

La Tomografía Eléctrica como Herramienta de Diagnostico Ambiental Subsuperficial en la Industria del Petróleo y del Gas.

Lic. Andrés López Hidalgo¹

¹ Consultor Geofísico. Investigador Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan.

Sinopsis

Constantemente se ve incrementada la demanda de nuevas Herramientas de Diagnostico Ambiental Subsuperficial en la Industria del Petróleo y del Gas. Se puede aseverar que la Tomografía Eléctrica es una poderosa y óptima herramienta para tales propósitos. Su principal ventaja es que se trata de una Tecnología de Investigación NO INVASIVA, de la cual y a través de la medición de la **Resistividad del Subsuelo** se obtienen **Imágenes de Resistividad de Detalle** en muy poco tiempo de relevamiento.

En el presente trabajo se expone un resumen de la metodología y varios Casos Históricos de aplicación de la Tomografía Eléctrica en situaciones reales de Diagnostico Ambiental con resultados exitosos.

Abstract

Constantly is increased the claim of new Tools of Shallow Environment Diagnostic in the Petroleum and Gas Industry. We can to asseverate that the Electrical Tomography is a powerful and optimum tool for this purposes. The principal advantage is that is a Technology of Investigation NON INVASIVE, from and through of the measuring of the Resistivity of Subsurface to obtain Resistivity Imaging of Detail in very low time of survey.

In the present work we expose a summary of the methodology and various Case History of application of the Electrical Tomography in real situations of Environment Diagnostic with successful results.

Tomografía Eléctrica (TE). Generalidades.

El método de TE en Dos y Tres Dimensiones (TE_R2D y TE_R3D) es una técnica de investigación de Resistividad de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde el empleo de otras técnicas NO PERMITEN obtener información de detalle en 2D y 3D a profundidades someras.

La TE consiste en medir la Resistividad Aparente (RA) con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada “a”, e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que el resultado final será una sección de RA a varios niveles “n” en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de Inversión.

La Inversión arroja como resultado una **“Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas”** que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc. A través de la Interpretación se llega a las conclusiones del Diagnostico Ambiental, que puede ser constatada con las observaciones de campo y datos de perforaciones y/o calicatas mecánicas.

Conclusiones

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Imágenes de elevada resolución para profundidades someras.

- ✓ La cobertura en dos y tres dimensiones es mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos y calicatas mecánicas, otros.
- ✓ Los resultados se presentan en forma que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Hidrogeólogos, Ingenieros, u otros especialistas.-

Introducción.

El método de Tomografía Eléctrica (TE) en su modalidad de Resistividad de Alta Resolución en Dos y Tres Dimensiones (TE_R2D y TE_R3D) es una técnica de relevamiento recientemente desarrollada para la investigación de áreas con anomalías complejas (resistivas o conductivas), donde el empleo de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), GeoRadar (GPR - Ground Penetrating Radar) u otras técnicas de Resistividad NO PERMITEN obtener información de detalle en Dos y Tres dimensiones a profundidades someras.

La TE consiste en obtener una serie de medidas de resistividad aparente con un micro dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada “a”, e ir variando (aumentando) las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que el resultado final será una sección de resistividades aparentes a varios niveles “n” en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión para obtener una Imagen de Resistividad-Profundidad Verdadera lo que permite a través de la Interpretación llegar a las conclusiones del Diagnostico Ambiental.

Resistividad Aparente: Definición.

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en TE y la que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.

Esta está definida por la ecuación:

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

donde K es la constante de normalización de cada dispositivo o factor geométrico, ΔV es la diferencia de potencial medido sobre el terreno, e I la corriente inyectada al mismo.

Resistividad. Su relación con los elementos del Subsuelo.

La TE da una Imagen de la distribución de la resistividad real del subsuelo, para convertir esta Imagen de Resistividad en una estructura geológica / ambiental, es muy importante y necesario conocer algunas de las resistividades de los diferentes tipos de materiales del subsuelo y de la geología del área bajo estudio.

En la tabla 1, se observan los valores de resistividad de las rocas más comunes, materiales de suelo y algunas sustancias químicas (Keller y Frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966, Orellana 1982). Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que posee, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

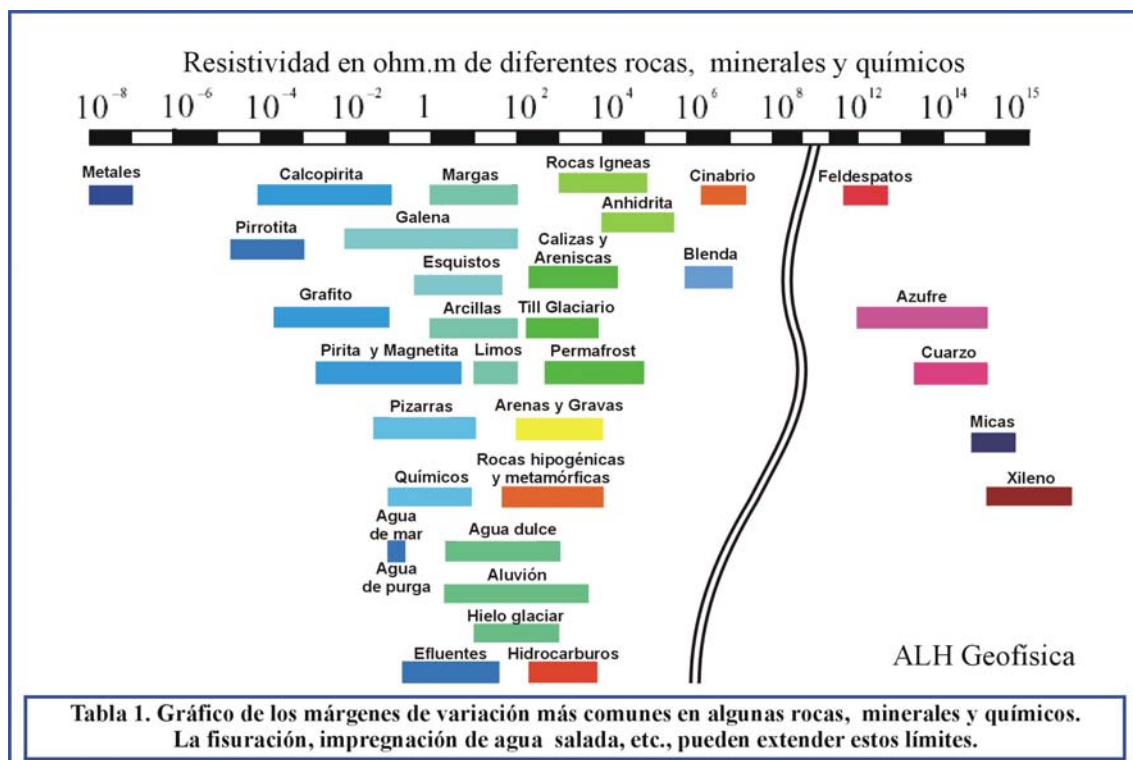
Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aun más bajos valores de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o

roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm.m. dependiendo de la concentración de sales disueltas. Note que el bajo valor de la resistividad (alrededor de los 0.2 ohm.m) en el agua de mar o agua Coproducida se debe al alto contenido de sal, esto hace que el método de TE sea una técnica ideal para la delimitación de la filtración en profundidad de viejas represas de tierra.

En la Tabla 1 también se muestra el valor de la resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales, tal como hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de 1 ohm.m con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos, tal como xylene, típicamente tienen valores muy altos de resistividad.

Los valores de resistividad tienen un gran rango comparado a otras cantidades físicas obtenidos por otros métodos Geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio pueden variar por varios ordenes de magnitud. En comparación, la densidad usada en investigaciones gravimétricas usualmente cambia pero por debajo de un factor de 2, las velocidades sísmicas normalmente no cambian por mas de un factor de 10. Esto hace que el método de la TE sea una técnica geofísica muy versátil.



Dispositivos

Un dispositivo es un arreglo de electrodos formado con dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie, y a través del segundo par se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1P2 con un Milivoltímetro. Se tienen arreglos donde uno o dos electrodos se conectan a una distancia lo suficientemente grande, denominados remotos o infinitos, a la cual no producen perturbaciones en la zona de estudio.

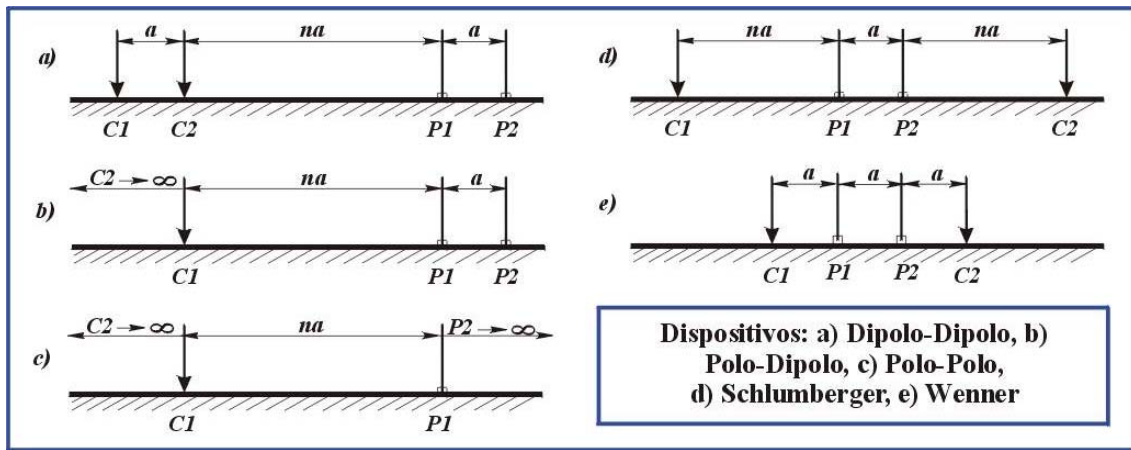


Figura 1. Diferentes Dispositivos usados en Tomografía Eléctrica para relevamientos 2D y 3D

Los Dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se muestran en la Figura 1. La elección de la "mejor" configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, profundidad, la sensibilidad del resistímetro y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio.

En la práctica, los conjuntos más usados para la obtención de Imágenes de Resistividad Eléctrica en 2-D y 3-D son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y d) Polo-Dipolo. De entre las características de un determinado arreglo debe considerarse: i) la profundidad de investigación, ii) la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea, iii) la cobertura horizontal de datos y la relación señal ruido.

Resolución vs. Separación entre Electrodo "a"

La profundidad de investigación y la resolución buscada determinan la separación interelectródica "a", la que puede variar por lo general desde fracciones de metros a 50 metros (o aún más en casos excepcionales). En aplicaciones someras se toman distancias interelectródica "a" igual a fracciones de metro hasta 5 metros y los perfiles se conforman con niveles "n" que van de 10 a 25 en casos excepcionales y con superposición de "n" = 4 para obtener un perfil de alta resolución en la parte profunda del perfil.

