



Benemérita Universidad Autónoma De Puebla

Facultad de Ingeniería

Colegio de Ingeniería Geofísica

**“Caracterización geoelectrica de suelos contaminados
por hidrocarburos”**

TESIS

**Presentada para la obtener el título de: Licenciatura en
Ingeniería Geofísica**

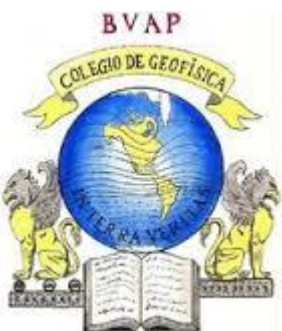
Presenta:

Antonio Pacheco Rios

Asesor:

M. en C. José Castillo Román

Puebla, Pué. México, Febrero 2015.



Dedicatorio

La Dedicatoria de este trabajo es a mi madre por estar siempre conmigo, a mi familia por siempre apoyarme, a mis amigos y maestros por aconsejarme y enseñarme. A mis compañeros por desarrollar actitudes competitivas y de desarrollo intrapersonal y a todas las personas que con sus acciones me inspiran en la vida.

Resumen

El proyecto de tesis consintió en conjuntar dos metodologías para caracterizar un sitio contaminado con hidrocarburos: método directo (muestreo) y método indirecto (tomografía eléctrica 2D). Con el método directo, se obtuvieron 33 muestras de las cuales 14 sobrepasan las concentraciones máximas permisibles de hidrocarburos en suelos para uso de suelo agrícola (1200mg/kg). Esta especificación esta basadas en la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. El método indirecto (tomografías eléctricas 2D) consistió en la generación de 6 Imágenes de resistividad empleando el arreglo Wenner-Schlumberger, con separación entre electrodos de 3 metros. La integración de los resultados de ambos métodos muestra anomalías de baja resistividad (24 a 36 ohm-m) asociadas a altas concentraciones de hidrocarburos por encima de los límites máximos permisibles (LMP). Estas se encuentran rodeadas por un gradual incremento en la resistividad (36 y 45 ohm-m) y concentraciones por debajo de los LMP. Las zonas que se encuentran libres de contaminación presentan resistividades mayores a 45 ohm-m. A partir de esta información se concluyó; que el método directo no logro determinar la distribución de la pluma contaminante en el suelo. Sin embargo, el uso de los métodos indirectos como la tomografía eléctrica nos permitió conocer el movimiento de la pluma contaminante. Con lo cual nos permitirá proponer un muestreo representativo que permita delimitar la contaminación en el suelo correctamente.

Contenido

Capítulo I	1
Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivos generales.....	3
1.3.2 Objetivos particulares	3
1.4 Alcance de la tesis.....	3
Capítulo II Normas mexicanas que regulan la contaminación del suelo	4
2.1 Constituyentes del petróleo.....	4
2.2 Composición química del diésel y de la gasolina	5
2.3 La degradación natural, como vía para la remediación del suelo.....	7
2.3.1 Procesos biológicos	8
2.3.2 Procesos físicos.....	10
2.5 Generalidades sobre tecnologías de remediación del suelo	11
2.6 Norma mexicana: NOM 138-SEMARNAT//SS-2003	12
2.6.1 Caracterización de un sitio contaminado.....	13
2.6.1.1 Descripción del sitio y de la afectación.....	14
2.6.1.2 Estrategia de muestreo	14
2.6.1.3 Plan de muestreo	16
2.6.1.4 Informe.....	16
2.7 Método Geoeléctrico	17
2.7.1 Propiedades eléctricas de las rocas.....	17
2.7.2 Tipos de conductividad.....	18
2.7.3 Fundamentos teóricos prospección eléctrica.....	19
2.7.4 Método geo eléctrico.....	22
3.7.5 Imágenes de resistividad.....	25
Capítulo III	26
3 Aplicación a sitios contaminado por hidrocarburos	26
3.1 características generales de la zona afectada.....	26
3.2 Marco geológico.....	26
3.2.1 Geología regional	26
3.3 Método geoeléctrico aplicado a suelos contaminados	28

3.4 Ubicación de puntos de muestro y sección de tomografía eléctrica.	29
3.4.1 Instrumentación y procedimiento de medición	30
3.4.2 Procesamiento e interpretación de datos geofísicos	31
3.5 Tomografías eléctricas.....	31
3.7 Correlación del método directo (muestreo) y el método indirecto	34
Integración Geofísica- Geológica	36
3.8 Estratigrafía de la zona de estudio.	38
3.8.1 Sección Norte-Sur	39
3.8.2 Sección Suroeste-Noroeste	40
3.9 Extensión de la zona contaminada	41
3.10 Remediación.....	43
3.11 Conclusión de los trabajo de remediación.....	45
Capítulo IV.....	46
Conclusiones y recomendaciones	46
4.1 Conclusiones	46
4.2 Recomendaciones.....	46
Bibliografía.....	47

Capítulo I

Generalidades

1.1 Introducción

La industria del petróleo es una actividad económica significativa en nuestro país; sin embargo, la práctica de sistemas de producción inadecuados como, la exploración en busca de petróleo, los procesos de almacenamiento, transporte y refinación. Han generado una gran cantidad de desechos que son incorporados al suelo, lo cual ocasiona tanto la reducción de su fertilidad como la modificación de los procesos naturales.

La Contaminación del medio ambiente es un problema que causa un gran impacto en el bienestar social y económico de México. Petróleos Mexicanos PEMEX, (2014) en su cuarto informe trimestral 2013, destaca que al cierre de diciembre se incrementó 350 por ciento el volumen de los derrames de hidrocarburos, con respecto a los ocurridos en 2012. Es decir, en 2013 se derramaron 7 mil 236 barriles, contra 2 mil 82 de 2012.



Figura 1. Diagrama de barras que compara eventos relacionados con derrames de hidrocarburos del años 2012 y 2013 a) áreas afectadas b) volumen derramado c) volumen fugado Fuente PEMEX 2014

Detalla que en lo que respecta al volumen de gas fugado se tiene un acumulado de 24 millones de pies cúbicos en el año. Asimismo, explica que las áreas siniestradas se incrementaron, al pasar de 5.7 en 2012 a 70 hectáreas durante 2013.

