplea datos de humedad (100%), tipo de sal (NaCl), temperatura (20°), la mineralización (en gramos/litro) y la porosidad de los componentes (25 % para arena y 55 % arcilla tipo hidromica).

Para limitar la mineralización asociada a una zona limpia, se toma la resistividad del agua de varios puntos del Campo 10 (marcados con letras en la figura 4.1), variando entre 1.5 y 20 Ω -m, (ya que el dato de 36 Ω -m corresponde a agua de la llave), llevando estos valores a la curva teórica del agua, la mineralización asociada varía de 0.3 a 2.6 gramos / litro de NaCl.

La resistividad que salga de los límites nos demostrará una mineralización mayor, asociada a zonas contaminadas biodegradadas; ya que debido a la doble capa eléctrica (DCE), las arcillas tienen la capacidad de almacenar casi 50 veces más sales que en ausencia de la DCE, por lo que la contaminación registrada estará en las arcillas.

Para visualizar los resultados en cortes horizontales, esto es, paralelos al suelo, se utilizará el programa IPI_Plan® (Shevnin, V., 1997), con el que se les dará coordenadas a los puntos de asignación de la medición, arrojando resultados en forma xyz.

Una vez teniendo los datos en formato x, y e ρ_a , hay que tomar el logaritmo natural de la columna ρ_a , y así interpolar; para que la leyenda concuerde con datos de resistividad habrá que tomar sus valores y obtener exponencial de éstos, logrando con esto una representación válida.

Las gráficas correspondientes a los datos filtrados de cómo está distribuida la resistividad aparente en el subsuelo para cada una de las diferentes aberturas son 4.7, 4.8 y 4.9.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

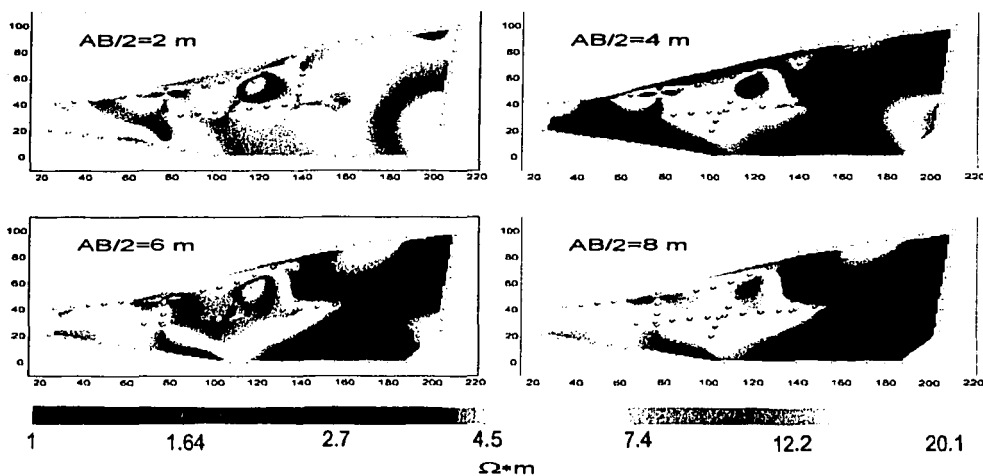


Figura 4.7
Mapas de resistividad medida para iso-aberturas interelectródicas correspondientes a 2, 4, 6 y 8 m en $AB/2$

A través de las figuras anteriores (fig 4.7) es posible tener una idea de cómo se va distribuyendo la resistividad en el Campo 10 e ir localizando de las zonas de baja resistividad, asociadas a las contaminadas. A continuación tenemos los mapas correspondientes a iso-aberturas mayores (fig 4.8).

