

## **CAPÍTULO III.**

### **APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA GEOELÉCTRICA EN UN SITIO URBANO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS.**

#### **III.1. Introducción.**

El estudio de zonas contaminadas por productos derivados del petróleo es un tema de gran importancia debido al incremento notable de los derrames o fugas, provenientes de la infraestructura petrolera tales como ductos y tanques de almacenamiento subterráneo. Dichos incidentes se relacionan con el manejo, uso y transporte de hidrocarburos. Es por ello, que se han generado diversas estrategias ambientales en todo el mundo para disminuir en gran medida este problema, así como métodos y metodologías para diagnosticar los sitios contaminados por hidrocarburos para su posterior remediación.

En este capítulo se realiza la caracterización geoelectrica de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos ubicado en el Valle de México. Dicha contaminación es consecuencia de un derrame de hidrocarburos, presuntamente originado por la ruptura de un tanque de almacenamiento subterráneo.

Finalmente, y por razones de confidencialidad, en este capítulo se omiten datos como nombres de calles, coordenadas UTM, etc.; sin embargo, se mantiene el esquema real del sitio en coordenadas relativas.

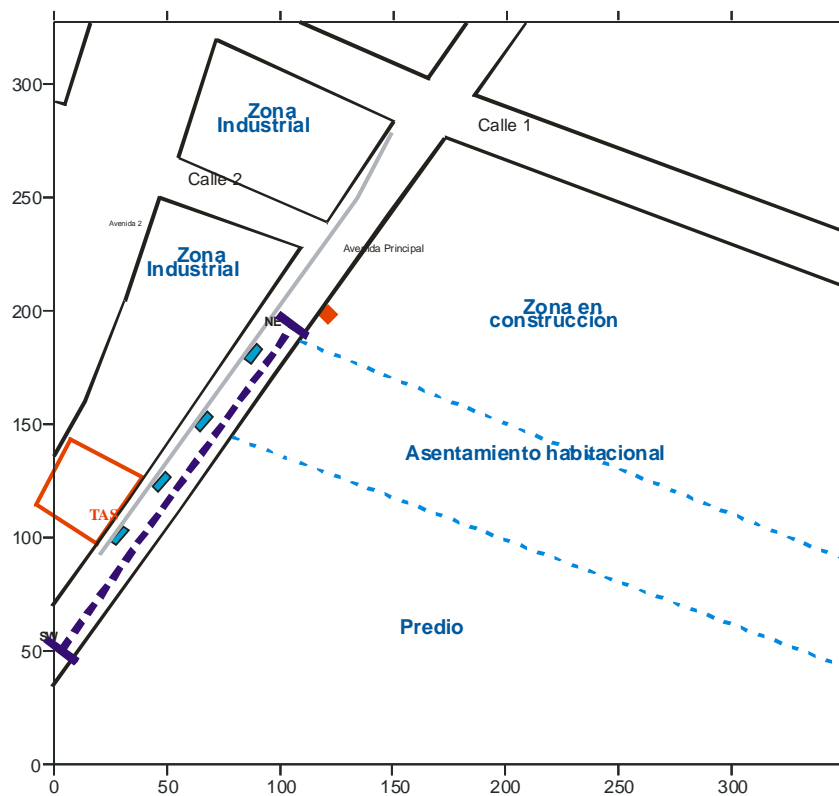
#### **III. 2. Antecedentes Generales.**

La zona de estudio está comprendida por 4 calles denotadas por los siguientes nombres: Avenida Principal, Avenida 2, Calle 1 y Calle 2. El sitio forma un cuadrado denotado por las coordenadas ( $X= 0, 350$  m;  $Y= 0, 350$  m); por lo que el área de estudio es de aproximadamente 5 hectáreas, en las cuales predominan casas habitación, un predio, una zona en construcción y una zona industrial.

A lo largo de la Avenida Principal existe un ducto de drenaje y de gas natural, así como de instalaciones subterráneas de luz eléctrica. En la parte S W de dicha avenida, se encuentra un Tanque de Almacenamiento Subterráneo (TAS) de hidrocarburos. En la porción central de

la Avenida Principal, casi frente a la Calle 2, se detectó la afluencia de hidrocarburos, dentro de una zona en construcción, mientras se realizaba una excavación de 6 m de profundidad en el punto X= 120 m, Y= 198 m (Fig. III.1). En este punto comenzó a drenar un producto hidrocarburo de color ámbar.

Una vez ocurrido este derrame se procedió a realizar la caracterización geoeléctrica del sitio con la finalidad de mapear las plumas de contaminación por hidrocarburos y localizar la fuente de dicha contaminación.



### SIMBOLOGÍA

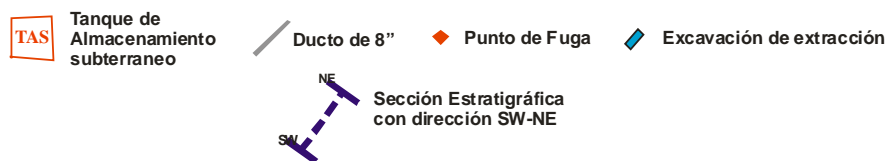


Figura III.1: Esquema del área de estudio con la ubicación del TAS, el punto de fuga de hidrocarburos y excavaciones realizadas. El esquema incluye la trayectoria de un ducto detectado con el método DDM así como una sección estratigráfica con dirección SW-NE.



Figura III.2: A) Vista de la calle principal en el área de estudio. B) Excavaciones realizadas.

### III.3. Características Litológicas del Sitio.

#### III.3.1. Estratigrafía.

Para determinar las características geológicas e hidrogeológicas del sitio en estudio, es necesario recurrir a diversos estudios geológicos e hidrogeológicos realizados con anterioridad en la Cuenca de México (Marín Córdova et. al., 2001), así como los que proporcionan directamente los pozos de exploración perforados en el sitio.

A partir de estos estudios, se construyó una sección estratigráfica con dirección SW-NE (Fig. III.3), incorporando la información proporcionada por los pozos de exploración realizados dentro de la zona dentro del marco de este estudio, aportando información hasta una profundidad de 30 metros.