Profundidad de Investigación

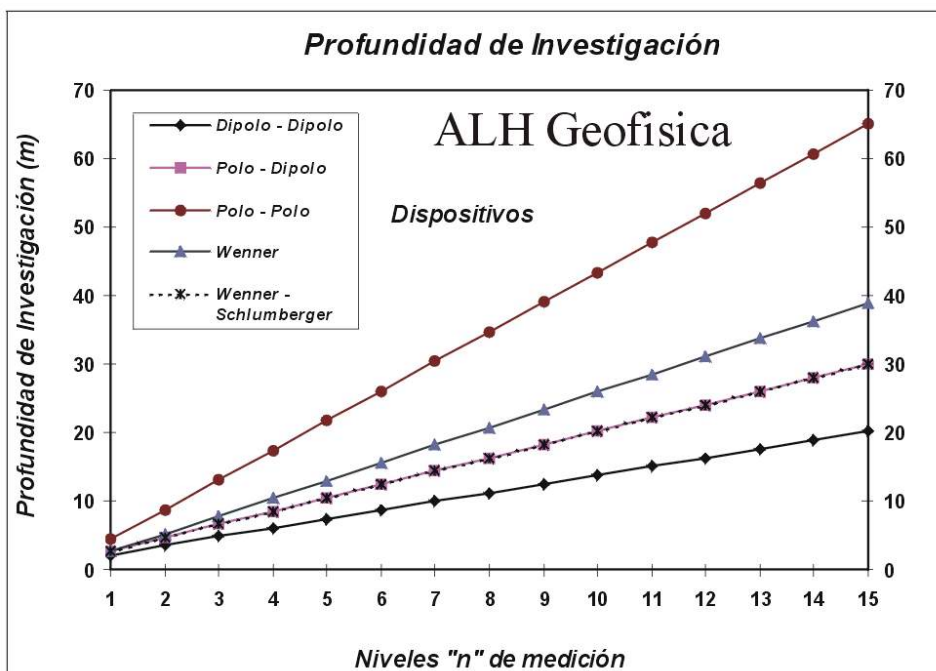


Gráfico 1: Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo-Dipolo; Polo-Dipolo; Polo-Polo; Wenner y Wenner-Schlumberger obtenidas para una distancia interelectródica "a" de 5 metros y 15 niveles "n" de medición (Edwards 1977). Nótese valores idénticos para los dispositivos Polo-Dipolo y Wenner-Schlumberger.

El Grafico 1 da la profundidad media de investigación para los diferentes Dispositivos, este da una idea de la profundidad a la que nosotros podemos sondear con un arreglo de electrodos en particular. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad.(Edwards, 1977).

Hay que destacar que las profundidades son estrictamente válidas para un modelo homogéneo de tierra. Si hay grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser algo diferente.

Pseudo sección. Resultados.

Los resultados se vuelcan en pseudosecciones de resistividades aparentes conformando de este modo una malla en dos dimensiones. Una pseudosección constituye una sección con curvas de iso-resistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado

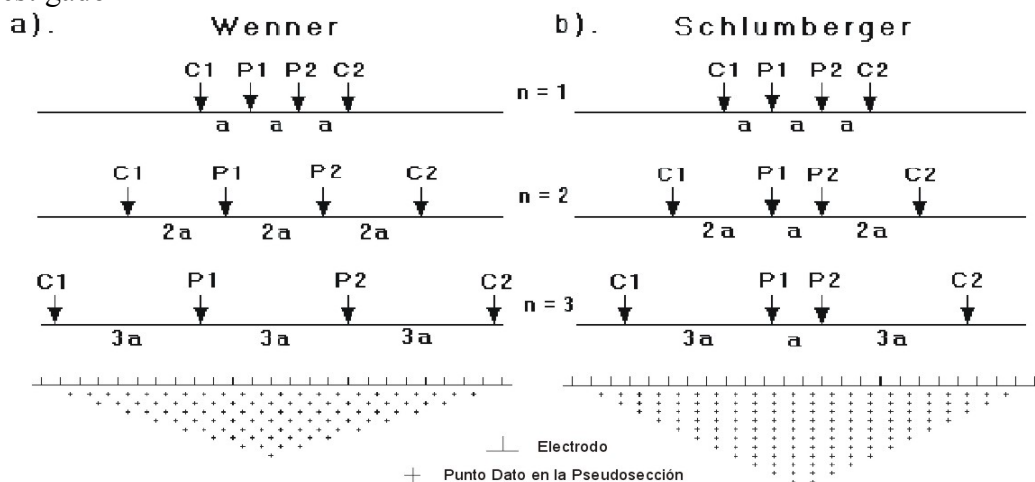


Figura 2. Comparación de Cobertura para los Arreglos de electrodos y pseudosección de datos para las configuraciones a) Wenner y b) Wenner-Schlumberger.

Procesamiento, Inversión e Interpretación

El resultado obtenido es un conjunto de 200 a 500 datos (o aún más), dispuestos en forma de pseudosección de resistividad aparente, a partir de los cuales se efectúa la interpretación cualitativa de los datos, permitiendo inferir la existencia de Sectores subterráneos anómalos.

Posteriormente y una vez identificados los mismos, se lleva a cabo un post-procesamiento efectuando un modelado 2D introduciendo los datos en un algoritmo matemático que transforma, a través de rutinas de inversión aplicando el método numérico de cálculo por elementos finitos y diferencias finitas y aproximación por el método rapid least-squares (Loke and Barker 1996), la pseudosección de resistividades aparentes 2D en una sección de resistividades y profundidades verdaderas 2D, proceso denominado Inversión.

La Inversión de los datos arroja como resultado una “**Imagen de Resistividades y Profundidades Verdaderas**” la que se correlaciona con la información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc., a fin de delimitar, cualificar y cuantificar las anomalías detectadas en profundidad con objeto de lograr una Interpretación coherente en el Diagnostico.

El procesamiento y la interpretación de datos no es un proceso realizado solo por la computadora sin intervención humana, sino que se trata de la interacción hombre maquina debido a que es necesario configurar un programa de calculo de acuerdo a las variaciones de los valores de profundidad y resistividad que puedan obtenerse por otros medios, del conocimiento general del área y de la naturaleza de las anomalías investigadas, además de la experiencia propia de quien ejecuta la tarea de interpretación.

Cabe destacar que resulta improbable mediante las técnicas convencionales de resistividad (Sondeo Eléctrico Vertical, GeoRadar, etc.) la detección de cuerpos de pequeñas dimensiones, especialmente en el caso de ser las mismas delgadas y de somera a media profundidad.

Aplicaciones y Ventajas del Método

En años recientes, se ha producido una tendencia manifiesta hacia el empleo de métodos de resistividad eléctrica en estudios de zonas de geología y anomalías complejas, medio ambiente y proyectos de infraestructura, aplicaciones que están jugando un rol significativamente importante en el mundo moderno.

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Elevada resolución para profundidades someras.
- ✓ La cobertura areal es considerablemente mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos mecánicos, calicatas.
- ✓ Los resultados son presentados en forma tal que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Ingenieros, Geotécnicos u otros especialistas.-

Para cumplir con tales requerimientos todo el proceso de manejo de datos debe ser sistematizado tanto en las etapas de adquisición, procesamiento, interpretación y presentación de resultados, a fin de colectar la mayor cantidad de información posible en el menor tiempo y con la menor probabilidad de error.

Resultados

El resultado obtenido mediante la Técnica de TE es una Imagen Geoeléctrica o Sección de Resistividad de Alta Resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades verdaderas del subsuelo, resultado que puede ser, en la mayoría de los casos, correlacionado y constatado con las observaciones de campo, información geológica, perforaciones, calicatas mecánicas, geoquímica, hidrogeología, edafología, etc.; resultados con cuya Interpretación se llega a las conclusiones del Diagnostico Ambiental.

CASOS HISTÓRICOS DE DIAGNOSTICO AMBIENTAL SUBSUPERFICIAL APLICANDO TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

En adelante se presentan cuatro Casos de Diagnostico Ambiental con sus correspondientes resultados. El objetivo de los mismos fue comprobar la eficacia del Método Geofísica de TE en la modalidad R2D y determinar, mediante esta técnica, la distribución, forma, extensión, y sitios de zonas anómalas.

- ✓ **1: “Diagnostico Ambiental aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica sobre dos piletas tratadas con GeoMembrana”**
- ✓ **2: “Inspección en Cámaras y Drenajes aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica”**
- ✓ **3: “Diagnostico Ambiental en Antigua Represa para Agua Coproducida Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica”**
- ✓ **4: “Diagnostico Ambiental para Detección de una Pluma Contaminante causada por el Derrame Subterráneo de Hidrocarburo por la Rotura de un Oleoducto”**

CASO 1:

✓ “Diagnostico Ambiental aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica sobre dos piletas tratadas con GeoMembrana”

Introducción.

El presente Caso se refiere al Diagnostico Ambiental aplicando la Técnica Geofísica de TE realizado sobre dos piletas tratadas con GeoMembrana donde se almacenaron desechos de tratados por una técnica de Remediación.

El objetivo del mismo fue comprobar la eficacia del Método Geofísica de TE y determinar, mediante esta técnica, la distribución, forma, extensión, y sitios de posibles zonas de filtración por debajo de las piletas. Esto se logra midiendo desde la superficie del terreno, la Resistividad Eléctrica somera del subsuelo con un micro dispositivos con distancias calculadas para tal fin, dando por resultado un total de 2550 mediciones de resistividad aparente.

En el presente trabajo se utilizó el dispositivo Dipolo-Dipolo ya que el mismo posee la característica de tener un gran poder resolutorio y sensibilidad ante la presencia de cambios laterales en el subsuelo a profundidades someras y por ello resulta idóneo para la identificación de plumas contaminantes, además de observar el estado del contorno subterráneo de las piletas.

En este perfil se utilizó una distancia interelectródica $a = 5\text{m}$ y 15 niveles n de medición, conformando una pseudosección con 2550 valores de resistividad aparente, llegando a una profundidad de investigación máxima de 20 metros.

Geología del Área

En general la geología observada en superficie esta compuesta por material aluvional correspondiente a una zona pedemontana de un río de la Cordillera de los Andes.

En el área de estudio, en años anteriores, se construyeron una serie de piletas cavadas en el aluvión sin impermeabilizar y que fueron utilizadas para el vertido de residuos de proceso. Esto provocó una infiltración de los mismos hacia el subsuelo dado el alto grado de permeabilidad del aluvión.

Posteriormente se interrumpió el vertido y los vasos de estas piletas fueron cubiertos con GeoMembrana, donde a posteriori se depositaron los residuos una vez tratados.

Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 1

A partir de la Imagen Geoeléctrica obtenida con TE y los datos de las observaciones en campo se elaboro la Sección A de Resistividad Verdadera del Subsuelo, en la cual y general se observa un amplio rango de los valores de resistividad. Este rango se ha subdividido en cuatro “Sectores” denominados 1, 2, 3 y 4. Cada Sector tiene una característica física distintiva que le confiere una resistividad determinada.

La correlación entre estas características físicas con los valores de resistividad es lo que da como resultado la interpretación Geofísica de cada Sección de Resistividad por TE.

En general se ha observado un corte de resistividad con valores progresivos con un aumento de la misma en profundidad.