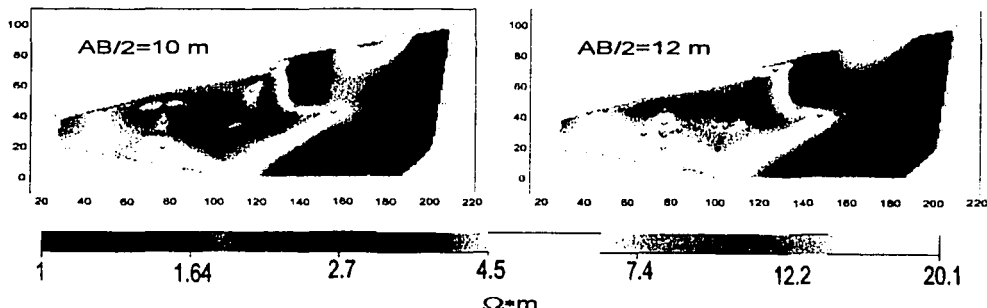


Figura 4.8
Mapas de resistividad para iso-aberturas interelectródicas correspondientes a 10 y 12 m en $AB/2$

IV. Análisis de datos del Campo 10 de Poza Rica

De las gráficas es posible darse una idea de la zona contaminada, veamos los mapas más profundos (fig 4.9), donde vemos dos focos principales de contaminación en la parte derecha y en la parte inferior.

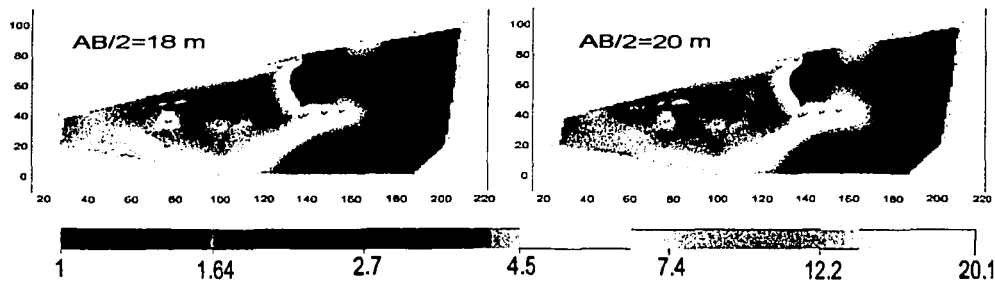


Figura 4.9

Mapas de resistividad para iso-aberturas interelectródicas correspondientes a 18 y 20 en AB/2.

Ya con la idea de cómo se distribuye la resistividad, hay que interpretar las curvas para cada perfil, pero de las observaciones hechas en campo se sabe que el nivel del agua subterránea varía de entre .8 y 2 m aproximadamente, entonces para la interpretación será necesario variar el espesor de la segunda capa en este rango y los valores de resistividad nos darán el grado de contaminación. El mapa de la segunda capa con los valores de resistividad real es la figura 4.10.

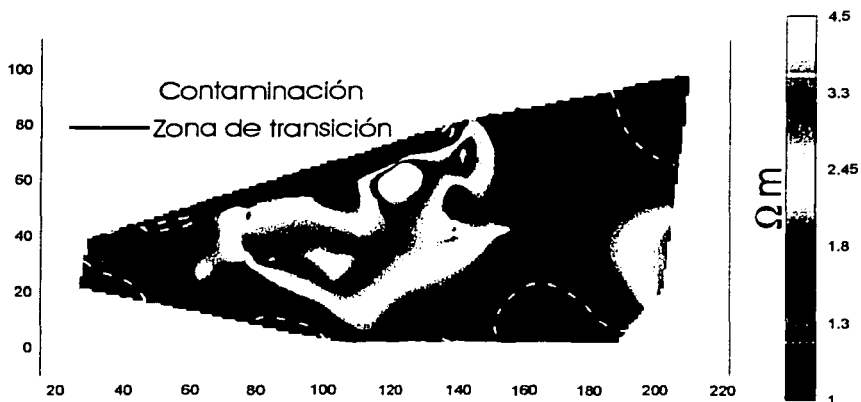


Figura 4.10
Resistividad real de la 2ª capa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV.4 Conclusión

De la figura 4.10 podemos afirmar que la contaminación presenta 2 focos de contaminación bien delimitados (fig 4.11); en la parte derecha superior y otro en la parte inferior derecha, describiendo el movimiento de los contaminantes están las flechas negras y las partes oscuras corresponden a la zona afectada .