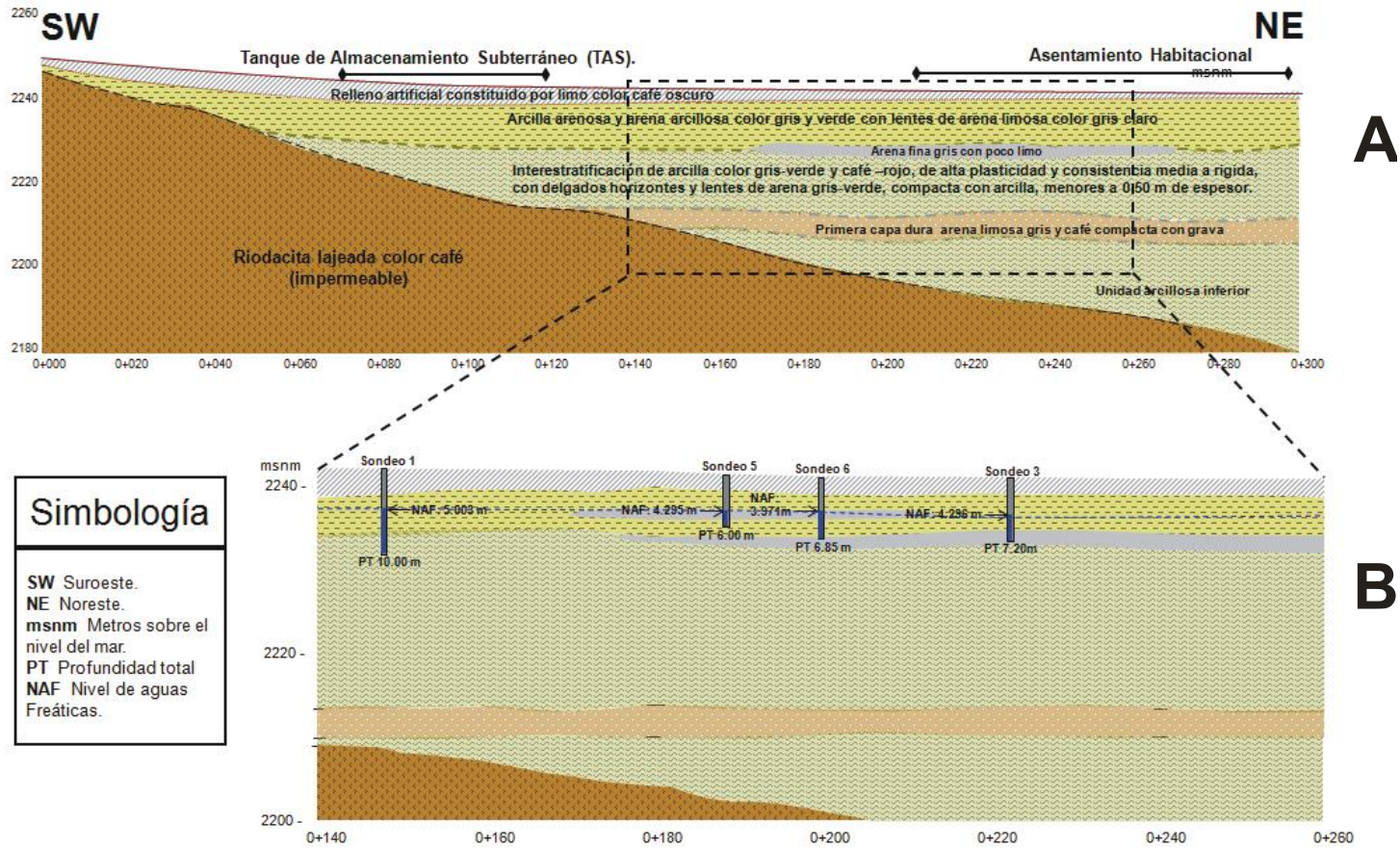


Figura III.3: Secuencia estratigráfica del área de estudio. A) Vista general de la secuencia estratigráfica. B) Vista ampliada de la secuencia estratigráfica con la ubicación de los pozos de exploración.

### **III.3.2. Geología.**

Con base en la información de la secuencia litológica generalizada para los depósitos lacustres del ex lago de Texcoco, la descripción de los estratos principales que comprenden la zona de estudio (Murillo y García, 1978) está constituida por:

- **Capa Superficial.**- Arcillas consolidadas por secado y consolidación debida al peso de las edificaciones urbanas. El contenido de agua reportado es de 61%. El espesor varía entre 1.5 m y 6 m.
- **Formación Arcillosa Superior.**- Con espesores en el rango de 17 m a 40 m, presenta una interestratificación de arcillas volcánico-sedimentarias con lentes y horizontes arenosos, limo-arenosos y vidrio volcánico a distintas profundidades.
- **Capa Dura.**- Tiene un espesor promedio de 3.5 m. Su contenido de agua es de 60%, está formada por sedimentos limo-arenosos y arenosos volcánico-clásticos compactos.
- **Formación Arcillosa Inferior.**- Está integrada por arcillas de origen volcánico-lacustre compresibles, contiene lentes y estratos limo-arenosos con partículas de vidrio volcánico. En el centro del lago contiene un espesor de aproximadamente 20 m.
- **Depósitos Profundos.**- Están constituidas por materiales granulares gruesos y rocas ígneas que afloran en los cerros más cercanos al sitio de estudio, en las márgenes del antiguo lago.

### III.3.3. Litología.

La Tabla III.1 expone la secuencia litológica somera que representa al sitio de estudio.

Litología.	Profundidad (m).
Relleno Artificial (limo café oscuro).	0 - 2.1
Arcilla arenosa y arenosa arcillosa color gris y verde con lentes de arena limosa gris claro.	2.1 – 6.2
Arena fina color gris oscuro.	6.2 – 8.5
Interestratificación de arcilla gris verde de alta plasticidad y consistencia media, con delgados horizontes y lentes de arena gris, con arcilla, menores de 0.5m de espesor.	8.5 – 10.0

**Tabla III.1: Información litológica generalizada para la zona de estudio.**

Cabe destacar que el Nivel de Aguas Freáticas (NAF) en la región varía entre 3.75 m y 5 m; además, la presencia de lentes arenosos incrementa la permeabilidad de las capas arcillo - limosas, siendo estas últimas las que constituyen la mayor parte de la secuencia estratigráfica, por lo que dichos lentes pueden servir como vía de conducción de contaminantes.

### III.3.4. Hidrogeología.

Se pueden considerar dos unidades hidrogeológicas para el sitio de estudio con coeficientes de permeabilidad de  $k= 1.0 \times 10^{-6}$  a  $1.5 \times 10^{-7}$  cm/s respectivamente (Marín Córdova et. al., 1986); dichas unidades se describen a continuación.

- Unidad Volcano-Sedimentaria depositada en un ambiente lacustre.

De acuerdo a la interestratificación de materiales limo -arcillosos con lentes y horizontes de arena, se considera que es un acuífero granular con bajo rendimiento específico. Como se mencionó con anterioridad, el NAF se encuentra entre 3.75 m y

5 m. Con base en la información obtenida y observando los pozos perforados, el flujo de agua subterránea se dirige hacia el Noreste de la zona de estudio.

- Unidad Riódacítica Densa.

Se caracteriza por su impermeabilidad, así como por limitar a la secuencia volcánica - sedimentaria de los depósitos lacustres anteriormente descritos.

#### **III.4. Planeación y selección de la tecnología de medición.**

Una vez definidas las características geológicas y geográficas del sitio, es posible seleccionar la tecnología de mediciones geoeléctricas. Para el caso de SEV se debe considerar la profundidad del NAF y las características litológicas del subsuelo para determinar la separación máxima de la línea de corriente; con esto, y las dimensiones del área de estudio se definen las separaciones entre puntos de medición, así como el número y ubicación de los perfiles de SEV.