En México las actividades industriales han provocado serios daños al medio ambiente afectando casi la totalidad de los ecosistemas. El suelo representa un ecosistema donde, actualmente, se pueden encontrar una gran variedad de compuestos tóxicos, en los cuales se incluyen los hidrocarburos derivados de las actividades petroleras. Por esa razón, es importante establecer acciones para devolver la vocación natural del uso de suelo, las áreas afectadas por derrames de hidrocarburos son, en su mayoría de uso agrícola y pastoreo representando un riesgo potencial a las actividades del sector económico. La presencia de estas sustancias químicas en el suelo consideradas como contaminantes debido a las concentraciones que puedan presentar en el ambiente también ponen en riesgo a la salud humana. Si un organismo entra en contacto con un contaminante puede presentar cuadros de intoxicación, y a largo plazo presentar alteraciones genéticas como cáncer, daño en el hígado, riñones y sistema nervioso central. Por esa razón, es importante establecer el desarrollo de acciones que conduzcan a la recuperación y restablecimiento de las condiciones propicias para la evolución y continuidad de los procesos naturales.

Para lo cual se deben determinar la características mínimas del sitio que permitan evaluar la distribución del contaminante. En el caso de derrames recientes, en el cual, el contaminante sea visible en superficie, se podrá realizar un muestreo representativo que abarque la distribución de contaminante en el suelo vertical y horizontalmente. El muestreo tiene como objetivo; obtener muestras de suelo representativas para determinar la existencia de contaminación en el suelo, determinar las concentraciones y verificar si las acciones de remediación lograron reducir la concentración de contaminantes en el suelo, esto se encuentra regulado por la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, la cual también tiene como objetivo definir los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Sin embargo, cuando la contaminación no sea reciente, los métodos directos no siempre garantizaran la identificación y caracterización de plumas contaminantes correctamente. La implementación de los métodos geofísicos, nos permitirán entonces conocer el movimiento del contaminante a través del suelo, su distribución tanto vertical como horizontal y la caracterización de anomalías ocultas no detectadas por la escasa penetración durante la perforación. Por lo tanto, el objetivo de los métodos geofísicos será delimitar la extensión de la contaminación y orientar la distribución y selección de puntos de muestreo, reduciendo su costo y el tiempo asumido en la evaluación. Por lo anterior, es necesario estudiar las características particulares del suelo para determinar su grado de contaminación y, consecuentemente, aplicar algunas de las tecnologías de remediación existentes.

1.2 Hipótesis

Verificar la eficiencia del método geoelectrico su modalidad de tomografía eléctrica, en la caracterización de suelo contaminado por hidrocarburos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

Conjuntar dos metodologías para caracterizar un sitio contaminado con hidrocarburos: método directo (muestreo) y método indirecto (tomografía eléctrica 2D).

1.3.2 Objetivos particulares

- ❖ Conocer las características de los hidrocarburos y su comportamiento en el subsuelo.
- ❖ Definir las unidades eléctricas asociadas a la contaminación de hidrocarburos en el subsuelo.
- ❖ Estimar el volumen de suelo contaminado.

1.4 Alcance de la tesis

Mostrar los fundamentos que justifiquen el empleo de métodos geofísicos en la evaluación de zonas contaminadas por hidrocarburos.

Capítulo II Normas mexicanas que regulan la contaminación del suelo

2.1 Constituyentes del petróleo

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos, compuestos heterocíclicos, asfáltenos y resinas. (Lesser J. M. y Saval S., 2001). La mayoría de los componentes presentes en el petróleo crudo son Hidrocarburos (componentes orgánicos compuestos por átomos de hidrogeno y carbono). Asimismo, se pueden encontrar no sólo carbono e hidrógeno, sino también pequeñas (pero importantes) cantidades de otros (“hetero”) elementos, en particular azufre, nitrógeno y ciertos metales (por ejemplo, níquel, vanadio, etc.). El petróleo crudo está compuesto por la molécula de hidrocarburo más pequeña y simple Metano CH_4 , hasta las moléculas más grandes y complejas que contienen 50 o más átomos de carbono (además de hidrógeno y heteroelementos).

Las propiedades físicas y químicas de cualquier tipo de hidrocarburo o molécula dependen no sólo de la cantidad de átomos de carbono en la molécula, sino también de la naturaleza de los enlaces químicos entre ellos (Enlaces simples, dobles y triples), para formar diferentes clases de hidrocarburos. Se reconocen dos grandes grupos de hidrocarburos: los Hidrocarburos Alifáticos y los Hidrocarburos Aromáticos; Los Hidrocarburos alifáticos, son sustancias de cadena abierta y también cíclicas (alcanos, alquenos, alquinos y alifáticos cíclicos) y los hidrocarburos aromáticos son aquellos cuya base estructural es el anillo bencénico y dependiendo del número de anillos, pueden ser Hidrocarburos monoaromáticos, incluidos la mezcla BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno; (French McCay et al, 2004), y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAPs), los que están compuestos por dos o más anillos bencénicos condensados (Orozco, 2002), como el Naftaleno (2 anillos), Fenantreno y Antraceno (3 anillos).

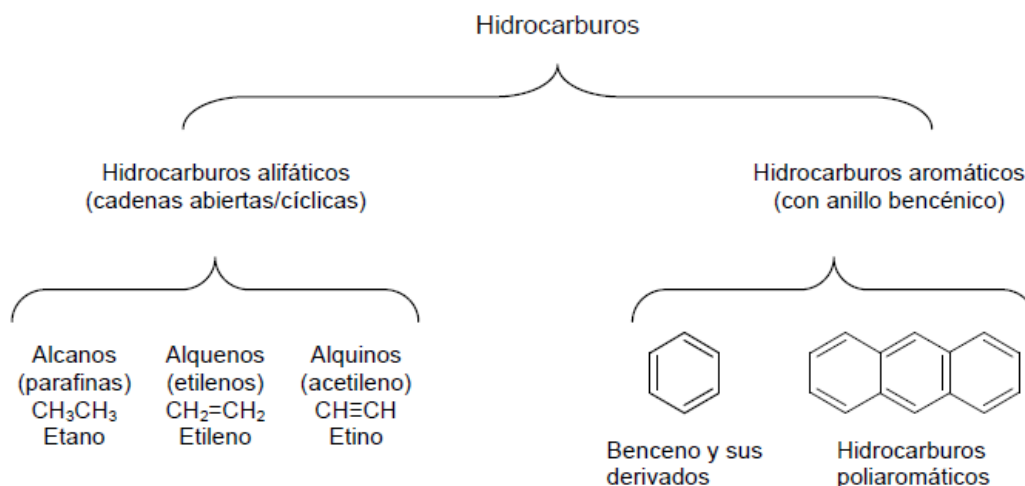


Figura 2.1 Principales grupos de hidrocarburos que conforma el petróleo (Dorn et al, 1998).