Los cuatro Sectores anteriormente citados presentan el siguiente rango de resistividad:

Sector 1, de resistividad baja inferior a 43 ohm.m

Sector 2, de resistividad media entre 43 y 130 ohm.m

Sector 3, de resistividad alta entre 130 y 380 ohm.m

Sector 4, de resistividad alta superior a los 380 ohm.m

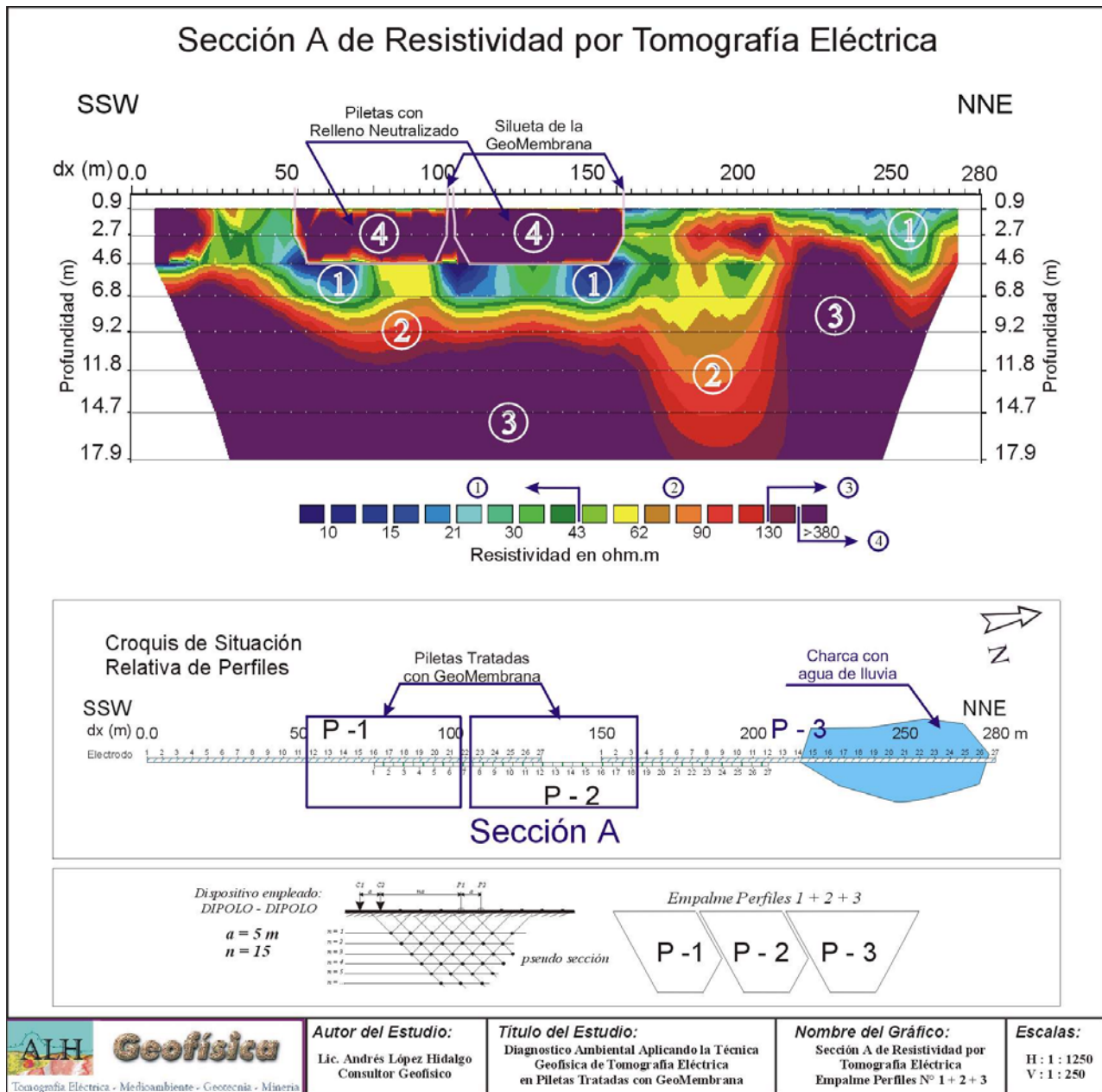


Figura 3: Imagen de Resistividad por Tomografía Eléctrica, Croquis de Situación Relativa de Perfiles y Pseudosección Obtenida por Empalme de Perfiles.

La correlación Geofísica con los primeros datos aportados y las observaciones de campo se corresponden a:

Sector 1, zona filtrada originalmente por los vertidos, actualmente con infiltración de agua de lluvia desde la superficie y concentración de sales por procesos de bioremediación que le confiere un carácter conductivo.

Sector 2, zona de transición entre la anterior y la zona profunda de aluvión limpio, estaría parcialmente infiltrada por la adsorción de desechos aún no bioremediados totalmente.

Sector 3, zona de Aluvión profundo limpio con probabilidad de menor concentración de hidrocarburo por adsorción o impregnación.

Sector 4, zona de piletas revestidas con GeoMembrana de resistividad muy alta atribuido a los neutralizantes utilizados de origen carbonático (Calizas y/o Dolomías).

En esta Imagen Geoeléctrica se destaca la silueta de las piletas con GeoMembrana entre las distancias dx 50 y 160 metros, con una profundidad máxima de 4.6 metros que refleja la alta resolución del método de Tomografía Eléctrica.

Es de destacar los Sectores “1” debajo de las piletas, lo que nos indicaría el correcto funcionamiento de la GeoMembrana impermeable, además se observa una progresiva concentración de sales que le infieren al Sector características conductivas. Se destaca también el Sector 1 entre la dx 230 y 280 m, correspondiente a la filtración de agua de lluvia acumulada en la charca observada en superficie. En general en toda la sección se tiene la presencia del Sector 2 con una profundización de 17 m a los 190 m de dx.

El Sector 3 se observa en todo el perfil, con profundidades someras (menos de 4 m) a los 230 m, y con la mayor profundidad (18 m) en la dx 190 m.

El Sector 4 se a interpretado para el contenido de material neutralizado contenido por las piletas cuya resistividad es muy alta superior a los 380 ohm.m.

Conclusiones Caso 1

Podemos decir que a través de la Técnica de TE se han podido identificar cuatro Sectores resistivos diferenciados.

La Imagen Geoeléctrica proporcionada por las piletas con GeoMembrana da fiel reflejo de la exactitud y la alta resolución del Método de Tomografía Eléctrica.

Los Sectores “1” observados en las Imágenes Geoeléctricas se correlacionan directamente con la infiltración de agua de lluvia desde superficie, las charcas y la concentración de sales por procesos de bioremediación natural que le conferirían un carácter más conductivo al subsuelo impregnado de desechos.

El Sector 3 (resistivo) observado en la Imagen Geoeléctrica se correlaciona directamente con el aluvión limpio en profundidad.

El Sector 2 observado en la Imagen Geoeléctrica se presentan como una zona de transición entre las dos anteriores.

El Sector 4 (muy resistivo) corresponde al material neutralizado contenido por las piletas, cuya resistividad es superior a los 380 ohm.m.

CASO 2:

✓ “Inspección en Cámaras y Drenajes aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica”

Introducción.

El presente Caso se refiere a los resultados obtenidos de la Inspección en Cámaras y Drenajes aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica.

El objetivo del mismo fue determinar, mediante esta técnica, la distribución, forma y extensión de posibles zonas de filtración, provocada por la fuga de líquidos en las Cámaras y Cañerías de Hormigón en los Drenajes y Colectores. Para ello se utilizó el dispositivo Wenner–Schlumberger ya que posee un gran poder resolutivo y alta sensibilidad ante la presencia de cambios laterales y verticales en el subsuelo a profundidades someras, por ello resulta idóneo para la identificación de filtraciones y fugas.

Para este Dispositivo se utilizaron distancias interelectródicas “a” = 1 y 2 metros y 10 y 7 niveles “n” de medición, conformando pseudosecciones de alta resolución con 267 valores de resistividad aparente, lo que permitió cubrir un total de 26 m lineales (dx) y llegar a una profundidad de investigación máxima de 4 metros.

Geología del Área

En general la geología observada en superficie esta compuesta por material aluvional correspondiente a una zona pedemontana de un río de la Cordillera de los Andes. Se destaca que el mismo ha sido removido para la construcción de los Drenajes con la correspondiente alteración de sus propiedades físicas naturales. En otros casos se ha parquizado la superficie con una delgada capa de unos 20 cm de suelo con gramíneas.

Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 2

A partir de las Imágenes Geoeléctricas de Resistividad por TE y los datos de las observaciones en campo se han elaborado tres figuras.

En general y en las tres Imágenes de Resistividad Verdadera del Subsuelo se observan rangos variables de los valores de resistividad. Dentro de este rango se encuentran las anomalías de interés que se describen para cada figura. La correlación entre las características físicas con los valores de resistividad es lo que da como resultado la interpretación Geofísica de cada Imagen de Resistividad por TE.

Se adjunta en cada figura un croquis de situación relativo de cada Perfil de TE a las Cámaras y Cañerías correspondientes y fotos tomadas después de la excavación.

Imágenes de TE en la Cámara C2. Perfil_TE_4 y Perfil_TE_5.

En general y en las dos Imágenes de Resistividad Verdadera del Subsuelo se observa un rango de valores que ha sido acotado entre los 30 a 114 ohm.m para ambos perfiles. Sobre las imágenes de resistividad se puede apreciar la proyección ortogonal de la Cámara y Cañería de Hormigón Comprimido.

De la interpretación de estas Imágenes se ha indicado una zona de alta resistividad, superior a los 114 ohm.m, que se corresponde al aluvión limpio del Piedemonte.

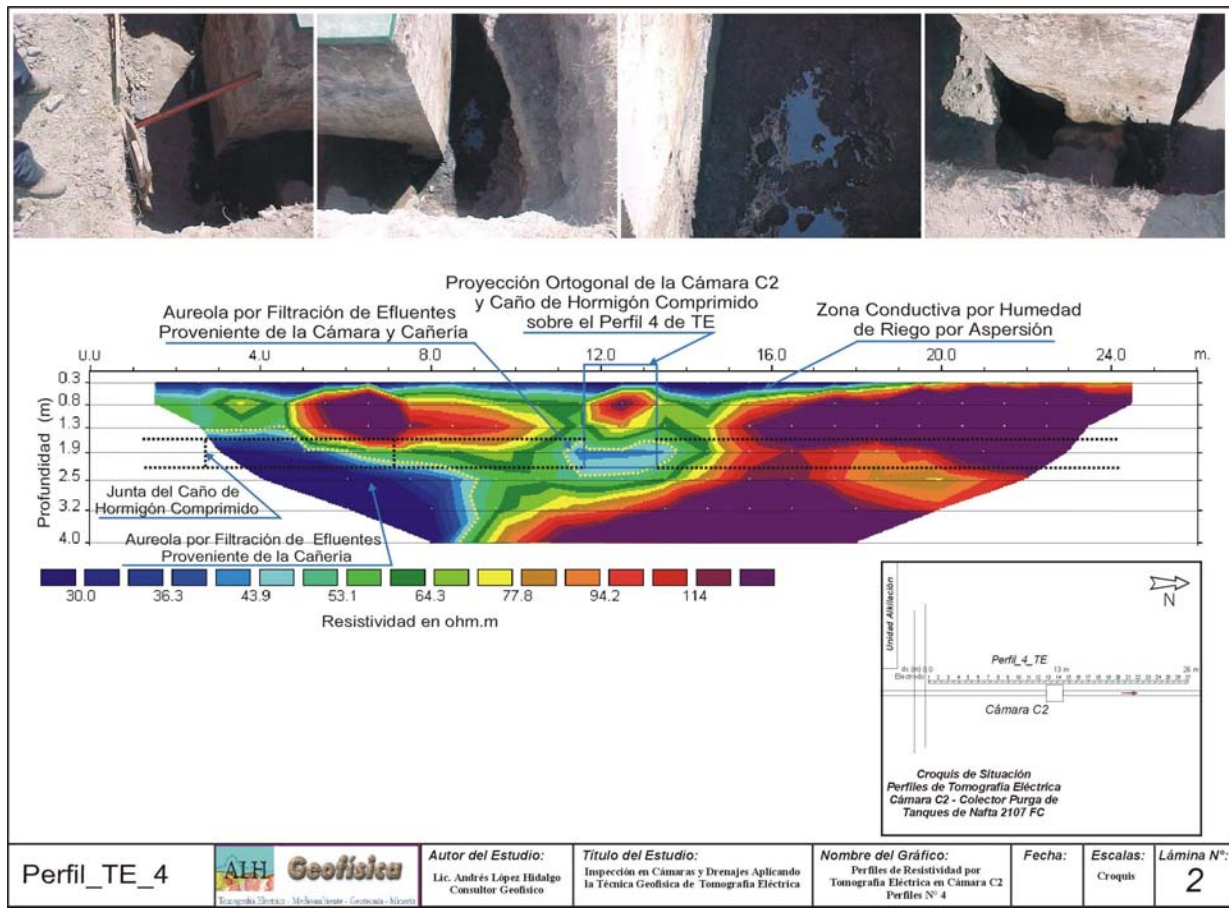


Figura 4: Imagen de Resistividad por Tomografía Eléctrica, Croquis de Situación Relativa del Perfil y Cámara. Fotos después de la excavación.