Si el sitio incluye la presencia de ruido geológico o electromagnético, es necesario, en la etapa de procesamiento de datos, filtrar las distorsiones causadas sobre los datos; en este caso, se trata de una zona urbana con alto nivel de ruido geológico y electromagnético.

Este problema puede resolverse de dos maneras: utilizando la configuración AMN + MNB; esto es, realizar dos sondeos tipo polo-dipolo en un mismo punto de medición para posteriormente someter los datos adquiridos en ambos sondeos a un proceso de filtrado que elimine las distorsiones causadas por el ruido geológico (Shevlin et. al., 2003). Este proceso, si bien elimina eficazmente los efectos del ruido geológico, hace que disminuya la productividad en la ejecución de la campaña de SEV.

Otra manera de aminorar las distorsiones causadas por un sitio urbanizado sobre las mediciones, sería el aplicar previo a la campaña de SEV, un método que permita ubicar todos los ductos metálicos y cables subterráneos, así como sistemas de drenaje y cualquier elemento metálico subterráneo que genere distorsiones electromagnéticas y geológicas. Una vez realizado lo anterior, es posible posicionar los perfiles de SEV de manera que las distorsiones sean mínimas sin afectar la productividad en la ejecución de los SEV's. Esta segunda opción fue la seleccionada en este trabajo y su metodología de aplicación se describe a continuación.

### **III.5. Detección de Ductos Metálicos (DDM).**

La Detección de Ductos Metálicos (DDM) es de gran importancia para el diseño de los perfiles de SEV y PEM, evitando distorsiones originadas por la presencia de cuerpos metálicos.

Los equipos utilizados para la DDM en este sitio fueron: Fisher TW6 y Radio Detection RD - 4000. Ambos están basados en mismo principio de funcionamiento, esto es a través de la inducción de un campo electromagnético en el medio y su recepción. La DDM se aplicó a lo largo de las calles y avenidas que comprenden la zona de estudio, haciendo énfasis en la Avenida Principal donde se presentó el derrame de hidrocarburos.

Con base en esta técnica se localizó un ducto de 8" (ver Fig. III.1) que corre a lo largo de la Avenida principal que, según información oficial, corresponde con un ducto de distribución de agua potable.



**Figura III.4: Técnica inductiva de localización de ductos utilizando el equipo Fisher TW6.**

### **III.6. Aplicación del Método PEM.**

Uno de los métodos indirectos de resistividad utilizados para delimitar la contaminación en el sitio fue el de Perfilaje Electromagnético (PEM).

Para las mediciones de PEM se utilizó el equipo (EM31-MK2) desarrollado por la Geonics Ltd (Geonics Limited. Manual del usuario EM31-MK2, 1980). Este equipo consta de dos bobinas acopladas, una transmisora y otra receptora, a una distancia de 3.66 m . A través de la bobina transmisora se emite un pulso electromagnético de frecuencia 9.8 kHz que induce un campo secundario en el subsuelo que a su vez se mide por la bobina receptora. Con este



equipo se puede trabajar con dipolos horizontales y una profundidad máxima de estudio de 3 metros, o con dipolos verticales y una profundidad máxima de estudio de 6 metros .

También se muestra el valor de fase entre el campo primario (generado por el equipo) y campo secundario (generado por terreno). Cuenta con memoria para 10,000 lecturas en dos orientaciones de las antenas y capacidad para conectarse a un GPS (Fig.III.5).

Las mediciones se realizaron cada 5 metros a lo largo de perfiles georeferenciados o de manera dispersa, haciendo un total de 306 puntos de medición. Los valores de conductividad eléctrica se convirtieron a valores de resistividad eléctrica en un rango de aproximadamente 1 Ohm.m a 200 Ohm.m. Con dichos valores y sus coordenadas es posible construir el mapa de resistividad eléctrica aparente ( $\rho_a$ ) de la Figura III.6.

En la Figura III.6 se pueden observar tres zonas anómalas de mínima  $\rho_a$  (zonas I, II y III); las cuales se presentan como posibles zonas contaminadas.

- Zona I.- La zona anómala I (Fig. III.6) se encuentra dentro de un predio. Esta zona se caracteriza por tener un polvo esparcido en el suelo que por su olor y textura, se trata de azufre. Dicho elemento bajo los efectos de la biodegradación genera un ambiente ácido en el subsuelo (creación de sales), lo que se registra como una anomalía de baja resistividad. Finalmente esta anomalía indica la existencia de contaminación química por el azufre en el subsuelo.
- Zona II.- Se encuentra dentro de un asentamiento habitacional, coincidiendo con el sistema de drenaje de aguas residuales, siendo posible encontrar como causa varias fuentes de contaminación o la combinación de las mismas. Dichas fuentes de contaminación pueden ser: contaminación química en el predio, las aguas residuales o la presencia de hidrocarburos; las cuales generan una anomalía de baja resistividad.
- Zona III.- Está localizada dentro de una construcción cercana al punto de fuga de hidrocarburos en la Avenida Principal (rombo rojo Fig.III.6). La anomalía de baja resistividad se debe por la presencia de hidrocarburos degradados en el subsuelo (contaminación madura).



Figura III.5: Aplicación del método PEM en un área contaminada.