2.2 Composición química del diésel y de la gasolina

En las refinerías se transforma el petróleo crudo en productos terminados y refinados (gas LP, gasolina, combustible pesado, combustible diésel, materias primas de petroquímicos, gasóleo de calefacción, aceite combustible y asfalto) mediante la separación de crudos en diferentes *fracciones* (cada una con un punto de ebullición y distribución de la cantidad de carbono únicos) y luego el procesamiento de estas fracciones en productos terminados, mediante una secuencia de transformaciones físicas y químicas.

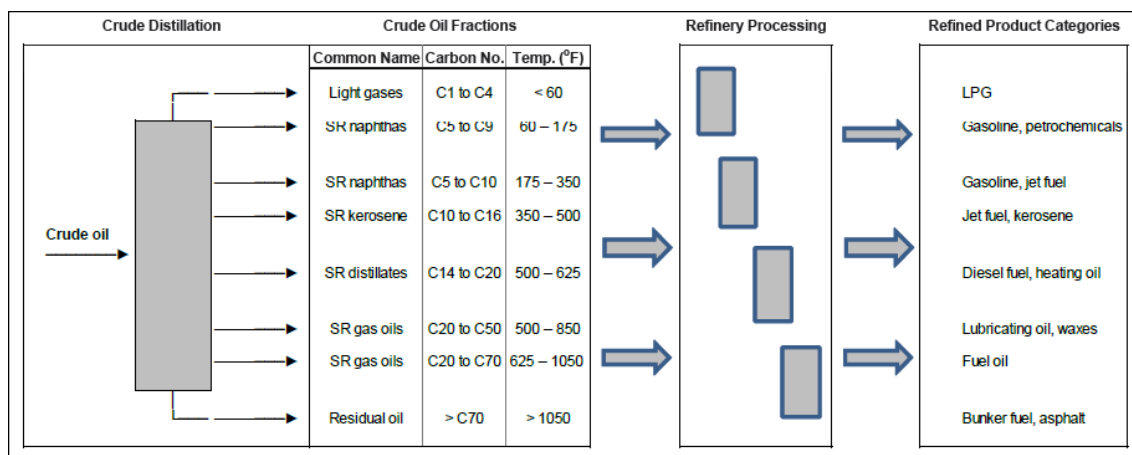


Figura 2.2 Vista esquemática de la destilación del petróleo crudo y el procesamiento desde su origen (ICCT, 2001)

Los gases que generalmente poseen de uno a cuatro átomos de carbono, se obtienen a temperaturas muy bajas, menores a 60° F, le siguen gasolinas, Gasolventes y Gasnafta con un intervalo entre 5 a 9 átomos de carbono los cuales destilan entre 60 y 175 ° F, son compuestos con el menor peso molecular. Posteriormente destilan Kerosina, Gasóleo y Diésel con 14 a 20 átomos de carbono, que destilan a temperaturas entre 500 y 625°F. Las fracciones de hidrocarburos que contienen entidades entre 20 y 70 átomos de carbono se obtienen a temperaturas entre 625 y 1050°F. Finalmente el combustóleo que es el residuo de la destilación, contiene los hidrocarburos de más alto peso molecular los cuales también son los más complejos.

Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales llamados hidrocarburos indicadores. En la gasolina, los hidrocarburos indicadores son los BTEX; Benceno es el más peligroso de estos compuestos por sus características carcinógenas y tóxicas. Tolueno y Etilbenceno no están considerados carcinogénicos, si bien son tóxicos. A largo plazo, el Tolueno y Etilbenceno dañan el hígado, riñones y sistema nervioso central. Xilenos son una mezcla de isómeros orto, meta y para, con dos grupos metilos anexos a un anillo de Benceno (di-metilbenceno) (Rosario R. 2013).

En los combustibles estos mono aromáticos se encuentran en baja proporción, por ejemplo, en la gasolina el Benceno se encuentra en 0.12% y 3.5% y el Naftaleno entre 0.09% y 0.49%. El Tolueno es el que si puede alcanzar porcentajes mayores, de hasta 21.8%. Lo que sí es un hecho que los BTEX se encuentran en mayor proporción en la gasolina que en el diésel, mientras que los poli aromáticos como el naftaleno se presentan proporciones superiores en el diésel, comparado con las gasolinas (Lesser J. M. y Saval. S. 2001).

Compuesto	Gasolina	Diesel
Benceno %	0.12 - 3.50	0.50
Tolueno %	2.73 - 21.80	1.33
Etilbenceno %	0.36 - 2.86	0.37
<i>o</i> -xileno %	0.68 - 2.86	1.01
<i>m</i> -xileno %	1.77 - 3.87	0.96
<i>p</i> -xileno %	0.77 - 1.58	0.35
Naftaleno %	0.09 - 0.49	0.50

Tabla 2.1 Contenido de algunos hidrocarburos indicadores en combustibles (Lesser J. M. y Saval. S. 2001)

El diésel contiene gran variedad de hidrocarburos poli aromáticos, entre ellos: Antraceno, Fenatreno, Fluoranteno, Ancenafteno, Fluoreno y Pireno, los cuales son tóxicos pero no cancerígenos. Otros como Criseno, Benzopireno, Benzoantraceno, Benzofluoranteno y Benzofluoreo que se encuentran en aceites gastados y combustibles quemados si son cancerígenos.