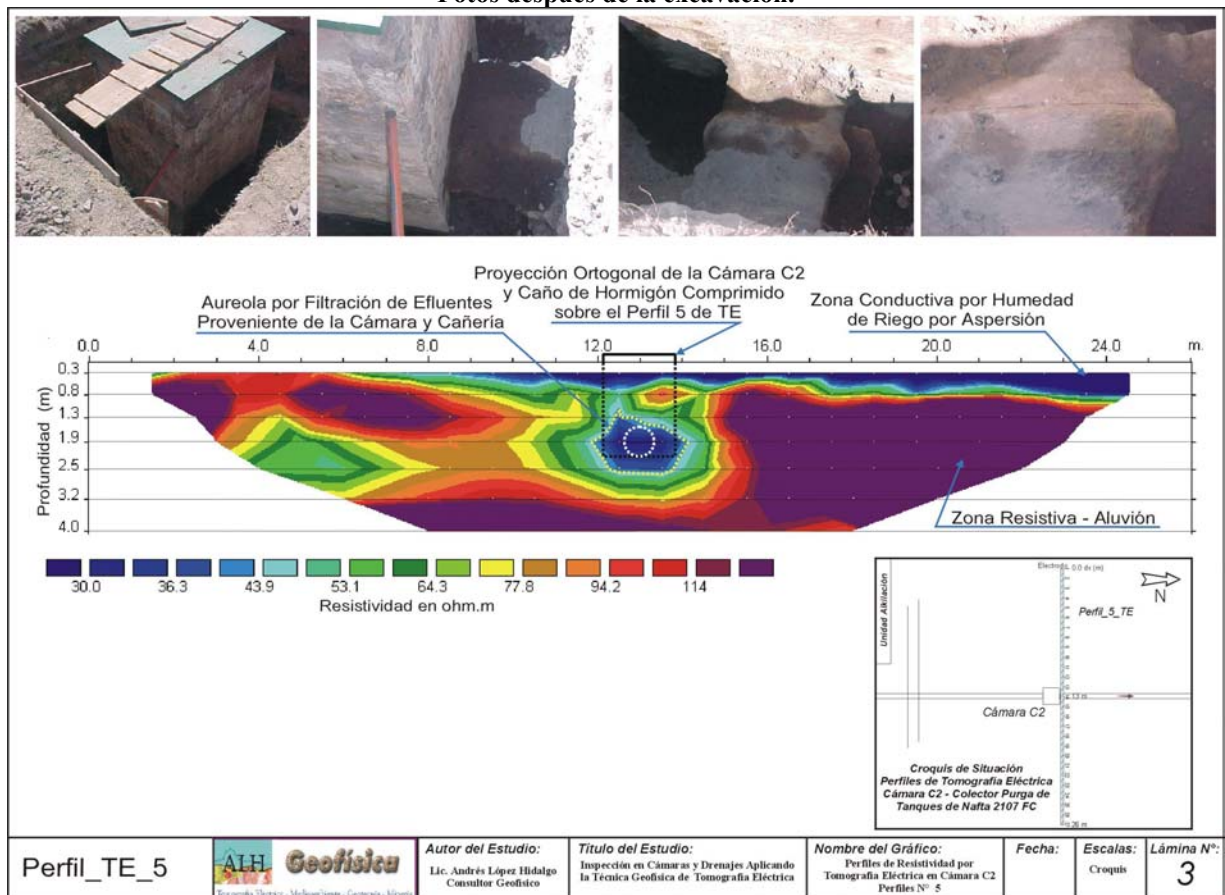


Figura 5: Imagen de Resistividad por Tomografía Eléctrica, Croquis de Situación Relativa del Perfil y Cámara. Fotos después de la excavación.

En ambas Imágenes se destaca notablemente la anomalía indicada con línea de puntos (entre los 11 y 14 m de distancia horizontal dx y entre los 1.9 y 2.5 m de profundidad y entre los 12 y 14 m de dx y entre los 1.3 y 2.5 m de profundidad, para los Perfiles_TE 4 y 5 respectivamente).

Esta anomalía, de carácter conductivo inferior a los 44 ohm.m, esta vinculada a la Cámara C2 por la fuga de efluentes de hidrocarburo; estos efluentes y por la actividad bacterial del lodo presenta un carácter conductivo que permite diferenciarlo del medio que lo rodea; nótese que en la vecindad de la misma no se observan valores resistivos de aluvión sino valores entre 44 ohm.m y 100 ohm.m, por lo que esta anomalía esta vinculada a la Cámara C2 por la misma fuga y filtración de menor intensidad. Las fotos muestran la evidencia de estas fugas en la Cámara C2.

En el Perfil_TE_4 también indicada con línea de puntos (entre los 2 y 9 metros de dx y entre los 1.3 y 4 metros de profundidad) se observa una gran anomalía conductiva inferior al los 43.9 ohm.m que se corresponde a una fuga y/o filtración de efluentes proveniente de la junta de la Cañería de Hormigón Comprimido.

En superficie se destaca a menos de 0.8 m de profundidad una zona de valores inferiores a los 44 ohm.m entre los 2 y 18 m de dx para el Perfil_4 y entre los 8 y 24 m de dx para el Perfil_5, esto se corresponde al parquizado húmedo y “verde” de acuerdo a lo observado en campo, no así en el resto de los dos perfiles que se encuentra seco y “amarillo” por la misma analogía de resistividades.

Imagen de TE entre Cámaras y sobre Caño de Hormigón Comprimido. Perfil_TE_6.

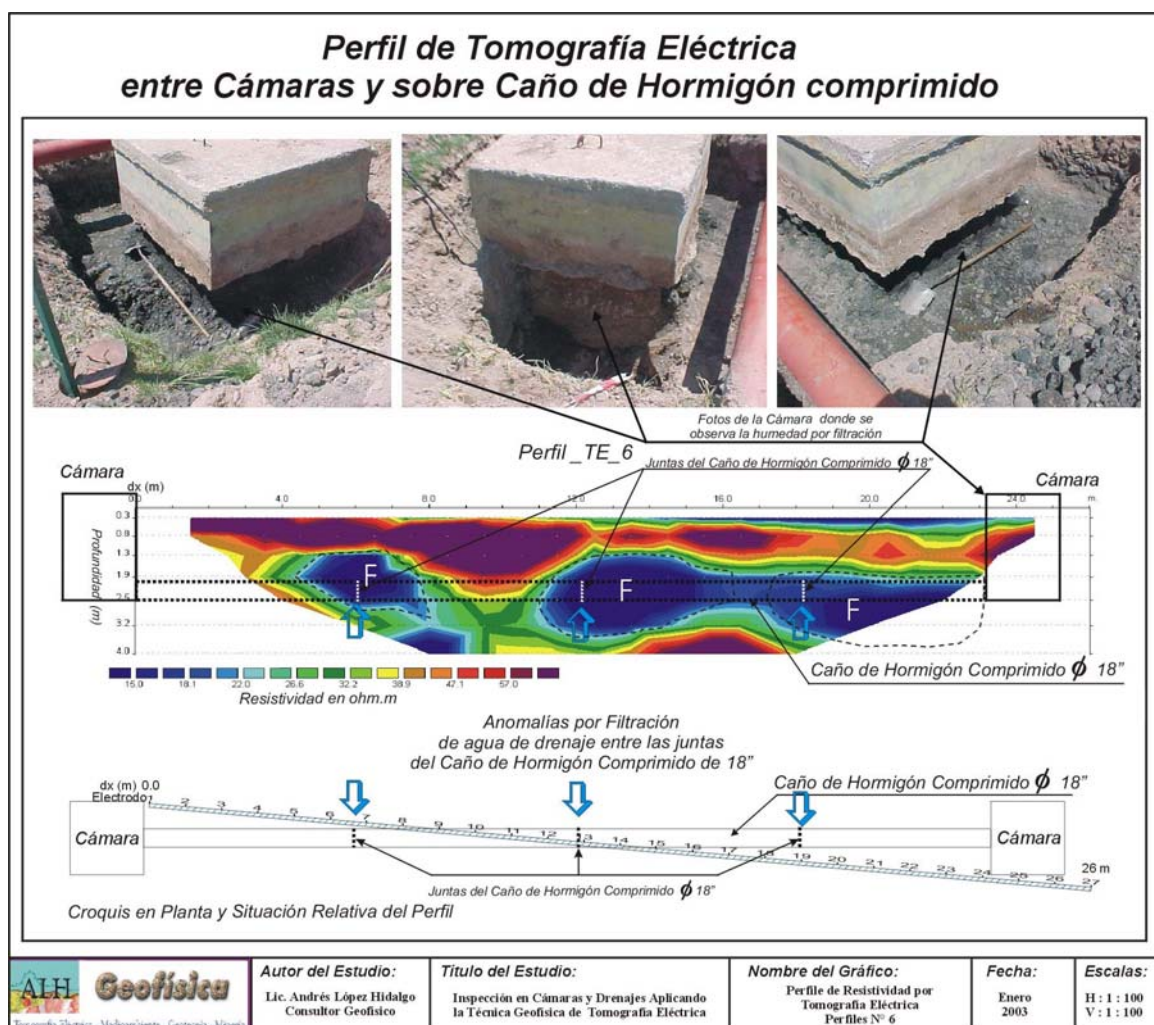


Figura 6: Imagen de Resistividad por Tomografía Eléctrica, Croquis de Situación Relativa del Perfil y Cámara. Fotos después de la excavación.

Este perfil se realizó entre dos cámaras cruzando en forma “alabeada” la proyección de la cañería de hormigón comprimido de 18 “ tal como se ilustra en los croquis adjuntos a la figura, esto se debió a que se quiso medir directamente sobre el caño pero la distancia entre cámaras es de 23 m y la longitud del dispositivo es de 26 metros.