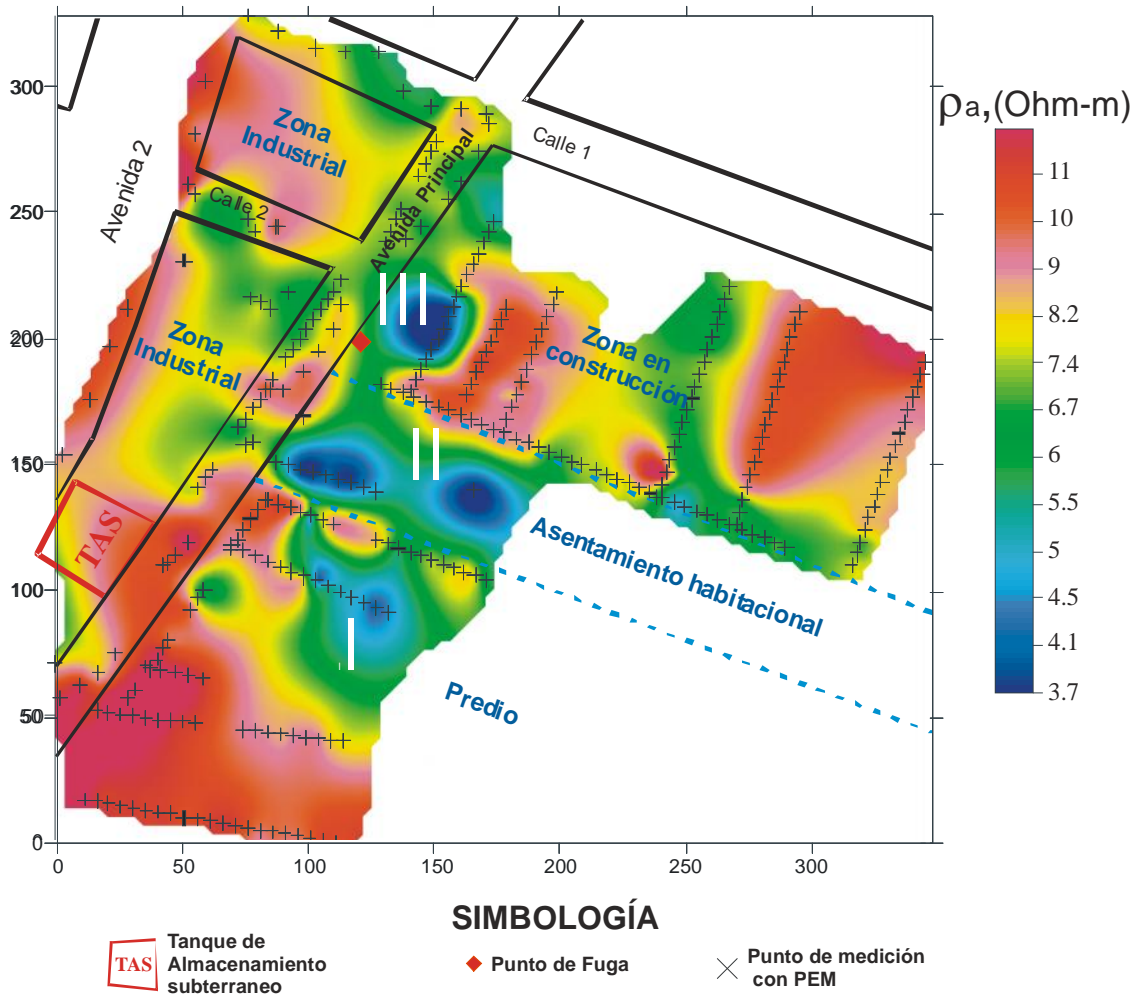


Figura III.6: Mapa de resistividad aparente obtenido por el método PEM. Se indican las zonas anómalas principales.

Cabe señalar que el método PEM aplicado con el equipo EM31 -MK2 tiene una profundidad máxima de estudio de 6 m, por lo que es necesario aplicar el método SEV con el fin de visualizar la estratigrafía del subsuelo a una profundidad mayor y ubicar en profundidad las zonas contaminadas.

### **III.7. Aplicación del Método SEV.**

Otro de los métodos utilizados para delimitar la contaminación del subsuelo es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en la variante de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

Para la realización de la campaña de mediciones de SEV -TRE se utilizó un equipo Syscal R1 Plus (Fig. III.7) fabricado por la compañía Iris Instruments (Manual del equipo Syscal R1 Iris Instruments France, 2001). Es un equipo compacto, de 31 x 31 x 21 cm y 9.5 kg de peso, alimentado por una batería recargable interna de 12 V y 7 A/hr y una temperatura de operación de -20 a 70 °C. Este equipo cuenta con un transmisor que permite el ajuste automático de corriente y voltaje, con un voltaje máximo de 600 V y una corriente máxima de 2500 mA con una resolución de 10  $\mu$ A. Por su parte, el receptor cuenta con protección para sobre-voltajes, voltaje de entrada de entre -10 y 10 V. Además el medidor presenta rechazo de banda de 50 y 60 Hz y una resolución de 1  $\mu$ V. Estas características hacen del equipo Syscal R1 una herramienta óptima para estudios de medio ambiente.

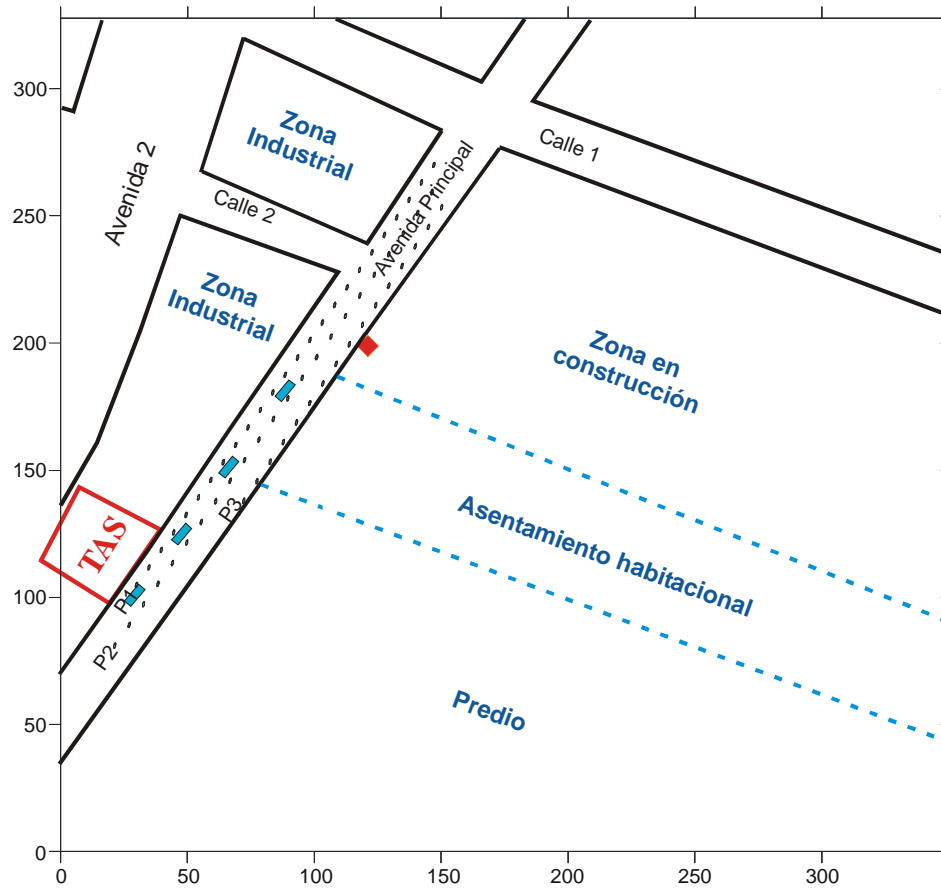
Con la aplicación del método SEV-TRE, se obtienen pseudosecciones de resistividad de la zona de estudio, la que a su vez son filtradas utilizando el programa X2IPI (Bobachev, 2003), corrigiéndose algún dato afectado por algún tipo de ruido.



**Figura III.7: Aplicación del método SEV en un área contaminada.**

### III.7.1. Trabajo de Campo.

Se realizaron tres perfiles de SEV-TRE utilizando un arreglo tipo Schlumberger (AMNB), con longitudes de 192 m (P1), 176 m (P2) y 120 m (P3). En total se midieron 64 puntos de SEV con un intervalo entre sondeos de 8 m. Para cada punto de SEV se tomaron 10 mediciones en separaciones AB/2 entre 6 m y 42 m, con intervalo de 4 m, garantizando una profundidad máxima de estudio de poco más de 15 m.