La gasolina y el diésel son mezclas complejas de hidrocarburos destilados del petróleo, que contiene alrededor de 150 compuestos diferentes (Riser-Roberts 1992; Mattney, 1994). La gasolina se caracteriza por contener hidrocarburos con bajo peso molecular que son muy volátiles, en comparación con los que están presentes en el diésel. La pérdida de los componentes volátiles en un combustible permite diferenciar un producto fresco de otro antiguo. Cuando un combustible en fase líquida o absorbido en el suelo permanece expuesto a la intemperie, el viento ocasiona la pérdida de los hidrocarburos volátiles, mientras que los rayos solares pueden provocar reacciones fotoquímicas en todos sus componentes. La combinación del viento y de la exposición al sol, ocasiona modificaciones químicas, descomposición o incluso degradación total de los hidrocarburos (Lesser J. M. y Susana S., 2000).

COMPUESTOS DE LAS GASOLINAS	CAPACIDAD DE		
	ABSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a) Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	100	0	0
Naftaleno	61	8	31
Fenantreno	88	2	10
1-pentano	0.1	99.8	0.1
Fenol	9	0.01	91
Tolueno	3	77	20
Xileno	15	54	31

Tabla 2.2 Capacidad de absorción, volatilización, solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas. (Lesser J. M. y Saval. S. 2001)

2.3 La degradación natural, como vía para la remediación del suelo

La degradación, también conocida como remediación por atenuación natural o remediación pasiva, comprende los procesos que ocurren en forma natural y que pueden ser biológicos (biodegradación aeróbica o anaeróbica), físicos (dispersión, difusión, volatilización, dilución por recarga, etc.) y químicos (sorción seguida de reacciones químicas o abióticas) lo que en conjunto reducen la cantidad total de un contaminante presente en el suelo (Lovely, 2003).

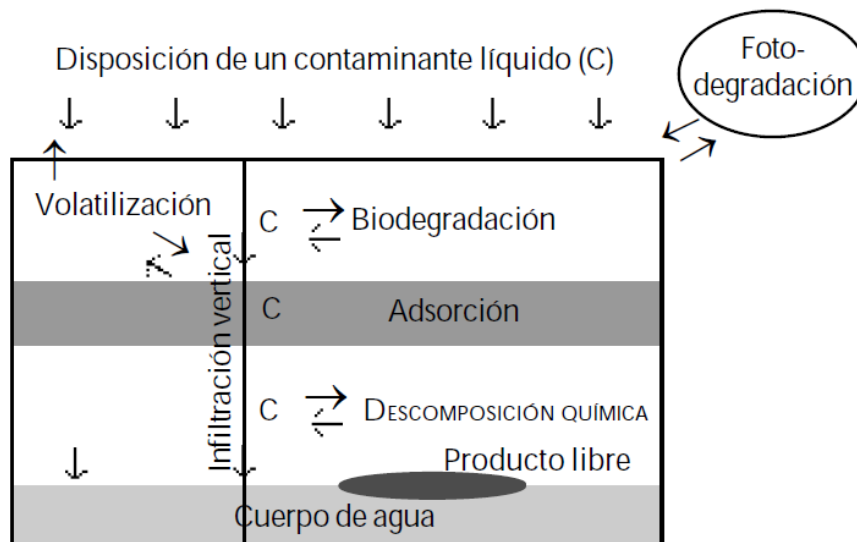


Figura. 2.3 Diagrama de algunos procesos importantes que influyen en el destino y transporte de un contaminante durante su infiltración vertical (Eweis et al. 1998).

2.3.1 Procesos biológicos

El suelo es un cuerpo natural que confirma el hábitat de bacterias, hongos, levaduras, virus y plantas superiores, entre otros, que sirve para la alimentación de los animales u del hombre a través de los ciclos tróficos. El suelo y los microorganismos mantienen los sistemas ecológicos, ya que aportan los componentes químicos y minerales (como resultados de la biodegradación; y complejos orgánicos como ácidos húmicos y fulvicos, enzimas, vitaminas, hormonas y antibióticos; además de albergar una rica reserva genética (IMP, 2006).

La biodegradación típicamente da cuenta de la mayor parte de la masa removida de hidrocarburos en situaciones de remediación intrínseca. En la bioremediación, tanto aeróbica como anaeróbica, la pérdida de grupos funcionales y cambios secuenciales en el compuesto hasta su degradación ocurre como resultado de la descomposición de los hidrocarburos, debido a la acción de bacterias que oxidan a los compuestos orgánicos para obtener energía. Los hidrocarburos terminan convirtiéndose en la masa celular de nuevas bacterias y microbios que crecen a costa de ellos, teniéndose también como productos laterales al dióxido de carbono y agua. Se sabe que los microorganismos que degradan hidrocarburos son muy selectivos y cada especie sigue su propia ruta de degradación (Ridgeway *et al.*, 1990; Chaudhry, 1994); sin embargo, no es necesario ni menos vital conocer el mecanismo preciso, mientras ocurra lo más importante: la biorremediación..

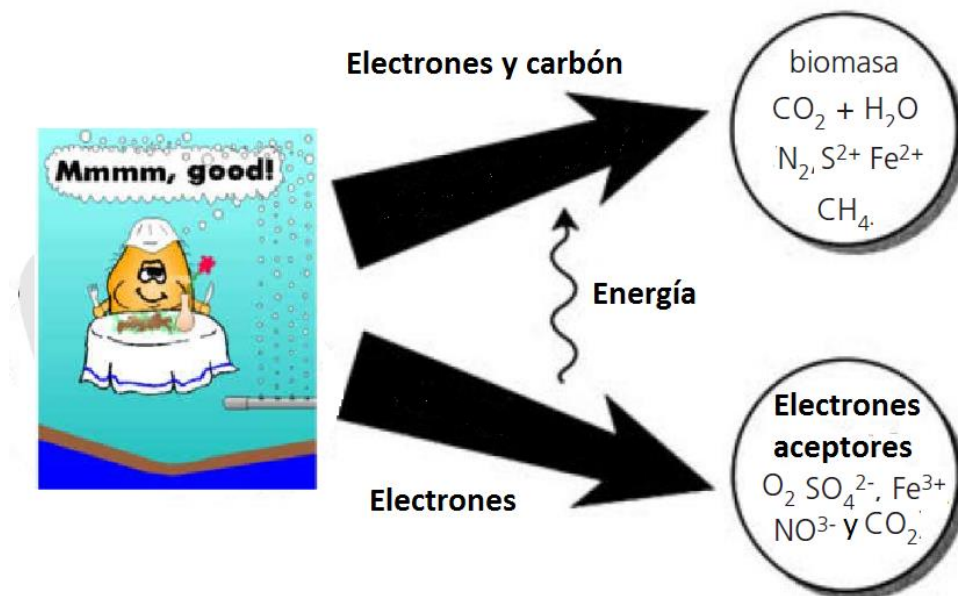


Figura 2.4 Esquema de las reacciones de degradación de contaminantes en el suelo (Maroto y Rogel, 2002). Principio de degradación de contaminantes.