De la interpretación de esta Imagen se han indicado con la letra “F” tres zonas conductivas inferiores a los 43.9 ohm.m que se corresponden a las fugas o filtraciones de efluentes provenientes de las juntas de la Cañería de Hormigón Comprimido las que se han graficado con líneas de puntos blancas. Las fotos muestran la presencia de estas fugas en la Cámara de la derecha.

Así mismo las anomalías resistivas observadas a lo largo del Perfil_TE_6 por encima de los 1.5 m corresponden a alteraciones superficiales producto de la remoción del aluvión para la construcción de la zanja y posterior relleno.

Se destaca en superficie, a menos de 0.6 m de profundidad, una zona de valores inferiores a los 22 ohm.m entre los 12 y 24 m para el Perfil_TE_6, esto se corresponde de acuerdo a lo observado en campo al parquizado húmedo y “verde”, no así en el resto del perfil que se encuentra seco y “amarillo” por la misma analogía de resistividades

Conclusiones Caso 2

De la interpretación de las imágenes en los Perfiles_TE_4 y 5 de la Cámara C2, se ha indicado una zona de alta resistividad, superior a los 114 ohm.m, que se corresponde al aluvión limpio del piedemonte.

La anomalía indicada en el Perfil_TE_4 entre los 12 y 18 m por debajo de los 2.5 m de profundidad esta vinculada a la Cámara C2 por la fuga de efluentes; nótese que en la vecindad de la misma no se observan valores resistivos de aluvión sino valores entre 44 ohm.m y 100 ohm.m, por lo que esta anomalía al estar vinculada a la Cámara C2 no sería reciente sino que dataría de hace un tiempo ya que los procesos naturales de degradación (biodegradación) normalmente bajan la resistividad de las áreas afectadas confiriéndole un aspecto relativamente conductivo. Las fotos muestran la evidencia de estas anomalías en la Cámara C2.

En el Perfil_5 y sobre la proyección ortogonal de la Cámara sobre la imagen de resistividad se destaca notablemente entre los 12 y 14 m y a 2.5 m de profundidad, la anomalía producida por el caño y el fondo de la zanja, donde se observa una anomalía conductiva relacionada con la fuga y filtración desde la Cámara C2. Las fotos muestran la evidencia de estas anomalías en la Cámara C2.

En la imagen del Perfil_TE_6 entre Cámaras se han indicado con la letra “F” tres zonas conductivas inferiores a los 43.9 ohm.m que se corresponden a las fugas o filtraciones de efluentes provenientes de las juntas de la Cañería de Hormigón Comprimido las que se han graficado con líneas de puntos blancas. Las fotos muestran la presencia de estas fugas en la Cámara de la derecha.

De los Perfiles_TE_4, 5 y 6, se destacan en superficie a menos de 0.8 m de profundidad, zonas de valores entre 7 y 35 ohm.m, estas corresponden de acuerdo a lo observado en campo al parquizado húmedo y “verde”, no así en el resto de los perfiles que se encuentra seco y “amarillo” por la misma analogía de resistividades

CASO 3:

✓ “Diagnostico Ambiental en Antigua Represa para Agua Coproducida Aplicando la Técnica Geofísica de Tomografía Eléctrica”

Introducción.

El presente Caso se refiere a los resultados obtenidos del Diagnóstico Ambiental Aplicando la Técnica Geofísica de TE en una antigua Represa de Tierra para el vertido de agua Coproducida y desechos de hidrocarburos.

El objetivo del mismo fue determinar, mediante la técnica Geofísica de TE, la distribución, forma y extensión de anomalías resistivas / conductivas, provocadas por la infiltración de agua Coproducida en la base de Roca además de comprobar el comportamiento del relleno de tierra.

Para ello se han realizado un total de 11 perfiles 2D de TE con el micro dispositivo Wenner-Schlumberger con distancias calculadas para tal fin, dando por resultado un total de 2937 mediciones de resistividad aparente.

Geología del área. Descripción General

En General la Geología observada corresponde a rocas sedimentarias correspondientes a la Serie Amarilla. Actualmente a la Serie Amarilla se la homologa con la Formación Río Los Pozos (Relatorio de Recursos Naturales de Mendoza) y está integrada por: Conglomerado basal al que se lo denomina conglomerado violáceo (no siempre es visible) está constituido por rodados pequeños (no más de 2-3 cm) de rocas volcánicas mezcladas con areniscas y arcillas de tonos violáceos (de allí su nombre) (Bessone J.L. 1996).

Siguen areniscas, arcillas y conglomerados poligénicos (de variado tamaño y litología) con intercalaciones de tobas y areniscas grisáceas. Este conjunto es de tonos amarillentos, bayos y rojizos. En general se presenta con espesores variables entre unos 500 y más de 700m aunque se estima que puede superar los 3.500 m.

En el área forma parte del anticlinal de Lulunta-Barrancas-Carrizal; en la zona del Yacimiento Barrancas sobre el sector oriental se halla con buzamiento variable entre unos 5 a 10° hasta alcanzar la verticalidad. Este sitio se lo aprovecha para construir las represas donde se deposita el agua Coproducida, dado que como es una roca compacta y cementada su porosidad primaria es reducida (de origen sedimentario al momento de depositarse) ha disminuido notablemente y se la considera de baja permeabilidad general a pesar de que por acción tectónica e intemperismo pueda contener permeabilidad secundaria, es decir por presencia de fisuras, fracturas, diaclasas, etc.

Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 3

A partir de las Imágenes Geoelectricas obtenidas y los datos de las observaciones en campo y de Geología, se han elaborado dos Figuras con la situación relativa de los Perfiles y las Imágenes de Resistividad Representadas Tridimensionalmente.

En la figura 7 se ha representado esquemáticamente la situación relativa de los once perfiles de TE. También se reproduce la situación del cordón de Roca aflorante en forma de “V” al suroeste y sureste del área. Además se han representado los límites aproximados de la Represa de Tierra al nordeste y noroeste de la misma.

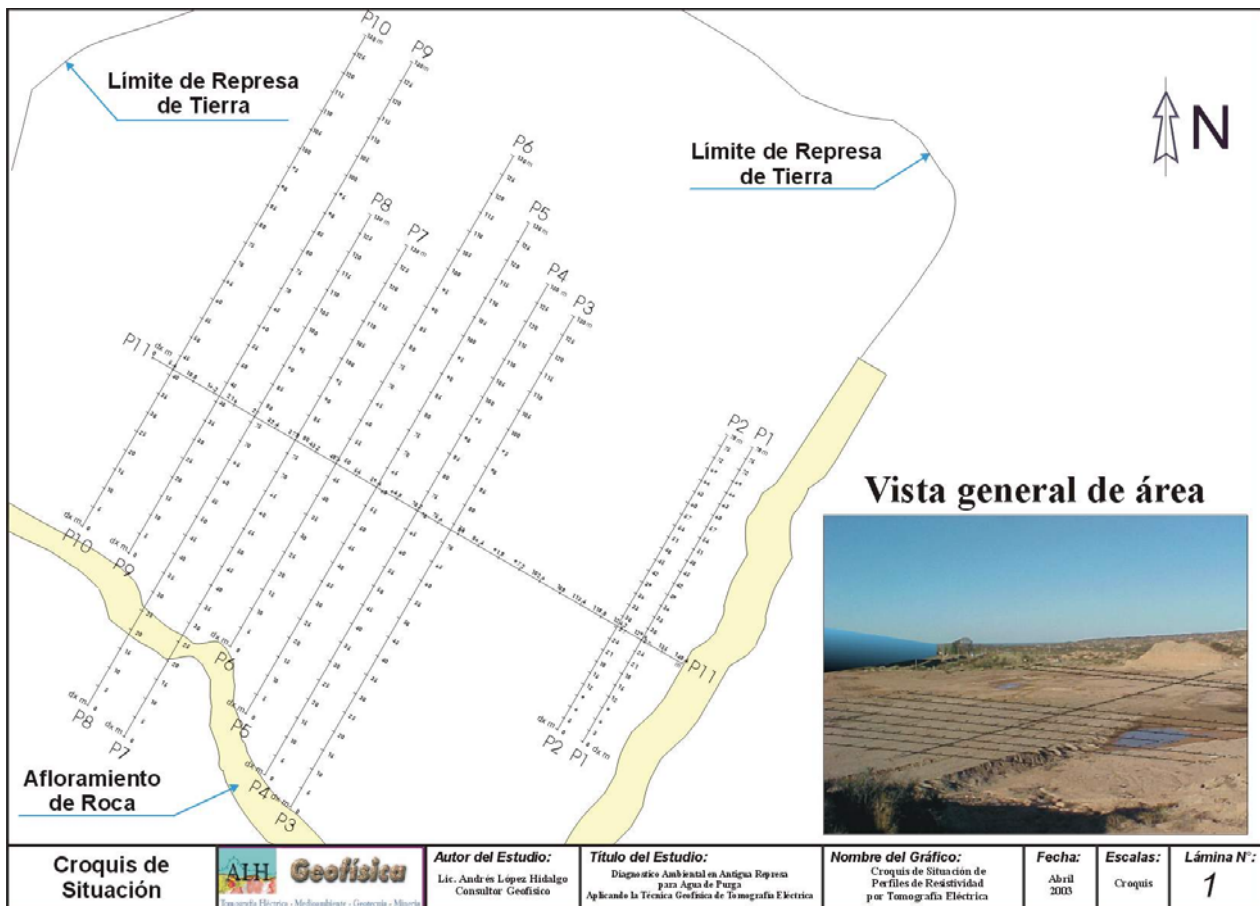


Figura 7: Croquis de Situación de Perfiles de Tomografía Eléctrica y afloramiento rocoso. Foto del Área.

En general y en todos los Perfiles de Resistividad Verdadera del Subsuelo se observa un restringido rango de los valores de resistividad que va de valores inferiores a 2.5 ohm.m a valores superiores a 5 ohm.m.

Para la interpretación de todas estas Imágenes se han establecido tres sectores a saber:

Sector “1”: correspondiente al Basamento de Roca Inalterada compuesto de Areniscas, Arcillas y Conglomerados Poligénicos, Compacto y Cementado, el cual se encontraría NO Salinizado, dado los valores de resistividad superiores a los 5 ohm.m correspondiente a roca con porosidad primaria reducida y en general de baja permeabilidad. Este sector se observa con profundidad variable detectándose el valor máximo a 13 metros, este sector se presenta aflorante y subaflorante en el inicio de los perfiles entre los primeros 10 y 20 metros de dx de acuerdo a la situación de los mismos junto y sobre el afloramiento de roca.

Sector “2”: Por encima del nivel anterior se observa este sector que corresponde tanto a basamento de roca alterado como a relleno compuesto de areniscas, arcillas, conglomerados y tierra suelta, húmedo y salinizado. Esto sería posible dada la presencia de porosidad secundaria en la roca basal, es decir por la aparición de fisuras, fracturas, diaclasas, etc., además de la salinización por infiltración del relleno que se utilizara para la nivelación del fondo de la represa al momento de la construcción. Lo anterior se interpreta dado el bajo valor de resistividad, inferior a los 2.5 ohm.m y por la profundidad del piso de la misma NO superando en ningún caso los 15 metros.