### SIMBOLOGÍA

- |  |                                      |  |                                     |  |                                     |  |                          |
|--|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------|
|  | Tanque de Almacenamiento subterráneo |  | Perfiles de SEV en modalidad de TRE |  | Punto de afluencia de hidrocarburos |  | Excavación de extracción |
|--|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------|

Figura III.8: Esquema del área de estudio con la ubicación del TAS, el punto de afluencia de hidrocarburos y excavaciones realizadas. El esquema incluye la ubicación de los perfiles de TRE realizados.

### **III.7.2. Interpretación Cualitativa.**

Para realizar una interpretación cualitativa se efectúa el procesamiento de los datos obtenidos en campo, y se presenta a manera de secciones de  $\rho_a$ . Además se realiza un análisis estadístico de los datos de  $\rho_a$ .

#### **III.7.2.1. Secciones de Resistividad Aparente.**

Una vez realizadas las mediciones de SEV-TRE se presentan los valores de  $\rho_a$  en forma de secciones (seudo-secciones). A continuación se describen cada una de las seudo-secciones correspondientes a cada perfil.

En el perfil 1 se observa la presencia de una anomalía de baja resistividad ubicada en el intervalo de distancia 10 m a 140 m. Otra anomalía aparece en los 160 m de distancia con un valor aproximado de 2.2 Ohm.m. Es posible distinguir una pequeña capa superficial con valores de resistividad entre 16 Ohm.m y 20 Ohm.m.

El perfil 2 está compuesto por 3 capas; una superficial con valores de resistividad de 16 Ohm.m a 20 Ohm.m; la segunda de baja resistividad, sobre todo en su parte final (140 m -160 m), y una tercera capa con resistividad media.

Finalmente en el perfil 3 se observan tres anomalías de muy baja resistividad contenidas en la segunda capa; por lo que a simple vista, dichas anomalías podrían ser canales de transporte de contaminantes.

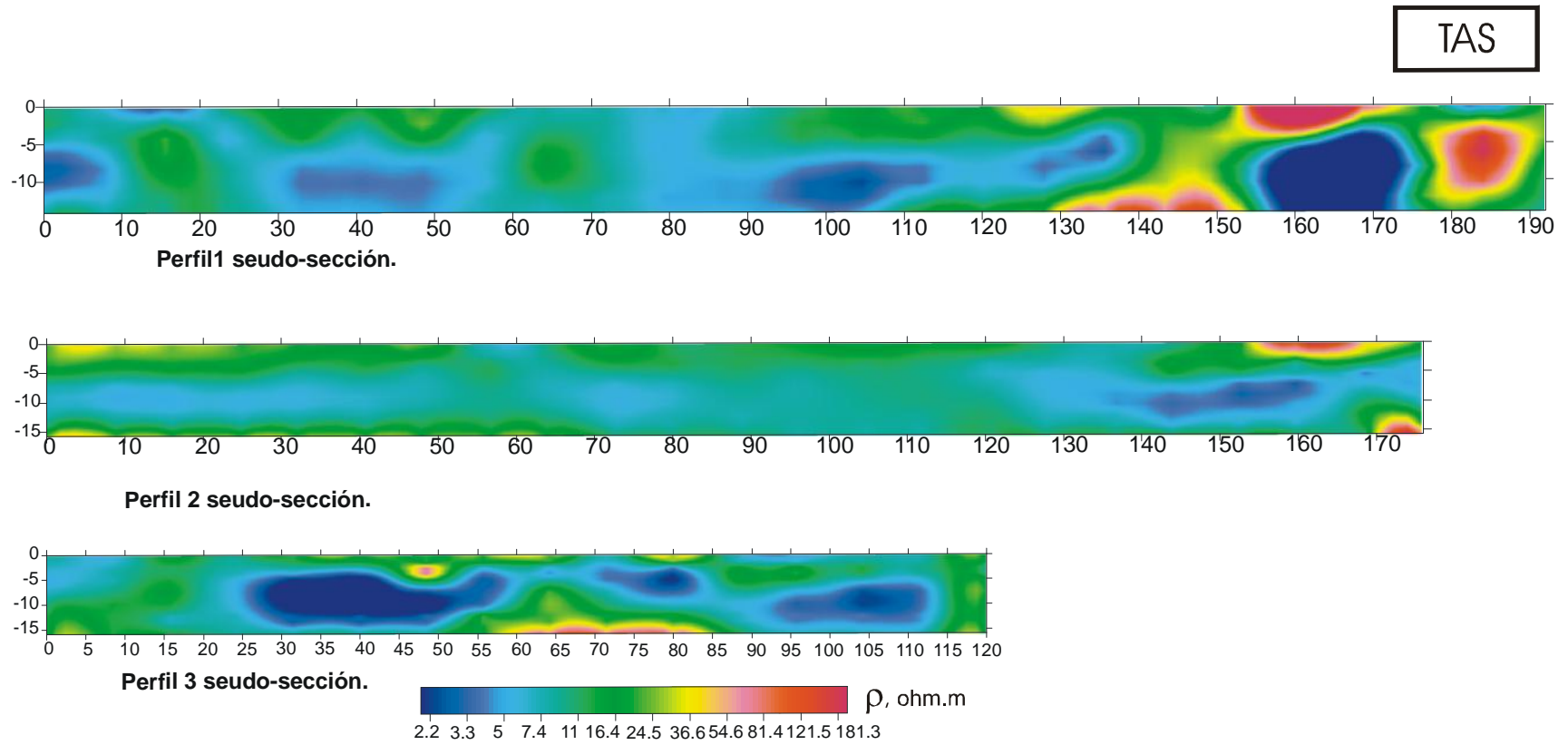


Figura III.9: Secciones de resistividad aparente obtenidas de la aplicación del método SEV.

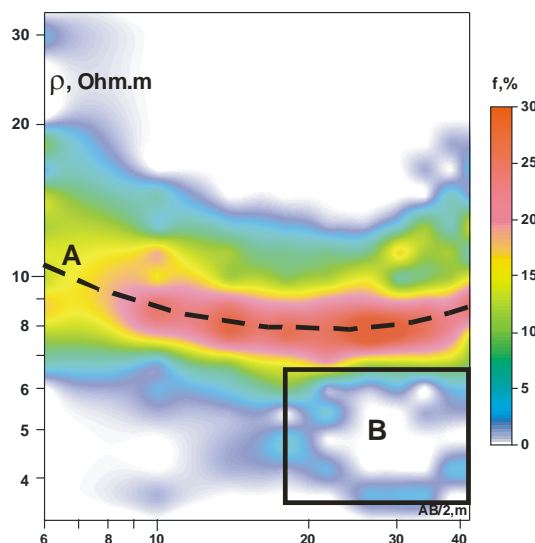
### III.7.2.2. Análisis Estadístico de Resistividad Aparente.