Reconociendo esto, la biodegradación puede ser simplificada a una mera reacción química de óxido-reducción. La cadena se inicia con un sustrato orgánico, en este caso el hidrocarburo, que es externo a la célula actúa como donante de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicho contaminante. Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, Sulfatos SO_4^{2-} , Nitratos NO_3^- , $Fe(III)$ y/o Dióxido de carbono CO_2 . La biodegradación es aeróbica cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones debido a que la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias; sin embargo, si se utilizan los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y la biodegradación será de tipo anaerobia (Borden *et al.*, 1997; Maroto y Rogel, 2002).

En una fuente de contaminación, tal como una pluma de contaminación proveniente de un derrame de hidrocarburos, existen distintas zonas en la cuales diferentes procesos degradativos predominan, dentro del núcleo de contaminación predomina la producción de metano; En esta zona, las bacterias metanogénicas producen metano por fermentación del acetato, o utilizan el CO_2 como aceptor de electrones y como donador de electrones puede utilizar hidrogeno, acetato, formando compuestos de metilo y alcoholes. En otras zonas las bacterias sulfato reductoras crecen utilizando Sulfatos SO_4^{2-} u Oxianiones de sulfuro como aceptores de electrones y Acetato, Benceno, Lactato y Glucosa como donadores de electrones (Suthersan ,1999). En la zona de reducción de hierro, las bacterias hierro reductoras son una clase especial de microorganismos que utilizan los óxidos e hidróxidos de hierro como aceptores de electrones, obtienen energía de la reducción del hierro Fe^{3+} a Fe^{2+} acoplada a la oxidación de contaminantes orgánicos acetato, benceno y otros metabolitos para formar CO_2 y moléculas de agua (Lovely, 1991); En condiciones nitrato reductora las bacterias oxidan los compuestos orgánicos, por ejemplo, la oxidación de Benceno hasta CO_2 (Suthersan, 1999).

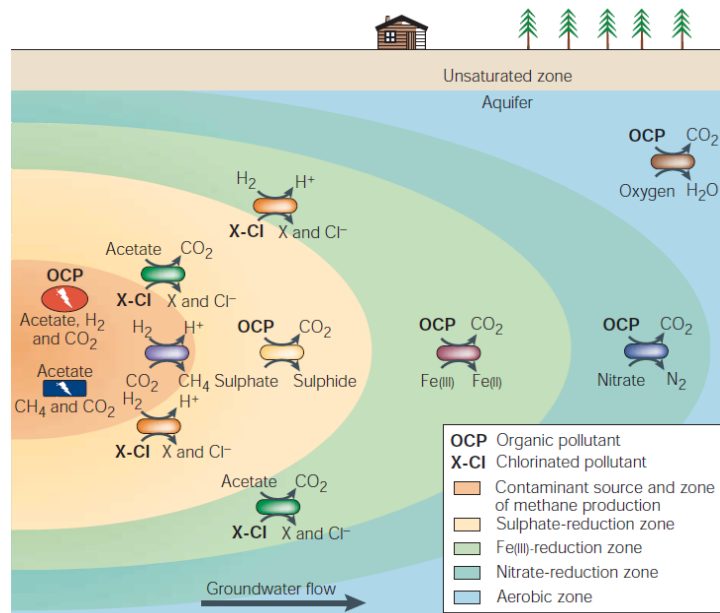


Figura 2.5 oxidación de los contaminantes orgánicos, generalmente existen distintas zonas en las cuales diferentes procesos degradativos predominan (Lovely. D., 2003).

2.3.2 Procesos físicos

Si los contaminantes liberados durante un derrame de hidrocarburos permanecieran en el punto de liberación, los contaminantes en el suelo causarían un menor impacto ambiental. Sin embargo, la mayoría de los hidrocarburos migran desde sus puntos de liberación hasta afectar áreas más extensas. El movimiento de los hidrocarburos en el subsuelo puede ser a través de las aguas subterráneas, capas permeables o estructuras geológicas. Las características litológicas de los suelos pueden actuar como agentes atenuadores de los efectos que puedan provocar en el ambiente; estos mecanismos atenuantes no resultan en una reducción en el total de la masa contaminante, pero sí de una disminución en la concentración. Dentro de las características propias del suelo podemos encontrar estratos de matriz arcillosa que sirva de trampa geológica de manera que puedan contener la contaminación o el techo de un acuífero confinado que presente un alto grado de inaccesibilidad a la zona saturada.

El número de átomos de carbono contenidos en la estructura molecular de los hidrocarburos determinan cómo puede ser el movimiento del contaminante, y si éste es o no persistente en el ambiente. Según Kesley et al., (1997) los hidrocarburos en el subsuelo se separan en tres fases, cada uno tiene un comportamiento diferente tanto en el suelo como en el agua, cuando los hidrocarburos llegan a la superficie del suelo, los compuestos de alta viscosidad como el crudo pesado tienden a moverse horizontalmente, mientras que la gasolina y aceites de baja viscosidad penetran fácilmente en el suelo. La Fracción Volátil se evapora siendo responsable de la pérdida

de hidrocarburos de bajo peso molecular tamaño C_5 a C_{10} , dependiendo de las características físicas y químicas del tipo de hidrocarburo, aproximadamente 25-50% de los hidrocarburos derramados pueden llegar a evaporarse; La fracción de hidrocarburos que contienen átomos de carbono de C_{10} a C_{28} cuando llegan al manto freático se disuelven en la columna de agua, formando una capa de nata en el nivel freático que se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea; La Fracción sólida que contiene los hidrocarburos más pesados estructura molecular mayor a 18 átomos de carbono, no se disuelve o evapora, si no pasa a emulsificarse y a sedimentarse, quedando adherida o adsorbida en la matriz del suelo. Una vez que los hidrocarburos se emulsifican es difícil tratarlos químicamente, y pueden llegar a mezclarse completamente con la columna de agua. Los hidrocarburos pesados pueden permanecer dispersos en la columna de agua, pero últimamente se sedimentan al fondo incorporándose con los sedimentos. Esta parte del derrame representa una fuente de contaminación potencial de larga duración.