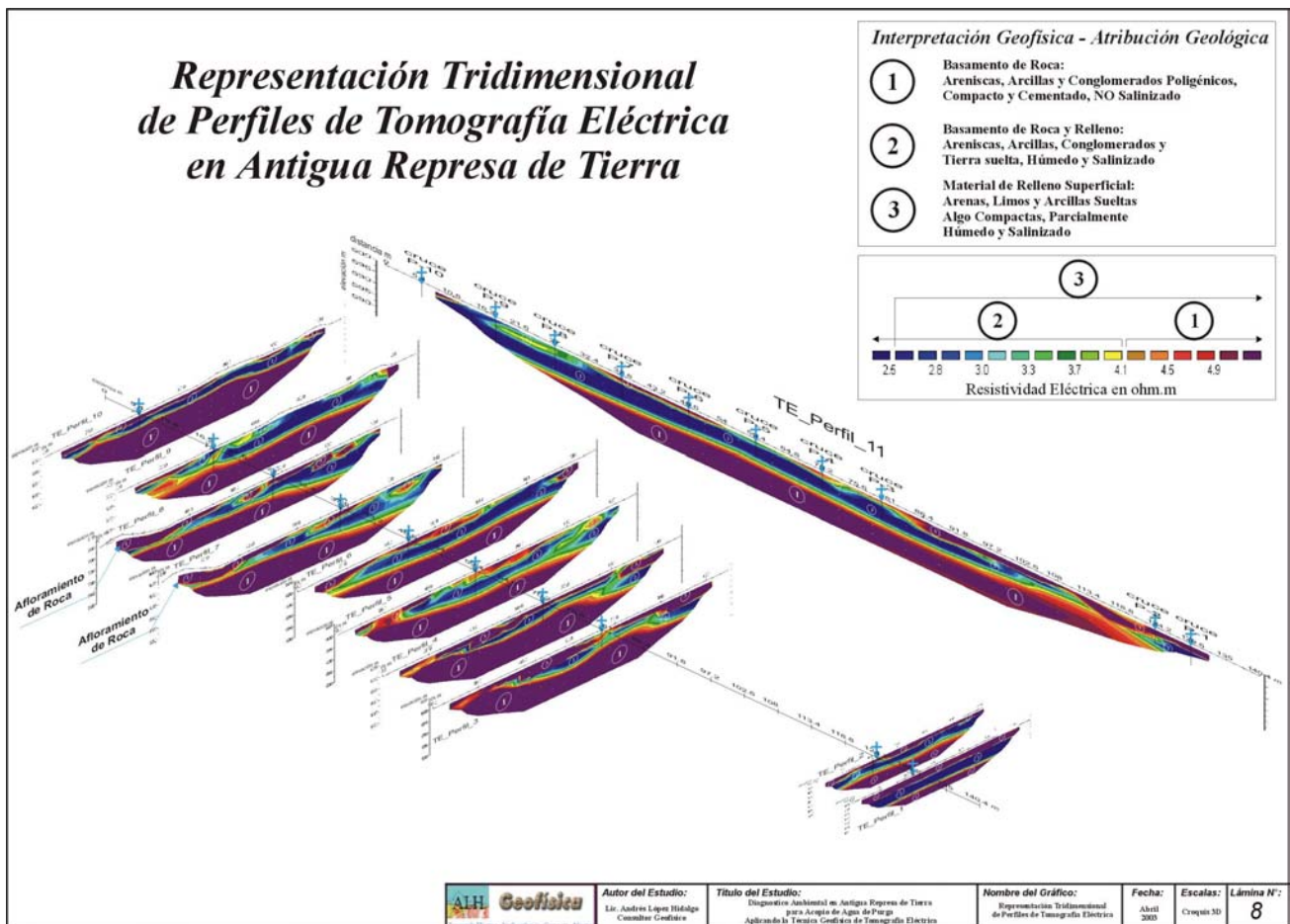


Figura 8: Representación Tridimensional y situación relativa de Perfiles de Tomografía Eléctrica.

Sector “3”: En superficie y cubriendo toda el área tenemos este sector que corresponde a material de relleno superficial compuesto de arenas, limos y arcillas sueltas algo compactas, parcialmente húmedo y salinizado. Su rango resistivo es muy amplio y abarca toda la gama de resistividades detectadas. El espesor de esta capa es casi constante en toda el área con un valor de aproximadamente 4 metros. Esto nos permite inferir que las zonas conductivas en el sector “3”, que se tienen por encima de los 4 metros, pertenecen al material de relleno el que ha sido salinizado por posible capilaridad ascendente desde el sector denominado “2”, además de la disminución de la resistividad por el contenido de humedad aportado desde superficie por agua de lluvia mezclado con las sales propias del material de relleno.

Dado que las Imágenes de resistividad en el área bajo estudio son similares, se utilizan las mismas denominaciones para los tres sectores (“1”, “2” y “3”) y para la interpretación de todos los perfiles haciendo alusión solo al “sector”.

Conclusiones Caso 3

Podemos decir que a través de la Técnica Geofísica de TE se ha podido identificar en toda el área un sector anómalo muy conductivo por encima de la base de Roca inalterada denominado sector “2”, el cual corresponde a la filtración de agua Coproducida, destacándose que el mismo se produce por la porosidad y permeabilidad secundaria de la roca y la filtración de agua en el material de relleno para nivelación del fondo de represa.

La Base de Roca inalterada queda claramente definida en todos los perfiles, pudiendo verificar la eficacia de la Represa para la contención de agua Coproducida, de modo que esta queda encapsulada entre el basamento y el relleno superficial.

El espesor de relleno superficial se detectó correctamente a los 4 metros en el borde suroeste de la Represa por la información suministrada por el Perfil_TE_1. En general este relleno presenta valores altos de resistividad por tratarse de material poco compacto, pero en partes se encuentra con valores bajos (conductor) dado que ha sido salinizado por capilaridad ascendente desde el sector denominado “2”, además de la disminución de la resistividad por el contenido de humedad aportado desde superficie por agua de lluvia mezclado con las sales propias del material de relleno.

CASO 4:

✓ “Diagnostico Ambiental para Detección de una Pluma Contaminante causada por el Derrame Subterráneo de Hidrocarburo por la Rotura de un Oleoducto”

Introducción.

El presente Caso se refiere al Estudio Geofísico-Geoquímico-Ambiental realizado en una zona de rivera en el que se encuentra una cañería de hierro de transporte de Hidrocarburo.

El objetivo del mismo fue determinar, mediante la Técnica de Tomografía Eléctrica, la forma, extensión, concentración y sitios de máximo espesor de la pluma contaminante provocada por la invasión subterránea de hidrocarburos, producto de la rotura del oleoducto.

Esto se logró midiendo la resistividad eléctrica somera del subsuelo a través de perfiles de Tomografía Eléctrica, con el micro dispositivo Dipolo-Dipolo con distancias interelectrónicas calculadas para tal fin.

Descripción General del Área. Geología.

En general la geología observada en superficie esta compuesta por areniscas con intercalaciones de limos y arcillas. Estas se observaron aflorantes y muy erosionadas en la barranca oeste del área de estudio. Por ser una zona de frecuentes precipitaciones, la erosión produce cárcavas de mas de un metro de profundidad sobre las paredes de esta generando deslizamientos hacia la zona de bajas pendientes.

Modelo dinámico de masa

De acuerdo a las observaciones hechas en campo se observó una gran acumulación de sedimentos muy recientes (20 a 25 años) producto de la erosión generada en la barranca descrita en el párrafo anterior.

Dichos sedimentos compuestos mayoritariamente por arenas y limos se desplazaron gradualmente por la quebrada hacia el este, acumulándose en la confluencia con el arroyo que proviene del norte y que drena sus aguas hacia el sur.

Dicha acumulación alcanza mas de 6 metros de espesor sobre el oleoducto, quedando este sepultado en un tramo de unos cien metros de longitud.

Por otra parte es de destacar que los niveles de agua del Río se incrementan en la temporada estival cubriendo la zona de estudio con mas de 5 metros, con lo cual se produce un fenómeno de movilización de masa de los sedimentos de fondo, efecto similar al de los glaciares, es decir la masa de sedimentos sueltos y saturados se moviliza por efecto gravitatorio hacia las zonas de menor pendiente. Podemos afirmar que este fenómeno sumado a la carga vertical sobre el oleoducto produjo la rotura del mismo en algún punto de este.

Posteriormente se produjo la infiltración del hidrocarburo en la masa de sedimentos sueltos por encima del mismo lo que provocó la contaminación subterránea.

Puesto que el nivel del Río es variable a lo largo del año y dado que los trabajos se hicieron antes de la temporada estival, se pudo investigar la zona en la época de mínimos.

Nivel Freático dinámico

Se destaca que la zona de estudio en la época del año de mínimos deja al descubierto una gran extensión de terreno, parte suelo seco y firme y parte suelo muy saturado intransitable (lodos). En esta zona se pudo observar el dinamismo de la freática. Se tuvo la oportunidad de observar que con la precipitación de solo un día fue suficiente para que la freática aflore en el área de trabajo. Este fenómeno dinámico hace que la resistividad medida para los puntos superficiales cambie (aumenten) a medida que se produce el drenaje posterior (disminución del nivel freático). Esto se observa claramente al comparar los perfiles 1 y 3 medidos en la misma zona y con distinto nivel freático.

Comportamiento de la Pluma Contaminante

Además de lo mencionado en el punto anterior y haciendo referencia al nivel freático podemos afirmar que los restos de hidrocarburos sobre nadantes (Pluma Contaminante) tienen movilidad vertical en toda el área de arenas limpias no confinadas, no así en sectores donde la presencia de arcillas y limos producen confinamiento de la freática y hacen que el sobrenadante de hidrocarburo se vea forzado a migrar lateralmente hacia zonas donde luego se produce la emersión en forma de pequeñas gotas como las observadas en la laguna norte.

De la evaluación general de los datos la Pluma Contaminante producida por los restos de hidrocarburo presenta valores de resistividad mayores a su entorno en la zona de sedimentos sueltos, presentando un contraste resistivo lo que permitió su clara identificación.

Resultados de la Tomografía Eléctrica Caso 4

A partir de las Imágenes Geoeléctricas obtenidas con Tomografía Eléctrica, los datos de observaciones en campo y los resultados de laboratorio de las muestras tomadas con la sonda de detección de contaminantes en el suelo Dräger, las que muestran el contenido de Hidrocarburo Total expresados en mg/Kg versus profundidad, se han elaborado tres Figuras.

En general se ha observado un corte de resistividades con valores progresivos con un fuerte aumento en profundidad, observando en toda el área una resistividad para el basamento de mas de 3000 ohm.m. Sobre este se apoyan los sedimentos sueltos contaminados (arenas, limos y arcillas) con resistividades en general inferiores a los 200 ohm.m

Imagen de TE y Gráficos de HCT. Perfil TE_1 Figura 9.

Este perfil se realizó con una distancia interelectrónica “a” igual a 3 metros y 15 niveles “n” de medición, lo que nos permitió llegar a una profundidad de investigación máxima de 12 metros.

En esta Imagen se observa claramente un cuerpo de resistividad mayor a los 200 ohm.m situado entre los electrodos 11 y 16 y entre 1 y 5 metros de profundidad que corresponde al núcleo de la infiltración subterránea de hidrocarburo, es decir sería el centro de la Pluma Contaminante dado que debajo de esta y entre los electrodos 14 y 15 se encontraría el ducto.

De la información de los Dräger se destaca en primer lugar la exacta coincidencia de la Imagen de Tomografía Eléctrica y los valores en mg/Kg de HTC del Dräger N° 13, el cual presenta valores entre 584 y 16300 mg/Kg, siendo este ultimo el máximo valor medido del total de las muestras extraídas con Dräger.