Este tipo de análisis permite visualizar el comportamiento de la resistividad aparente a diferentes profundidades de penetración de corriente. Con esto se obtienen curvas representativas de las zonas contaminadas y de las no contaminadas.

A partir de esto, se obtiene una distribución 2D como valores de frecuencia en el sistema coordenado Resistividad Aparente-AB/2. Se obtiene una curva media de SEV y su dispersión para los grupos de sondeos realizados en la zona de estudio; es decir, la curva característica de SEV del área de estudio.

En la Figura III.10 se presenta la distribución estadística de valores de  $\rho_a$  obtenidos por SEV-TRE para el sitio estudiado. La escala de colores representa los valores de frecuencia de ocurrencia. Existe una curva de SEV tipo H característica del sitio que muestra la influencia de una capa superficial más resistiva (relleno artificial), seguida en profundidad de una segunda capa conductora (sedimentos areno-arcillosos-limosos saturados) y posteriormente una tercera capa donde supuestamente disminuye el contenido de arcilla.

Existe una “nube” de datos de mínima  $\rho_a$ , por debajo de la curva característica, a partir de la distancia eléctrica AB/2= 18 m, correspondientes a aquellas curvas de SEV que presentan mínimos anómalos de  $\rho_a$  probablemente causados por la influencia de suelo contaminado en procesos de biodegradación.



**Figura III.10: Distribución estadística de los valores de resistividad aparente para todos los datos de SEV. Valor promedio de resistividad es 8 Ohm-m. A) Curva de SEV característica del sitio. B) “Nube de datos de mínima resistividad aparente.**

### III.8. Mediciones de Resistividad de Muestras de Agua (MRA).

Diferentes muestras de agua fueron recolectadas de las excavaciones realizadas para la extracción de hidrocarburos en fase libre y de los pozos exploratorios. Utilizando un conductivímetro marca Hanna, modelo HI98130 (Fig. III.11), se obtuvo un valor de resistividad eléctrica promedio de 5.8 Ohm-m para el agua subterránea de la zona de estudio; lo que significa que tiene una salinidad de 1g/l. Con este valor y los resultados obtenidos a través del método MRS, se podrá realizar una inversión petrofísica para delimitar la frontera geoeléctrica entre suelo limpio y contaminado.



Figura III.11: Equipo Hanna HI98130 para el método MRA .

### III.9. Mediciones de Resistividad de Muestras de Suelo (MRS).

A partir del método MRS es posible determinar los parámetros petrofísicos del suelo y, junto con los resultados obtenidos de la aplicación de MRA, estimar la frontera entre suelo limpio y contaminado.

Muestra	CIC, g/l	Contenido de arcilla, %	Por. suelo, %	Coefficiente de filtración, m/d	Error, %
1	2	45	25	0.0036	3.2
2	0.02	71	46	0.0014	5.9
3	0.1	38	21	0.005	4
4	3	45	25	0.0036	5.4
5	2.1	37	30	0.0053	2.3

Tabla III.2: Parámetros petrofísicos de las muestras de suelo colectadas en los puntos 1 a 5.

Cinco muestras de suelo fueron colectadas en 5 puntos del sitio donde se perforaron pozos de muestreo de suelo o trincheras, buscando recolectar suelo representativo del sitio a diferentes profundidades. Litológicamente, las muestras presentan arcilla y ceniza volcánica, lo que le asigna una CIC muy baja entre 0.02 y 0.1 g/l y una fuerte absorción de agua.



En la Tabla III.2 se observa que el contenido de arcilla en las muestras de suelo se encuentra entre 37% (arcilla ligera) y 71% (arcilla pesada), por lo que la conductividad hidráulica estimada en el suelo a partir del contenido de arcilla tiene un máximo aproximado de 5 cm/día, lo que indica baja permeabilidad. Tomando en cuenta que la migración de contaminantes se realiza en zonas con alta conductividad hidráulica, las vías más probables de migración de contaminantes en el sitio serían las proporcionadas por las trincheras asociadas a los diferentes ductos, donde el suelo ha sido removido.



**Figura III.12: Muestras de suelo colectadas en el sitio de estudio.**

### **III.10. Inversión Petrofísica.**

La modelación petrofísica es un procedimiento de caracterización litológica utilizado dentro de la tecnología geoeléctrica aplicada para sitios contaminados por hidrocarburos. Dicho procedimiento consiste en hacer un balance de todos los datos geoeléctricos (experimentales y teóricos) con las propiedades del suelo y agua del sitio en estudio, con la finalidad de establecer una frontera geoeléctrica entre suelo limpio y contaminado.

En la Figura III.13 se presentan los resultados del procedimiento tomando en cuenta los valores de resistividad eléctrica medidos en las 5 muestras de suelo tomadas en el sitio (Tabla III.2). Podemos observar dos líneas adicionales: una línea vertical para la salinidad y resistividad típica del agua subterránea del sitio (1 g/l y 4 Ohm -m, respectivamente).

Si extendemos la línea de salinidad del agua (1 g/l) a la curva de suelo de mayor contenido de arcilla, se tiene una resistividad de 4.2 Ohm.m, siendo esta una primera frontera geoeléctrica entre suelo limpio y contaminado.

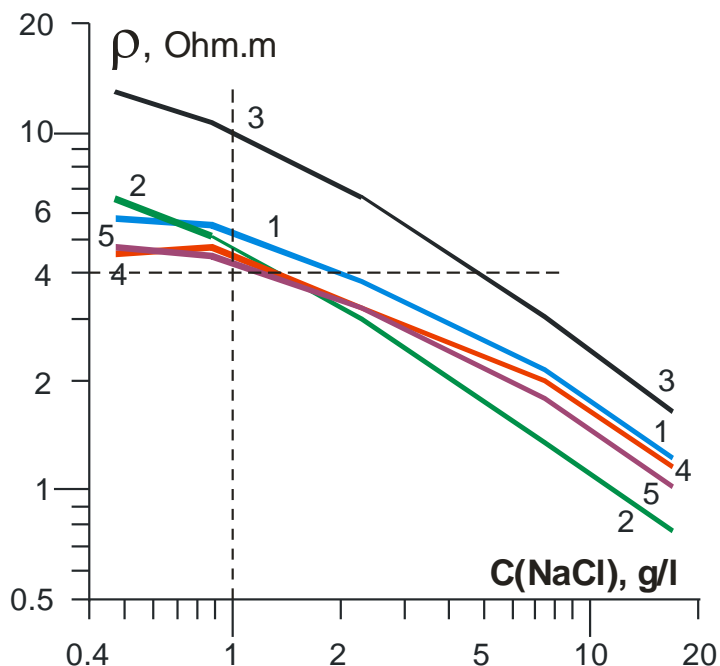


Figura III.13: Curvas de resistividad versus salinidad obtenidas en laboratorio para 5 muestras de suelo.