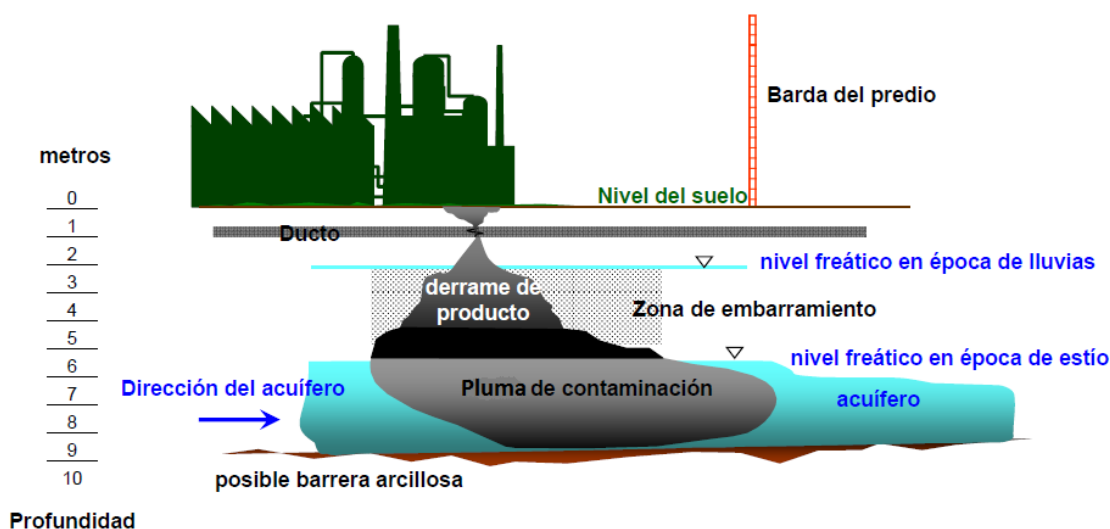


Figura 2.6 Mecánica de contaminación de suelos y acuíferos (Pemex, 2014).

2.5 Generalidades sobre tecnologías de remediación del suelo

El tipo de contaminante y sus características físicas y químicas determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que el contaminante debe tratarse. Además, dichas propiedades determinan cómo puede ser el movimiento del contaminante y si éste es o no persistente en el ambiente. La estructura química de un contaminante determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para la remediación. El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la selección de una adecuada tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, están determinados por las características naturales de los suelos, sedimentos

y cuerpos de agua dentro del sitio contaminado. En generalmente, ninguna tecnología por si sola puede remediar un sitio por completo.

La implementación de estas tecnologías puede aplicarse “in situ” o “ex situ” a los sitios contaminados; la biodegradación natural como tecnología de remediación “in situ” para el tratamiento y recuperación de sitios contaminados, se basa en el principio que el metabolismo de la célula de los organismos acaba degradando los compuestos orgánicos hasta su transformación en moléculas inorgánicas como CO_2 y agua. Las ventajas que presentan estas tecnologías en la remediación de sitios contaminados son los bajos costos de operación pues los contaminantes son destruidos y transformados “in situ”, sin la necesidad de ser excavados y transportados a otras partes y normalmente no necesita un mínimo de tratamientos adicionales. Sin embargo, este tipo de tratamientos generalmente requiere de periodos de tratamiento largos y es menos seguro en cuanto a la uniformidad del tratamiento debido a la heterogeneidad propia del suelo, lo que pudiera ocasionar con la dispersión del contaminante en el suelo. En cambio las tecnologías “ex situ”, generalmente requieren de periodos más cortos que la tecnología “in situ”, por lo que son más seguros en cuanto la contención y evitando la dispersión del contaminando, eliminando las fuentes activas de contaminación, además de la uniformidad del tratamiento, ya que puede homogeneizarse y mezclarse continuamente. Otra ventaja, es que los productos permanecen dentro de la unidad de tratamiento hasta la obtención de productos no peligrosos. Sin embargo, los tratamientos “ex situ” requieren de la excavación del suelo dando como resultado incremento en los costos (Van Deuren et al., 1997).

2.6 Norma mexicana: NOM 138-SEMARNAT//SS-2003

La norma mexicana que lleva como nombre “Límites Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación”. NOM-138-SEMARNAT/SS-2003”. Determina los niveles permisibles de hidrocarburos en los suelos según el tipo específico de hidrocarburos y el uso predominante del suelo. Concentraciones por encima a los expuestos en la norma requiere de una investigación detallada del sitio contaminado para determinar el daño real y potencial en las diferentes matrices ambientales afectadas, de esta forma controlar y disminuir los niveles de hidrocarburos en el ambiente orientados a la protección y preservación de los recursos naturales.

2.6.1 Caracterización de un sitio contaminado

El objetivo de esta actividad es la evaluación confiable que describa cuantitativamente, en términos de concentraciones y cualitativamente la distribución horizontal y vertical de las plumas de contaminación. Esta información que es fundamental para orientar actividades de contención y recuperación de contaminantes. De lo anterior se deduce la necesidad de disponer de información y conocimiento del problema que se pretende estudiar. Es importante conocer las condiciones locales de la zona afectada, por ejemplo, el relieve topográfico, si este es muy acentuado o no; Principales corrientes superficiales: Ríos, lagos, presas, etc., y subterráneas: profundidad de nivel freático, dirección del flujo de la corriente subterránea y conductividad hidráulica. Así como el conocimiento de la geología, con lo cual podemos inferir el posible movimiento de los hidrocarburos en el subsuelo entre una formación con intercalaciones de arenas en una gruesa formación de arcillas o el de encontrar un sustrato impermeable que frene el movimiento de los hidrocarburos; en seguida se enlistan algunos de los aspectos importantes que no se deben pasar por alto en la investigación de una zona contaminada por hidrocarburos:

- a) Cartografía topográfica
- b) Fotografías aérea
- c) Mapas y cortes geológicos
- d) Información sobre el suelo: obtenida mediante perforaciones de pozos, análisis de suelo.
- e) Datos y resultados de otros estudios geológicos, geofísicos o químicos previos en la zona afectada.