En este perfil se presentan también los Dräger N° 12 y 16 proyectados sobre el perfil, los que dieron valores entre 61 y 78 mg/Kg.

A la derecha del perfil entre los electrodos 23 y 25 se observa la Imagen una anomalía resistiva que corresponde a filtración local de agua del arroyo que proviene de la quebrada norte del área.

En todo el perfil se tiene un basamento de areniscas resistivas que afloran a la derecha (electrodos 26 y 27) el cual tiene una profundidad variable, detectándose el máximo a una profundidad de 8.9 m y resistividad superior a los 250 ohm.m.

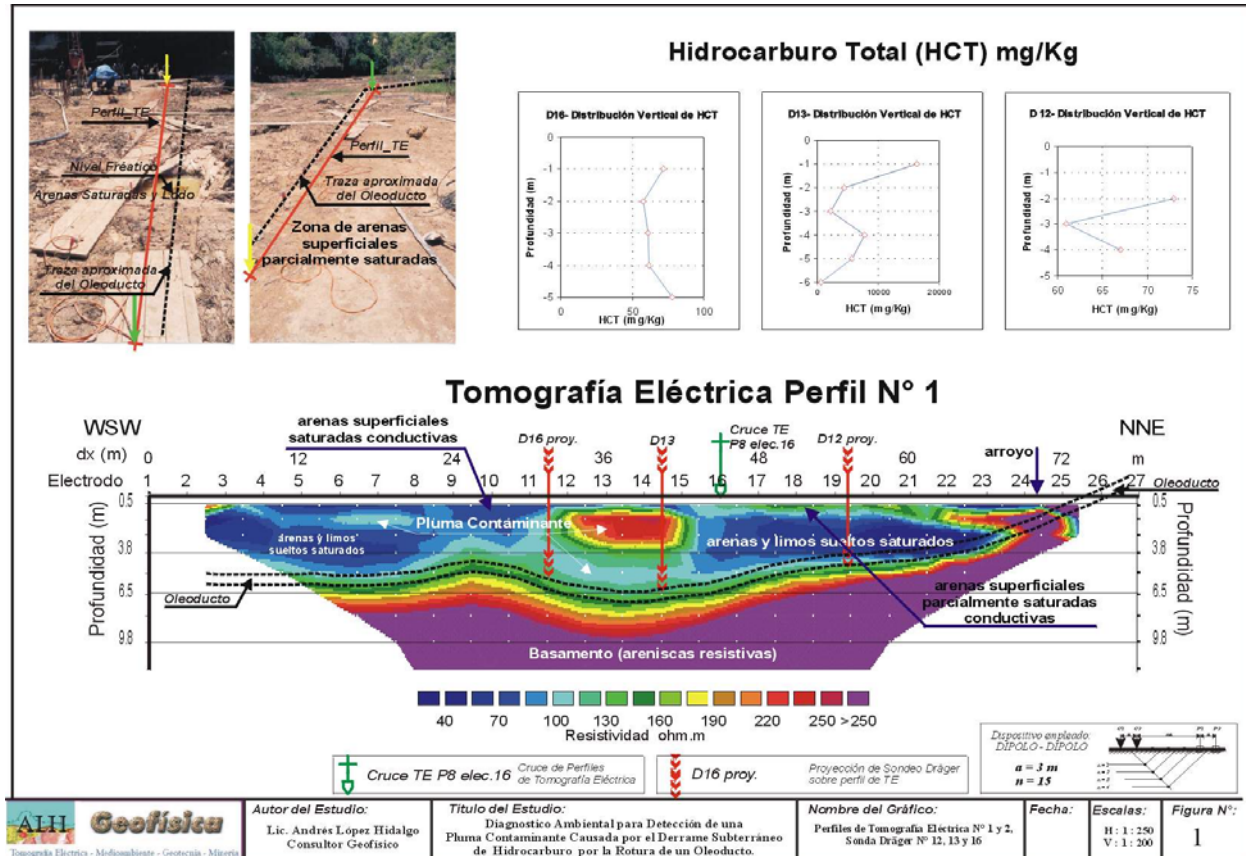


Imagen de TE y Gráficos de HCT. Perfil_TE_3 Figura 10.

Este perfil se realizó con una distancia interelectrónica “a” igual a 1.5 metros y 15 niveles “n” de medición, lo que nos permitió llegar a una profundidad de investigación máxima de 6 metros.

En este perfil se destaca el basamento resistivo (areniscas) que aflora a la izquierda del mismo y se profundiza hacia la derecha con una resistividad superior a los 240 ohm.m

Por encima del basamento se tienen las arenas y limos sueltos saturados. Estas presentan una variabilidad en su resistividad vertical debido a que en los primeros 0.5 m a 1.2 m se encuentran secos (o muy drenados), concepto ya enunciado e párrafos precedentes, lo que hace que eleven su resistividad en esta zona (resistividad superior 150 ohm.m). No podríamos asegurar que esto se deba a una contaminación de esta zona del perfil ya que de las observaciones de campo no se tienen datos que revaliden esta hipótesis.

Por debajo de la anterior se observa en la Imagen Geoeléctrica una zona que corresponde a las arenas y limos sueltos saturados los que están comprendidos entre los 30 a 160 ohm.m, dentro de ella se presume que la anomalía ubicada debajo del electrodo 17 entre los 1.5 y 2.5 m, correspondería a la Pluma Contaminante ya que esta aumenta su resistividad por encima de los 90 ohm.m, igualmente ocurre algo similar entre los electrodos 21 y 23 entre los 0.5 y 2 m.

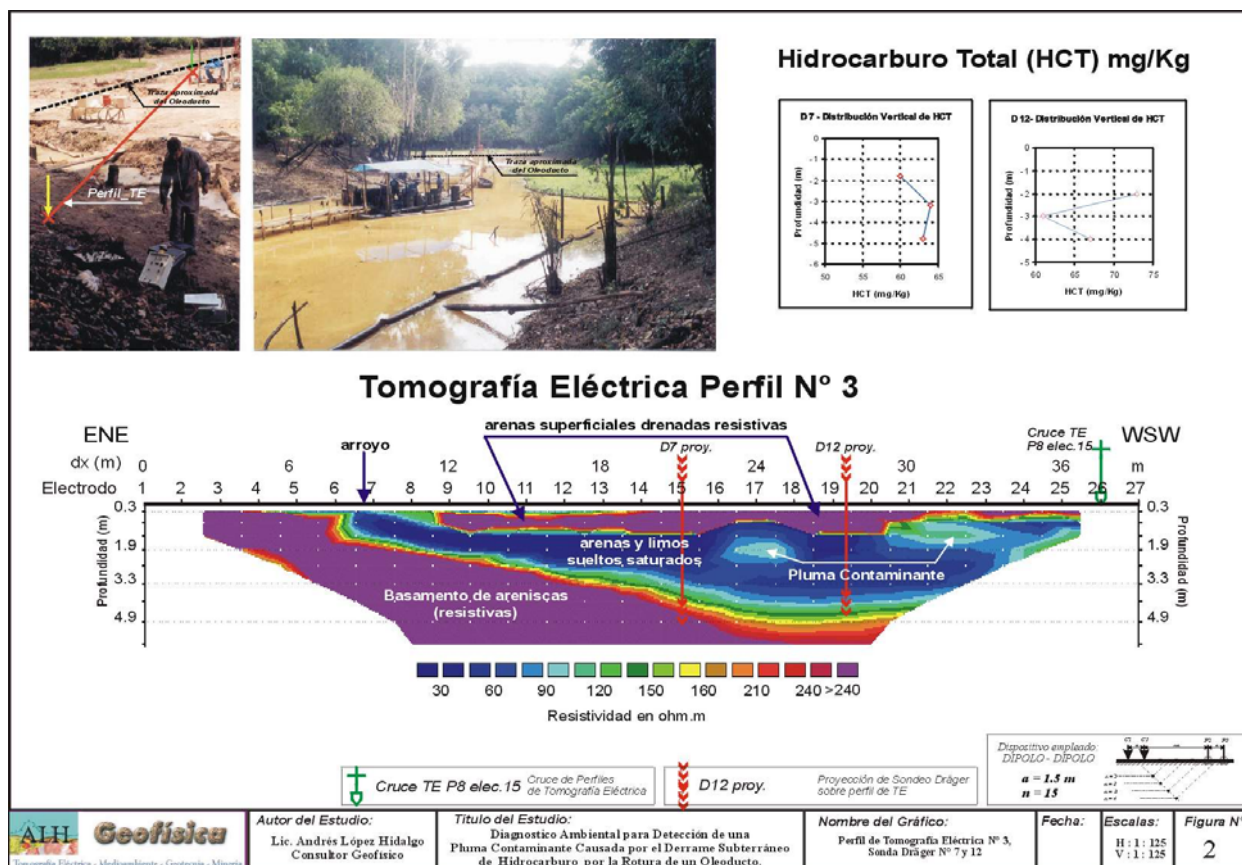


Figura 10: Imagen Perfil de Tomografía Eléctrica N 3 y Gráficos de Hidrocarburo Total / profundidad expresados en mg/Kg obtenidos con sonda Dräger.

De la información suministrada por los análisis de las muestras Dräger se deduce que las arenas y limos saturados se encuentran contaminados entre los 2 y 5 m con tenores entre los 60 y 75 mg/Kg.

Imagen de TE y Gráficos de HCT. Perfil TE_3 Figura 11.

Este perfil se realizó con una distancia interelectrónica “a” igual a 1.5 metros y 15 niveles “n” de medición, lo que nos permitió llegar a una profundidad de investigación máxima de 8 metros.

Debe aclararse que las mediciones se realizaron con electrodos especiales fijados directamente sobre el agua, colgados desde la pasarela que atraviesa la laguna de norte a sur.

En este perfil se destaca el basamento resistivo en toda su extensión (areniscas) que se tienen desde lo 2.2 m de profundidad.

Por encima del basamento se observa una capa muy delgada inferior a los 0.5 m de espesor con una resistividad que va desde los 80 a 200 ohm.m. Esta interfase podría corresponder a la migración de hidrocarburo que proviene de la zona de rotura del Ducto y que se desplazó por confinamiento hasta la laguna norte.

Por encima de esta se observa una capa delgada inferior a los 2 m. Esta está compuesta de sedimentos muy finos totalmente saturados y en suspensión y por encima de esta está la placa de agua.