### III.11. Interpretación Cuantitativa.

Este proceso de interpretación cuantitativa permite determinar los modelos geoeléctricos, mapas y secciones de resistividad del medio estudiado, permitiendo visualizar la contaminación en superficie y en profundidad y localizar las fuentes de origen y grado de contaminación. Para dicha interpretación se utilizó el programa Res2DInv (Loke y Barker, 1995, 1996), el cual se aplica a cada uno de los perfiles de SEV-TRE, dando como resultado para cada perfil una sección geoeléctrica interpretada compuesta de 7 capas. Los espesores y profundidades de cada capa se presentan en la Tabla III.3.

Capa	Intervalo de profundidad (m)
1	0 – 1
2	1 – 2
3	2 – 3.1
4	3.1 – 4.3
5	4.3 – 5.6
6	5.6 – 7
7	7 - ∞

Tabla III.3: Intervalos de profundidad para las capas interpretadas en cada perfil de SEV mediante el programa Res2DInv (M.H.Loke).

### III.11.1. Secciones de Resistividad Interpretada.

Una vez realizada la interpretación con el programa Res2DInv (M. H. Loke), con ayuda del programa Surfer 8 (Golden Software Inc., 2002), fueron construidas las secciones de resistividad interpretada (verdadera), las cuales se muestran a continuación.

En la figura III.15 se muestran las secciones de resistividad interpretada para cada perfil de SEV y se puede observar en común la presencia de tres estratos: un estrato superficial resistivo que está constituido por depósitos areno-arcillosos; un estrato intermedio en el cual el contenido de arcilla aumenta notablemente, y finalmente un tercer estrato de mayor resistividad a causa de la disminución del contenido de arcilla.

En el estrato intermedio se tienen zonas de mínima resistividad en forma de canales por lo que probablemente exista migración de hidrocarburos. Es posible correlacionar estas zonas en las tres secciones (líneas discontinuas azules, Fig. III.15); sin embargo, dichas zonas pueden ser observadas con mayor resolución en planta por medio de los mapas de la Figura III.16.

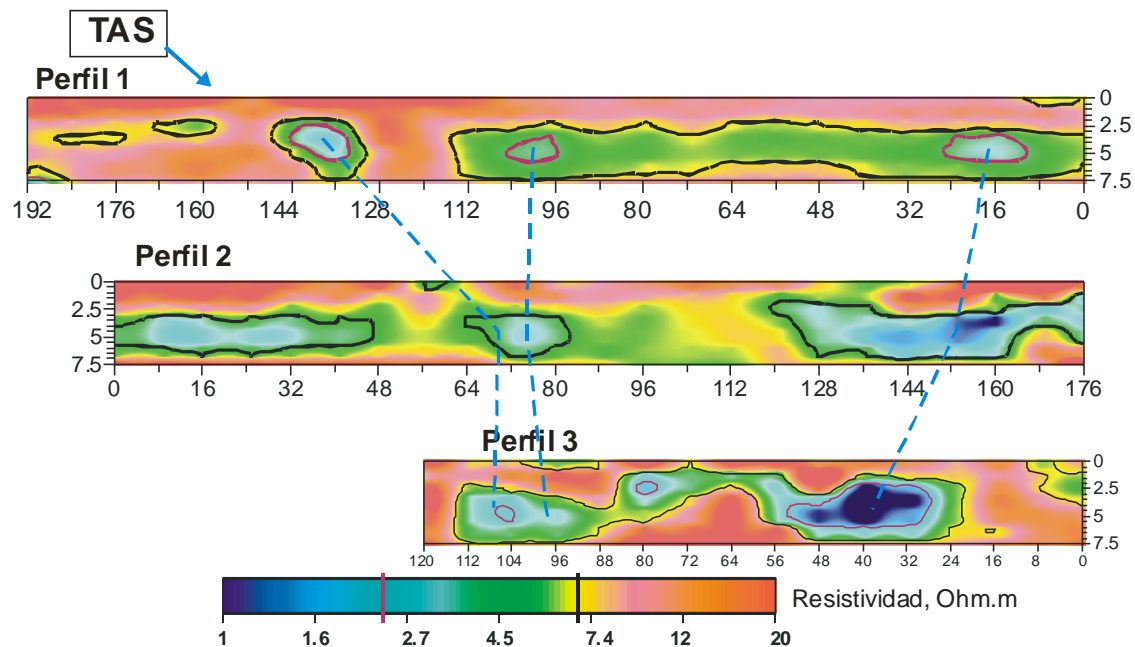


Figura III.15: Secciones de resistividad interpretada obtenidas de la aplicación del método SEV.

### **III.12. Resultados.**

Considerando las capas donde se concentran los valores más bajos de resistividad y sus ubicación próxima al NAF (parte inferior de la zona vadosa), se construyen mapas de resistividad interpretada con la finalidad de visualizar para cada estrato de interés las variaciones laterales de la resistividad, lográndose delimitar con alta resolución la contaminación por hidrocarburos en proceso de biodegradación.

Si se correlacionan dichos mapas con la posición de las fuentes de contaminación y la información hidrológica (dirección principal del flujo de agua subterránea) y la topografía local, es posible estimar la dirección de migración de los contaminantes ( flechas rojas, Fig. III.16).

Para la porción de la zona de estudio abarcada por los estudios de SEV -TRE, se presentan mapas para tres capas de interés. Los mapas de resistividad interpretada para las capas 3, 4 y 5 con profundidades entre 2 m y 5.6 m, muestran una zona probablemente con contaminación madura que parte desde al parte sur de la Avenida Principal muy cerca del TAS siguiendo la trayectoria marcada con las flechas rojas.

Por otra parte, existen zonas de color naranja y rojas, que representan anomalías de alta resistividad y rodean a las zonas de contaminación madura (azules); dichas zonas indican la posibilidad de presencia de contaminación fresca, en caso de que exista una fuente activa de contaminación en el sitio.

Sin embargo, en la zona NE del sitio, específicamente en la zona industrial existen otras anomalías de baja resistividad indicando la presencia de contaminación madura, con migración de contaminantes desde el Norte del sitio; por lo que se propone la existencia de otra fuente de contaminación quizás más antigua.

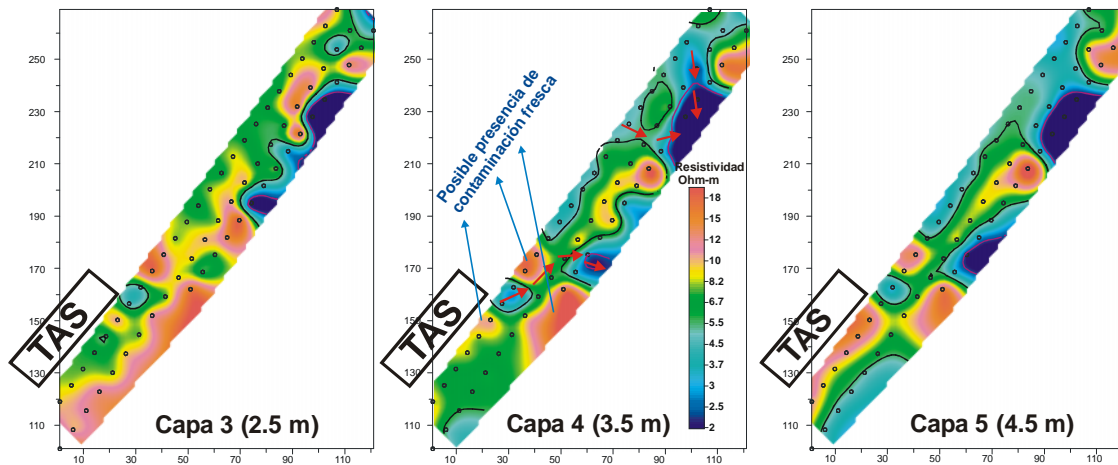


Figura III.16: Mapas horizontales de resistividad para capas 3, 4 y 5 por datos de SEV.