Otros datos de interés práctico, tales como derecho de vía (ductos de PEMEX), vías de comunicación, Demografía, uso de suelo, tipo de clima, temperatura y precipitaciones medias anuales.

Después de tener la información organizada y entendida se procede a hacer una visita de inspección. En ésta se constata la información preliminar del sitio, además de reconocer físicamente la zona e instalaciones, las causas de la contaminación y la magnitud de impacto. Con esta visita es posible plantear un plan de muestreo, que va a proporcionar la información complementaria para realizar un acertado diagnóstico de la contaminación, por eso es de importancia elaborar un plan que permita abarcar toda el área afectada.

Para las especificaciones de la caracterización, la norma establece que debe contener como mínimo los siguientes elementos:

- ✓ Descripción del sitio de afectación
- ✓ estrategia de muestreo
- ✓ plan de muestreo
- ✓ informe

2.6.1.1 Descripción del sitio y de la afectación

Se realiza un levantamiento topográfico para la construcción de un mapa en coordenadas UTM y a una escala adecuada donde se identifiquen los puntos de muestreo además de conocer los antecedentes del lugar afectado así como reportar el tipo de contaminante.

2.6.1.2 Estrategia de muestreo

La Norma 138 específica que los hidrocarburos deberán analizarse a partir del tipo de contaminante vertido y sus LMP de acuerdo al uso de suelo tabla 3.6; por ejemplo, en el caso de crudo se deberán analizar los Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) tanto en su fracción aceitosa como de diésel, así como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

PRODUCTO CONTAMINANTE	HIDROCARBUROS				
	FRACCIÓN PESADA	FRACCIÓN MEDIA	HAP	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezcla de productos desconocidos derivados del petróleo	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X
Combustóleo	X		X		
Parafinas	X		X		
Petrolatos	X		X		
Aceites derivados del petróleo	X		X		
Gasóleo		X	X		
Diésel		X	X		
Turbosina		X	X		
Queroseno		X	X		
Creosota		X	X		
Gasavión				X	X
Gasolvente				X	X
Gasolinas				X	X
Gas nafta				X	X

Tabla 2.3 Hidrocarburos para analizarse en función del producto contaminante (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, 2005).

Los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se usan para describir una gran familia de varios cientos de compuestos químicos originados del petróleo crudo. Debido a que existen muchos productos químicos diferentes en el petróleo crudo y en otros productos del petróleo, no es práctico medir cada uno en forma separada. Los científicos han

dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que tienen un comportamiento similar tanto en el suelo como en el agua llamados fracciones de hidrocarburos, cada fracción contiene muchos productos químicos individuales.

Fracción de hidrocarburos	Uso del suelo predominante ¹ (mg kg ⁻¹ base seca)		
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

Tabla 2.4 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo. 1. Agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación. 2. Para uso de suelo mixto. 3. Industrial incluye comercial. (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, 2005).

Asimismo, la NOM-138-SEMARNAT/2003 menciona los límites máximos permisibles por fracción de Hidrocarburos asociados a derrames en función del uso del suelo; tipo de suelo de uso agrícola incluye suelo forestal, recreativo y de conservación, tipo de uso de suelo residencial e industrial incluye zonas comerciales. En el caso de ser un suelo mixto, deberá aplicarse el límite del menor valor de los usos de suelo. Estas especificaciones se presentan en la tabla 2.4.

En el caso de derrames o fugas recientes, en los que el contaminante sea visible en superficie, se podrá realizar un muestreo dirigido tomando como mínimo el número de puntos de muestreo ya establecidos en dicha norma tabla 2.5 de acuerdo con la superficie contaminada. Si la contaminación no es visible, homogénea y reciente, se debe aplicar una estrategia de muestreo que considere métodos estadísticos. Cabe mencionar que la selección de puntos de muestreo debe abarcar vertical y horizontalmente la distribución del contaminante en el suelo; asimismo, se debe considerar la topografía y dirección del flujo del manto freático.

AREA CONTAMINADA (ha)	PUNTOS DE MUESTREO
HASTA 0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	14
0.5	15
0.6	16
0.7	17
0.8	18
0.9	19
1.0	20
2.0	25

Tabla 2.5 Puntos mínimos de muestreo de acuerdo con el área contaminada (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, 2005).

2.6.1.3 Plan de muestreo

La norma plantea que el responsable tenga un plan de muestreo sustentado en la ubicación de los puntos, la profundidad y el volumen de las muestras y se lo comunique a su equipo, asignando a cada quien una actividad. Otro aspecto importante es enfrascar de forma adecuada la muestra, además de llevar su respectiva cadena de custodia (registro que acompaña a las muestras desde su obtención hasta su entrega al laboratorio de pruebas y análisis) y realizar un duplicado por cada 10.

El plan de muestreo debe contener los puntos siguientes:

- ❖ Establecer y definir las responsabilidades del personal involucrado en cada procedimiento.
- ❖ Sustentar la ubicación y el número de puntos de muestreo, la profundidad y el volumen de las muestras.
- ❖ Describir la técnica, el equipo de muestreo y las medidas de seguridad.
- ❖ Establecer las medidas de aseguramiento de calidad del muestreo, incluyendo la cadena de custodia.
- ❖ Especificar los recipientes, el modo de preservación y el tipo de transporte de la muestra.

Las muestras, siempre deben ser simples, esto es, que el material colectado se tome en un solo punto. Para obtener la muestra no se deben utilizar equipos que necesiten fluidos de perforación y que ocasionen la pérdida de hidrocarburos volátiles. Como un procedimiento de aseguramiento de calidad, la norma dice que se debe obtener y analizar una muestra duplicada por cada diez muestras tomadas.

2.6.1.4 Informe

El informe de caracterización del sitio contaminado debe contener la siguiente información; la distribución del contaminante, las concentraciones, tipo de contaminante, antigüedad del producto, uso de suelo del sitio, características geo hidrológicas del suelo y volumen de suelo a remediar. Además de la información referente al procedimiento de restauración del sitio afectado el informe debe de contener los resultados del muestreo final comprobatorio, indicando que las concentraciones en el sitio no rebasan los límites establecidos en la norma.