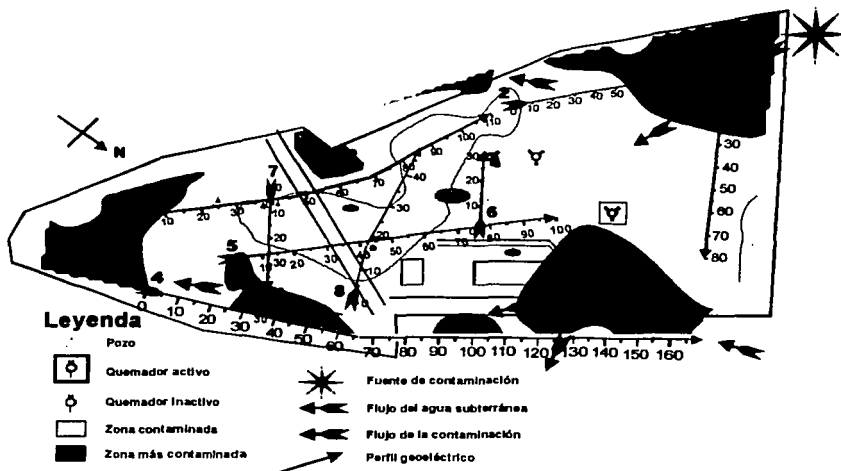


Figura 4.11
Resultado final del estudio

Se ha inferido la dirección del flujo de agua subterránea de la diferencia topográfica, en el norte está la zona más alta (cerro) descendiendo hacia el sureste (río Cazones); de las fuentes de contaminación la que está al noreste corresponde con el tanque de descarga activo, la que se encuentra fuera del mapa orientada hacia el noroeste, corresponde a tanques de depósito de hidrocarburos, de los que como es evidente hay fugas y afectan nuestra zona de estudio.

La efectividad del mapeo se comprobará y calibrará con los datos geoquímicos e hidrogeológicos para afirmar la dirección del movimiento de hidrocarburos biodegradados.

El éxito obtenido fue el de llevar datos que corresponden a interpretaciones en una dimensión a plantear un mapa bidimensional a través de la interpolación con los datos de resistividad (figura 4.11).

Capítulo V Conclusiones

La contaminación por productos petroleros es muy frecuente y peligrosa, haciendo necesario su estudio, para poder aplicar algún tipo de remediación.

La normatividad actual en contaminación del subsuelo establece que para localizar la contaminación en cualquier zona hay que hacer pozos de control cada 100 m², en los cuales a una profundidad de 1 metro se tomará una muestra de la calidad del agua, después a 2 metros y otra muestra, y así hasta encontrar una zona limpia de contaminación. La principal desventaja es que si nos encontramos sobre un acuífero y realizamos pozos dentro del acuífero, la contaminación que estaba separada se unirá al almacén de agua, destruyendo en lugar de ayudar.

Debido al cambio de propiedades en zonas contaminadas por hidrocarburos asociadas a la actividad bacteriana, hay una disminución en la resistividad del suelo, que puede ser estudiada con el método de resistividad, con un arreglo polo-dipolo, que permitirá el posterior filtrado de los datos y debido a que no se afecta el terreno es posible aplicar algún método de remediación.

En las zonas contaminadas hay alto ruido geológico y se obtuvieron resultados satisfactorios al filtrarlo, siendo posible obtener mapas que se corroboran con los rastros de contaminación en la superficie, pero el mapeo permite afirmar su distribución en el subsuelo, siendo ésta la herramienta para presionar a la empresa su consecuente remediación.

Para encontrar los límites entre zonas contaminadas y limpias, se aplicó un análisis petrofísico gracias a las muestras de resistividad del agua en varios pozos del Campo 10 de Poza Rica, Veracruz, de gran ayuda para separar las zona limpia de la contaminada.

Una vez obtenida la distribución de la contaminación es necesario exigir a PEMEX o a la empresa que posea la fuente de contaminación, los siguientes puntos:

1° Remover la tierra de la zonas más contaminadas con el fin de tratarla al exterior para evitar la subsecuente infiltración de contaminantes en el manto freático.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2° Análisis de la calidad del agua (respecto a los contaminantes de la tabla 3.1) en los alrededores para verificar su contenido tóxico.

3° En caso de ser alto este nivel habrá que anular el pozo y suplir de agua a la gente que depende de él.