Nótese que la placa de agua presenta una resistividad variable, es decir resistiva entre los electrodos 3 y 11 y entre el 17 y 22, esto puede deberse a una concentración de hidrocarburo en suspensión de acuerdo a lo observado en campo, es decir la densidad del agua con lodo sería similar a la del hidrocarburo

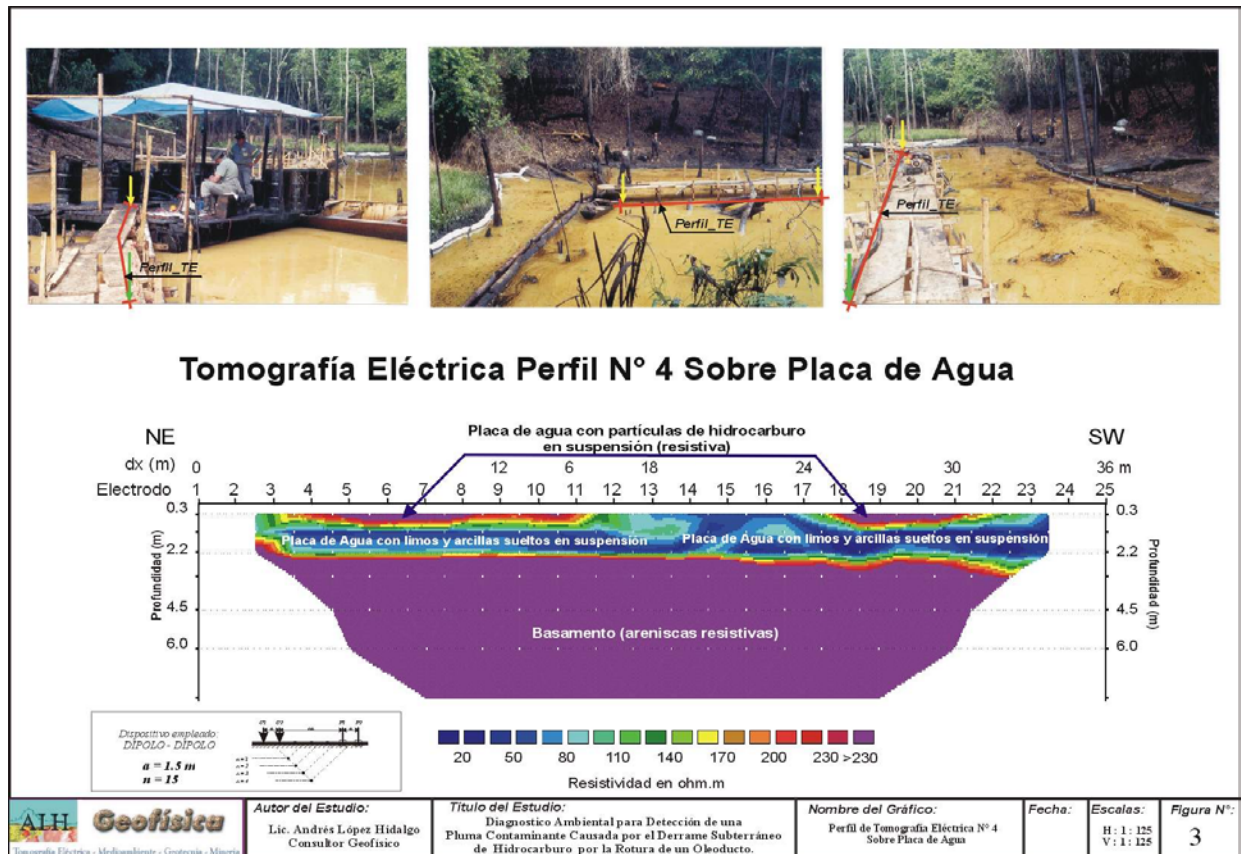


Figura 11: Imagen Perfil de Tomografía Eléctrica N 4 sobre Placa de Agua.

Entre los electrodos 12 y 17 la resistividad es menor debido a que esta zona estuvo contenida con barreras para la purga de petróleo en superficie lo que aisló esta área de contaminación confiriéndole una menor resistividad.

En la figura 12 se ha representado esquemáticamente la situación relativa de todos los perfiles de TE, la situación relativa de la traza de Oleoducto, las zonas de Roca aflorante (areniscas) y se han trazado los límites aproximados de la Pluma Contaminante de Hidrocarburo obtenida con la interpolación de la información de las Imágenes de TE.

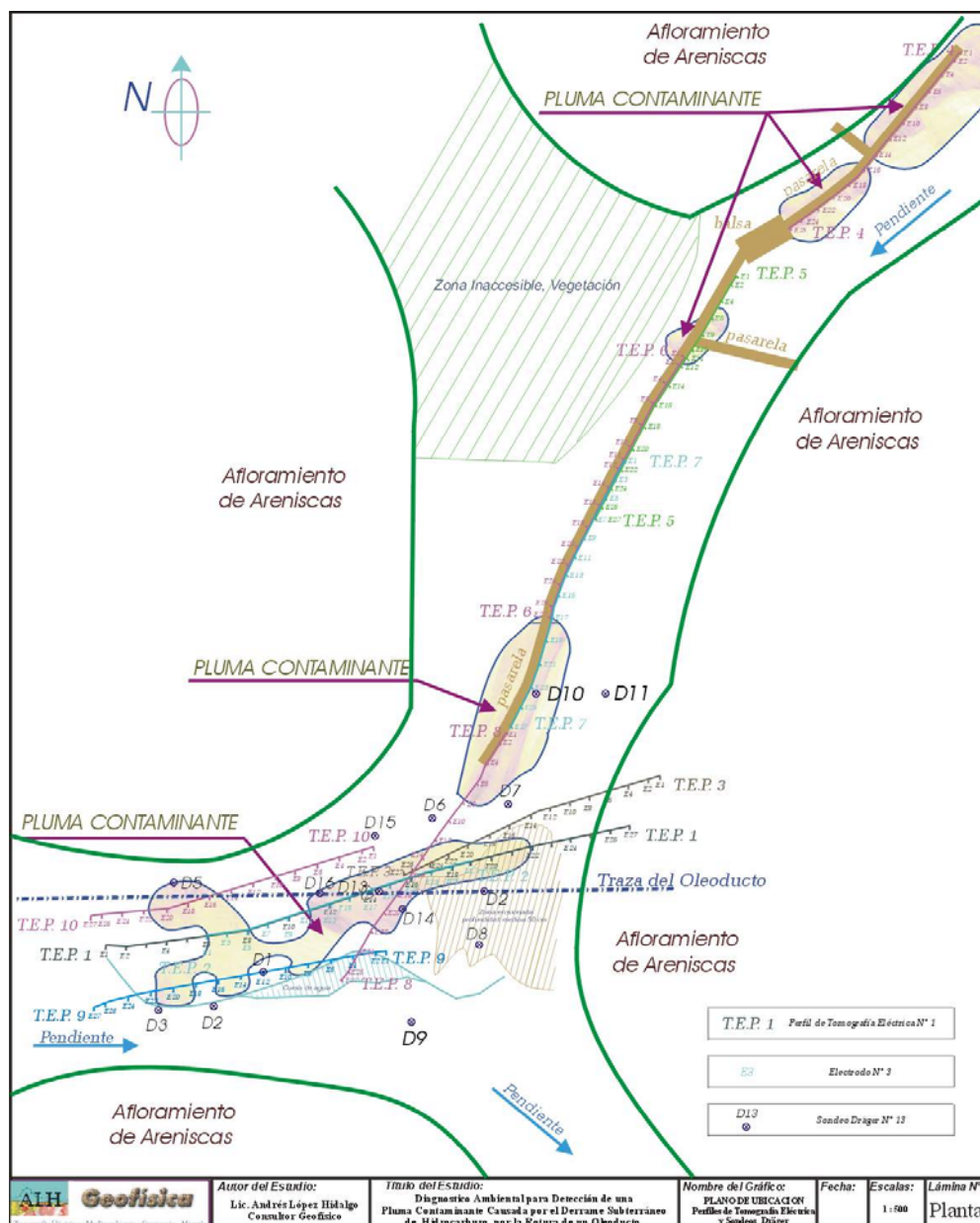


Figura 12:
Plano de Situación de
Perfiles de Tomografía
Eléctrica, situación
relativa de la Trazo del
Oleoducto y
delimitación de la
Pluma Contaminante
de Hidrocarburo por
TE.

Conclusiones Caso 4

Podemos decir que la Técnica de Tomografía Eléctrica es una eficaz y poderosa herramienta para la detección de Plumas Contaminantes provocadas por la infiltración de Hidrocarburos.

De acuerdo a la evaluación general de los datos se pudo detectar perfectamente la mayor concentración de HCT por los valores de resistividad mayores a su entorno en la zona de sedimentos sueltos, esto es, los hidrocarburos generalmente presentan valores resistivos (entre 100 y 350 ohm.m).

Si bien el fin de la aplicación de la Técnica de Tomografía Eléctrica en este Caso se enfocó hacia la detección y seguimiento de la Pluma Contaminante, esta también permitió definir y situar con bastante precisión el espesor y profundidad de la capa de sedimentos sueltos como así también delinear en casi toda el área el perfil del basamento resistivo.

De la información general de los Dräger se destaca la exacta coincidencia de la Imagen de TE N 1 y los valores en mg/Kg de HTC del Dräger N° 13, el cual presenta valores entre 584 y 16300 mg/Kg, siendo este último valor el máximo medido del total de las muestras extraídas con Dräger.

Conclusiones Generales

Del análisis y observación de los resultados obtenidos con Tomografía Eléctrica en estos Cuatro Casos podemos aseverar que la Técnica Geofísica de TE R2D es una eficaz y poderosa herramienta para la Observación y Diagnostico Ambiental del Subsuelo a través de su Resistividad, parámetro físico indicativo de cualidades asociadas mayoritariamente a fenómenos Antrópicos tales como Plumas de Hidrocarburo, Filtraciones de Agua Coproducida, Efluentes, etc., además de poder observar estructuras de Geología compleja.

Las siguientes características son de fundamental importancia en aplicaciones de Diagnostico Ambiental Subsuperficial:

- ✓ Imágenes de elevada resolución para profundidades someras.
- ✓ La cobertura en dos y tres dimensiones es mayor que la lograda con los métodos tradicionales, tales como perforación, sondeos y calicatas mecánicas, otros.
- ✓ Los resultados se presentan en forma que posibilitan una fácil comprensión por parte de Geólogos, Hidrogeólogos, Ingenieros, u otros especialistas.-

Referencias

- Dahlin, T. and Bernstone, C., 1997, A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.
- Dey A. and Morrison H.F. 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J. and Rijo, L., 1980, Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, 45, 75-93.
- Griffiths D.H. and Barker R.D. 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Li Y. and Oldenburg D.W. 1992, Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*, 109, 343-362.
- Loke, M.H., 1999. Time-lapse resistivity imaging inversion. *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section*, Eml.
- Loke, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion. *62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts*, D-2.
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682-1690.
- Loke M.H. and Barker R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke M.H. and Barker R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Orellana, Ernesto (1972). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid. España.
- Ramirez, A; Daily, W et al; "Detection of Leaks in Underground Storage Tanks Using Electrical Resistance Methods"; *Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG)*; Vol 1; Nro3 (1996).-
- S.A. al Hagrey and Johannes Michaelson; "Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at Bokhorst, Germany". *Geophysics*, Vol 64; NO. 3 (May-June 1999); P. 746-753, Figs., 3 Tables.
- Tong, L. and Yang, C., 1990, Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 55, 354-361.
- V. Lesur, M Cueur, and A. Straub; "2D and 3D interpretation of electrical tomography measurements, Part 1: The forward problem". Vol. 64 NO 2 (March-April 1999).

- V. Lesur, M Cuer, and A. Straub; “2D and 3D interpretation of electrical tomography measurements, Part 2: The inverse problem”. Vol. 64 NO 2 (March-April 1999).
- Witherly, K.E. and Vyselaar, J, 1990, A geophysical case history of the Poplar Lake Copper-Molybdenum deposit, Houston Area, British Columbia. in Fink, J.B.,
- McAlister, E.O., Sternberg, B.K., Wieduwilt, W.G. and Ward, S.H. (Eds), 1990, Induced polarization : Applications and case histories : Investigations in Geophysics No. 4, Soc. Expl. Geophys.
- Xu, B. and Noel, M. 1993. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 41, 791-801.