### III.12.1. Comparación de Resultados de PEM con SEV.

El mapa de  $\rho_a$  obtenido con PEM (Fig. III.6) muestra zonas con anomalías de alta resistividad (zonas rojas) cercanas al TAS sobre la Avenida Principal, abriendo la posibilidad de existencia de contaminación fresca; no obstante este resultado, la existencias de otras anomalías de alta resistividad en el sitio dificultan delimitar la anomalía de interés.

Una comparación entre los mapas de resistividad obtenidos por PEM y SEV confirma la existencia de básicamente 3 zonas anómalas. Por un lado, si existe anomalía de alta resistividad en la proximidades al TAS, y por otro lado, la existencia de dos zonas anómalas de baja resistividad. Una primera zona anómala de baja resistividad se encuentra a lo largo de la Avenida principal donde se localiza el punto de afluencia de hidrocarburos, siendo por lo tanto contaminación madura afectada por procesos de biodegradación. La otra zona de baja resistividad se encuentra al Norte del sitio de estudio en la Calle 2 y por su forma, posición y dirección principal del flujo de agua subterránea, debe corresponder a contaminación de origen distinto a la de la primera anomalía de baja resistividad.

A pesar de que el método PEM es más sensible al ruido EM que el método SEV, su productividad ha permitido tener una distribución lateral de la resistividad hasta una profundidad máxima de estudio de 6 m. Esto ha permitido que pocos perfiles de SEV -TRE sean necesarios para tener una descripción litológica del subsuelo y ubicar en profundidad los estratos donde se concentran la mayor parte de los contaminantes, disminuyendo el tiempo y costo de un estudio geofísico.

### **III.13. Conclusiones.**

Se concluye que con los métodos geoeléctricos SEV-TRE y PEM es posible delimitar eficientemente zonas de contaminación madura pertenecientes a diferentes eventos de contaminación. Anomalías de alta resistividad cerca del TAS fueron encontradas por ambos métodos, pero la existencia de otras anomalías cercana impide una clara delimitación de la posible zona de existencia de contaminación fresca.

Finalmente si se tiene un área urbana donde la profundidad del NAF no sobrepase los 6 metros, la combinación de ambos métodos permite obtener resultados más precisos de forma productiva, en la localización tanto en planta (método PEM) y en profundidad (método SEV) de las zonas contaminadas.

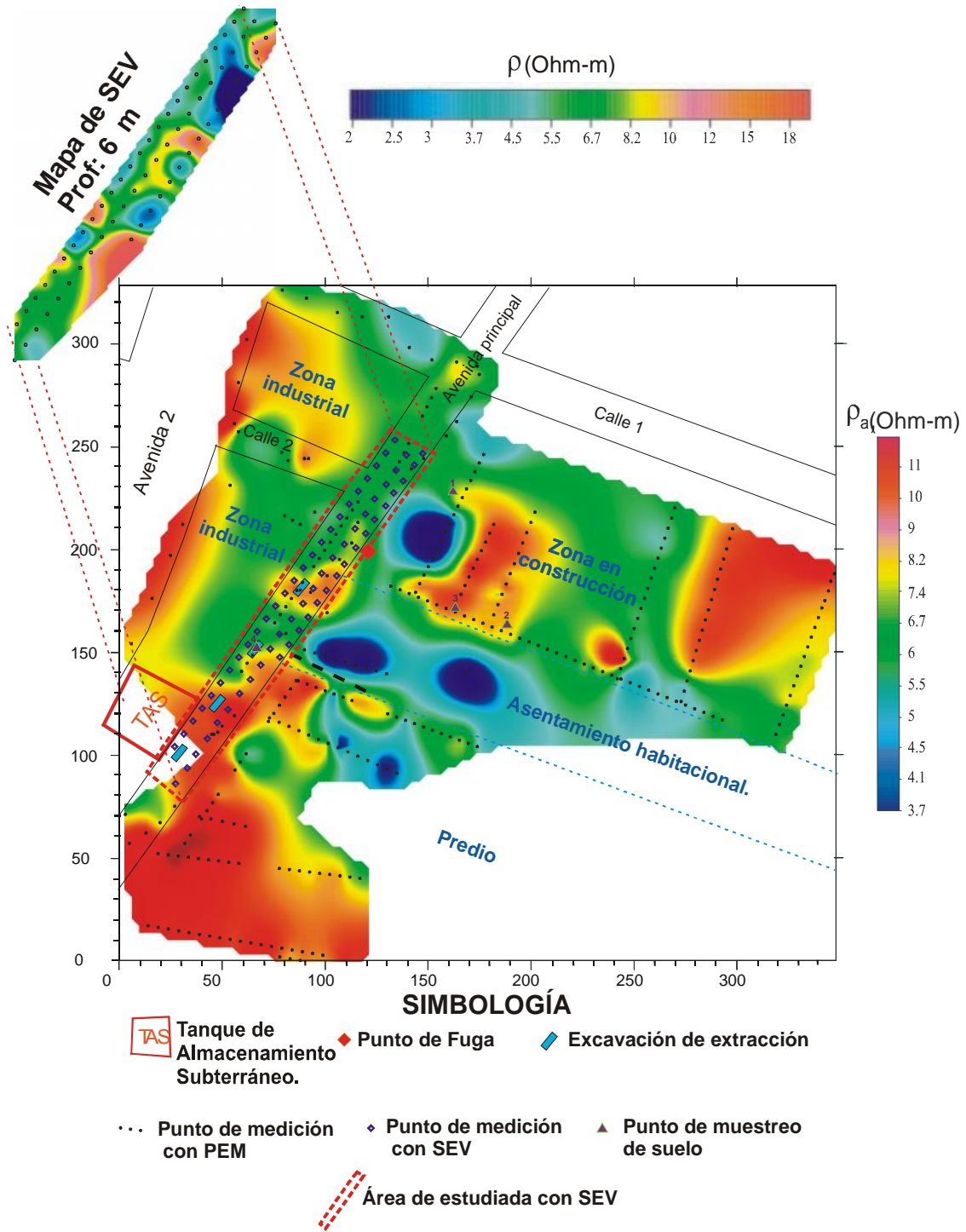


Figura III.17: Mapa comparativo de resistividad entre método SEV y PEM.