4° Posterior a la remediación de todos los daños causados, en nuestro caso PEMEX debe hacer una campaña extensiva de prospección de la contaminación en las zonas de desecho similares a ésta.

5° Una vez remediada la zona se podrá aplicar el método de perfilaje como comprobación, debido a la alta rapidez con que se puede llevar a cabo, e inclusive tal método puede ser aplicado en zonas de Poza Rica, que presenten rasgos de contaminación superficial y con características de profundidad en el manto freático similares.

Apéndice

A

Programas en Matlab® para calcular la resistividad aparente a través del método de las imágenes para 2 capas horizontales con $\rho_1=10 \Omega \cdot m$, $\rho_2=1 \Omega \cdot m$ y un espesor para la primera capa de $h=10m$.

```
clear;
format long E;

%Cambiando los siguientes parámetros se modifica el modelo
ro1 = 10;
ro2 = 1;
h = 10;
%ro1 resistividad de la primera capa
%ro2 resistividad de la segunda capa
%h profundidad de la primera capa
k = (ro2-ro1)/(ro2+ro1);
%k=coeficiente de reflexión
y=(log(10)/6);
%y=paso logarítmico
%El siguiente ciclo permite el cálculo de la resistividad para cada separación
for r = 1:25
    R(1,r)=(exp(r*y));
    n=1;
    S = 0;
    dS = 0;
    delta = 1;
    %Cada ciclo while detiene el cálculo al ser la diferencia delta menor a 10-10
    while delta >= .000000001
        dS = ((k.^n).*R(1,r))./(((R(1,r)).^2+(2.*n.*h).^2).^1.5);
        S = dS + S;
        n = n+1;
        delta = abs(dS./S);
    end
    t1(r)=n;
    roa1(r) = ro1*(1+2.*S);
    clear dS n S delta;
    n=1;
    S = 0;
    dS = 0;
    delta = 1;
    while delta >= .000000001
        dS = ((k.^n).*(R(1,r))^3)./(((R(1,r)).^2+(2.*n.*h).^2).^1.5);
```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

S = dS + S;
n = n+1;
delta = abs(dS./S);
end
t2(r)=n;
roa2(r) = ro1*(1+2.*S);
clear dS n S delta;
n=1;
S = 0;
dS = 0;
delta = 1;
while delta >= .000000001
dS = ((k.^n)*((2/3)*R(1,r)))*(( 1 / ( (((2/3)*R(1,r)).^2 + (2.*n.*h).^2).^5))- ...
( 1 / ( ( (4/3)*R(1,r)).^2 + (2.*n.*h).^2).^5));
S = dS + S;
delta = abs(dS./S);
n = n+1;
end
t3(r)=n;
roa3(r)=ro1*(1+4*S);
clear dS n S delta ;
n=1;
S = 0;
dS = 0;
delta = 1;
while delta >= .000000001
dS = (((k.^n).*(R(1,r))^3)*(2*(R(1,r))^2...
-(2.*n.*h)^2))./(((R(1,r)).^2+(2.*n.*h).^2).^2.5);
S = dS + S;
n = n+1;
delta = abs(dS./S);
end
t4(r)=n;
roa4(r) = ro1*(1+S);
clear dS n S delta;
n=1;
S = 0;
dS = 0;
delta = 1;
while delta >= .000000001
dS = ((k.^n).*(R(1,r))^2)./(((R(1,r)).^2+(2.*n.*h).^2));
S = dS + S;
n = n+1;
delta = abs(dS./S);
end
t5(r)=n;
roa5(r) = ro1*(1+2.*S);

```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN


```

clear dS n S delta;
end
%Con el siguiente listado se obtienen las gráficas de resistividad aparente
figure(1)
grid on;
semilogy(roa1,'g');
hold on;
text(1,2.5,'verde=Potencial');
semilogy(roa2,'m')
text(1,4.5,'morado=Schlumberger');
semilogy(roa3,'r');
text(1,5.5,'rojo=Wenner');
semilogy(roa4,'b');
text(1,6.5,'azul=Dipolo axial');
semilogy(roa5,'k');
text(1,3.5,'negro=Lineal');
title('ro1=10 ro2=1 h=5 r=13 delta>.000000001');
axis([0 25 0 11]);
grid on

```

Apéndice

B

Programas en Matlab® para calcular la resistividad aparente a través de Filtrado Lineal para un medio estratificado de 3 capas con $\rho_1=1 \Omega\cdot m$, $\rho_2=20\Omega\cdot m$, $\rho_3=1\Omega\cdot m$ y un espesor para la primera capa de $h_1=10m$ y para la segunda $h_2=20$.

```

clear;
clf;
format long;
%Los siguientes parámetros cambian para cada tipo de arreglo eléctrico
%En éste caso se trata del arreglo Potencial
kf=25;
ktm=7;
alfa=1.75;
nc=10;
m=nc-1;
G=[.02105, -.227701, .930814, -1.523978, 1.010370, -1.427002, 2.077722, -
1.87257, 2.660787, -2.567381, 3.158133, -3.1996, 3.597916, -3.667092,
3.881488, -3.868526, 3.862603, -3.656208, 3.360556, -2.868746, 2.263495, -
1.553329, 0.883808, -.361660, 0.084523];
% kf=longitud del filtro
% ktm=avance en el cálculo de  $\rho_a$ , número de puntos por década
% alfa=desfasamiento

```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

%nc=posición del centro del filtro en los coeficientes
%m=número de coeficientes a la izquierda del centro del filtro
%G=coeficientes del filtro
%Al final del programa hay una tabla con los valores para los diferentes arreglos
nr=25;
%nr=número de coeficientes
%Parámetros para cambiar el modelo
ro(1:3)=[1,20,1];
h(1:3)=[2,20,Inf];
%ro(1)=1 resistividad de la primera capa
%ro(2)=20 resistividad de la segunda capa
%ro(3)=1 resistividad de la tercera capa
%h(1)=2 profundidad de la primera capa
%h(2)=20 profundidad de la segunda capa
q=10^(1/7);
n=length(ro);
u=7;
qq=exp(log(10)/u);
r(1)=1;
%Ciclo para el cálculo de las distancias interelectrónicas
for j=2:nr;
    r(j)=r(j-1)*qq;
end
for j=1:nr
%ciclo externo
x(1)=r(j)*alfa/(q^m);
%Cada vez que cambia j el valor de x(1) cambiará
for jj=2:kf
    x(jj)=x(jj-1)*q;
end
%Aquí se cuenta con una serie de coeficientes x, diferentes para cada j
for jj=1:kf
    T=ro(3);
    for i=n-1:-1:1
%Este ciclo es para obtener los valores de la función de transformación
    T=(T+(tanh(h(i)/x(jj))*ro(i))/...
        (1+((T*tanh(h(i)/x(jj)))/ro(i)));
    end
    TX(jj)=T;
%En TX tenemos cada uno de los coeficientes que se han de convolucionar con
los coeficientes del filtro
end
clear T
sm=0;
for i=1:kf
    sm=sm+TX(i)*G(i);
end

```

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```
roa(j)=sm;
end
%Para graficar se utiliza la siguiente parte
semilogy(roa);
axis([1 25 1 11]);
grid on
title('Resistividad aparente por filtrado lineal para el arreglo Potencial')
```

Parámetros para el arreglo Lineal.

```
kf=20;
ktn=7;
alfa=1.11;
nc=9;
m=nc-1;
G=[0.053496, -.548818, 2.188049, -3.575252, 1.976495, -1.514297, 2.494498, -
1.378438, 1.746731, -1.155709, 1.093076, -.752920, 0.585868, -.368543,
.229502, -.110088, 0.043526, -.007170, -.001801, .001788];
```

Parámetros para el arreglo Wenner.

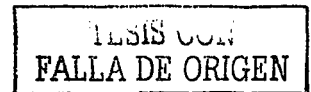
```
kf=15;
ktn=7;
alfa=1.14;
nc=10;
m=nc-1;
G=[-.0060761, 0.0776724, -.4517604, 1.2470370, -.9712197, -1.1451320,
0.4341175, .7623470, .7153097, .0463033, .3228741, -.1333170, .1333268, -
.0497029, 0.0181955];
```

Parámetros para el arreglo Schlumberger.

```
kf=15;
ktn=7;
alfa=1.005;
nc=10;
m=nc-1;
G=[-.015821, .203596, -1.222006, 3.856356, -5.567616, 2.414293, -.758876,
2.122195, -.671525, .783732, -.290884, .169452, -.031227, 0.003612, 0.004705];
```

Parámetros para el arreglo Dipolo Axial.

```
kf=20;
```



ktm=7;
alfa=1.135;
nc=15;
m=nc-1;
G=[-.000013, 0.0022634, -.0213047, 0.1154131, -.4859322, 1.7711440, -
5.4590220, 12.2481200, -15.54753, 6.94409, .3930209, 1.735075, -.8505089,
.3898381, -.2843019, 0.0915451, -0.0438194, 0.0022785, .0017841, -.0021373];

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
LA BUENAVISTA

Bibliografía

Abdel Aal Gamal Zidon, Werkema D. Dale Jr., Sauck William A., Atekwana Estella A., *"Geophysical investigation of vadose zone conductivity anomalies at a former refinery site, Kalamazoo, MI"*. Western Michigan University Department of Geosciences Kalamazoo, MI.SAGEEP 2001, 9 páginas.

Alexander M., *"Introduction to Soil Microbiology"*, Impreso en Estados Unidos, New York, Editorial Wiley, página 78,1977.

Atekwana Estella A., Cassidy Daniel P., Magnuson Charlie, Endres Anthony L., Werkema D. Dale Jr., Sauck William A., *"Changes In Geoelectrical Properties Accompanying Microbial Degradation Of LNAPL"*. Western Michigan University, Department of Geosciences, Kalamazoo, MI 49008. University of Waterloo, Department of Earth Sciences, Waterloo, Ontario N2L 3G1 Canada.SAGEEP 2001, 10 páginas.

Atekwana Estella A., Sauck William A., Werkema Douglas Dale Jr., *"Characterization of a complex refinery groundwater contamination plume using multiple geoelectric methods"*. SAGEEP proceedings. Department of Geology, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 1998, páginas 427 a 436.

Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A., *"IE2DL, Software for 2D forward resistivity and IP modeling"*, Impreso en Moscú, Rusia, 1998, 12 páginas.

Bobachev A. A., Modin I. N., Shevnin V. A., *"IPI2WIN user's guide"*, Impreso en Moscú, Rusia, 1990-2000, 27 páginas.

Darmois Genevieve, *"Materia, electricidad y energía"*, Impreso en Argentina, 1962, Compañía General Fabril Editora, 149 páginas.

Domenico Patrick A., Schwartz Franklin W., *"Physical and Chemical Hydrogeology"*, Impreso en Estados Unidos, John Wiley & Sons, Inc., 1998. 506 páginas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Enos Paul, "*Evolution of pore space in the Poza Rica trend (Mid-Cretaceous), México*", *Sedimentology*, vol 35, no. 2, 1988, The Journal of the International Association of Sedimentologists.

Gasulla Forner M., "*Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*", Barcelona, España, 1999. Universidad Politécnica de Cataluña, 93 páginas.

Hernández Velasco M., "*Elementos de física*", Impreso en México, 1971, 162 páginas.

Iturbe-Argüelles, Flores-Torres, Chávez-López, Roldán-Martín, "*Saneamiento de suelo contaminados con hidrocarburos mediante biopilas*", *Investigación y Tecnología III.I*, 25-35, 2002

Kunetz Geza, "*Principles of Direct Current Resistivity Prospecting*", Impreso en Estados Unidos, 1966, 103 páginas.

Loke M. H., "*Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*", 2000, Universidad de Birmingham, 65 páginas.

López Ramos E., "*Geología de México*", Impreso en México, 1983, tomo III, 453 páginas.

López Ramos E., "*Distribución de la porosidad en las calizas del cretácico medio de la región de Tampico, Poza Rica*", *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. 5, no. 2, 1953.

Orellana Ernesto, "*Prospección Geoeléctrica en corriente continua*", Impreso en España, Segunda edición, 1982, 523 páginas.

Ritz M., Robain H., Pervago E., Albouy Y., Camerlynck Ch., Descloitres M. and Mariko A. "*Improvement to resistivity pseudosection modeling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon*". *Geophysical Prospecting*, 1999, 47, pp. 85 – 101.

TRABAJOS CON
FALLA DE ORIGEN