2.7 Método Geoelectrico

Los métodos eléctricos de prospección, también denominados geo eléctricos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética. Existen tres magnitudes principales o constantes materiales que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en la subsuelo. Estas magnitudes son la permeabilidad magnética μ , la constante dieléctrica o permitividad ε y la resistividad ρ (Orellana, 1982).

2.7.1 Propiedades eléctricas de las rocas

La prospección eléctrica es un método geofísico que está basado en las diferentes propiedades eléctricas de las rocas. Las características que de ellas se consideran principalmente son las siguientes:

Si consideramos un cubo de materia de longitud L a través del cual atraviesa una corriente I . El material dentro del cubo resiste la conducción de la electricidad, resulta de la caída del potencial entre las dos caras opuestas. La resistencia R es proporcional a la longitud L del material resistivo e inversamente proporcional al área de la sección transversal A ; la constante de proporcionalidad es la resistividad real ρ .

La resistencia es proporcional a la longitud L entre el área A :

$$R \propto \frac{L}{A} \quad (1)$$

Esto se escribe como

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2) \quad \rho = \frac{RA}{L} \quad (3)$$

De acuerdo a la ley de Ohm la razón de la caída de potencial y la corriente aplicada también puede definirse como la resistencia R de un cubo de materia unitario y estas dos expresiones pueden ser combinadas a la forma del producto de la resistencia ohm y la distancia (área / longitud; metros); por lo tanto las unidades de resistividad son ohm metros.

El inverso de la resistividad es la conductividad σ la cual tiene unidades de siemens/metro (S/m) la cual es equivalente a $ohm^{-1} * m^{-1}$.

La corriente I que pasa por un cuerpo y la diferencia de potencial δV que se produce está relacionada por la ley de ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad (4) \quad \rho = \frac{VA}{IL} \quad (\Omega/m) \quad (5)$$

Esto puede ser escrito en términos del vector de campo eléctrico (*voltios/m*) y la densidad de corriente *ampere/m²*, como:

$$\rho = \frac{E}{J} (\Omega m) \quad (6)$$

A continuación se muestra valores de resistividad para algunas rocas y minerales

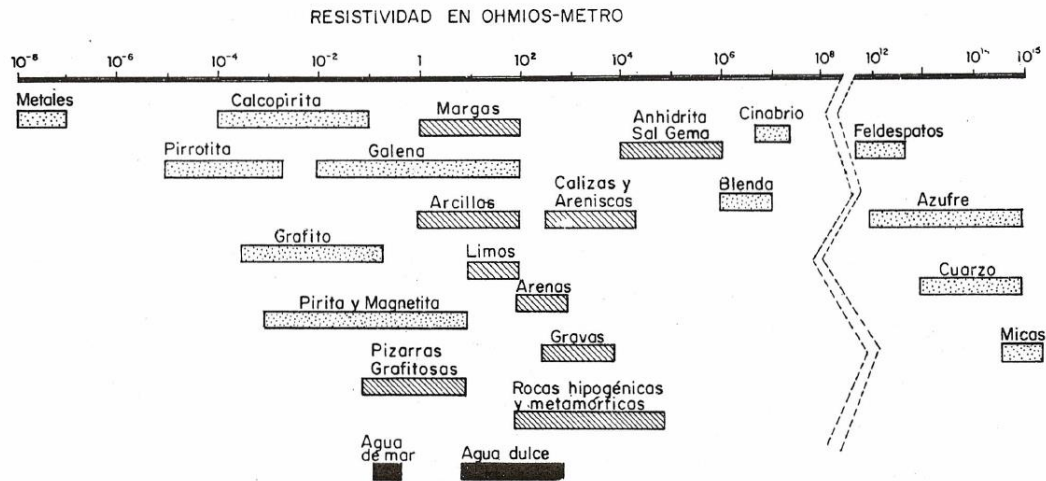


Figura 2.7 Márgenes de variación de la resistividad más comunes en algunas rocas y minerales. (Orellana, 1982)

La resistividades de las rocas puede variar mucho, según la cantidad de agua que contengan y la localidad de la misma, por lo no queremos dar cifra concretas. Pero es de interés saber que cuando una roca esta seca o con saturación de agua, la resistividad varia de manera considerable lo que se manifiestan entre dos tipos de rocas que da lugar a que sea posible identificar con cierta claridad un manto acuífero entre dos capas.

Resistividad de las rocas depende de demasiados factores para que pueda atribuirse un solo valor, ni siquiera un margen moderadamente estrecho de variabilidad, a la de cada tipo de roca. Por el contrario, a cada uno de ellos suele corresponder un campo de variación de unos tres órdenes decimales, ya que, aunque la naturaleza de la roca sea la misma, influyen las condiciones locales de contenido en agua, conductividad de ésta, tamaño de grano, porosidad, metamorfismo, efectos tectónicos, etc. Por otra parte, dado un valor de resistividad, tampoco puede identificarse como correspondiente a un solo tipo determinado de roca.

2.7.2 Tipos de conductividad

Se distinguen en los minerales y rocas dos clases de conductividad. Llamada metálica o electrónica, que poseen ciertos tipos de minerales que conducen electricidad como

los llamados metálicos y que se verifican por transporte de electrones. Ejemplo la pirita, galena sulfuro de cobre, la magnetita y la pirulosita.

El otro tipo de conductividad es la electrolítica y se refiere a los minerales y rocas aislantes en estado de sequedad como las arenas cuarzosa o las areniscas, pero que conducen la corriente merced al agua que contienen; en este caso existe transporte de iones al paso de corriente y la conductividad es función de la cantidad de agua que contiene y de la cantidad de sales ionizadas disueltas en ellas.

Actividad electroquímica está relacionada con la composición química de las rocas, pero principalmente con la composición y concentración de los electrolitos que las impregnan.

2.7.3 Fundamentos teóricos prospección eléctrica

Para un electrodo en la superficie en un medio homogéneo de resistividad ρ , el flujo de corriente se distribuye radialmente. La caída de potencial entre dos puntos en la superficie puede ser descrita por el gradiente del potencial, el cual es negativo porque el potencial decrece en la dirección de flujo corriente. Líneas de igual voltaje equipotenciales intersectan líneas de igual corriente a ángulos rectos. La densidad de corriente J es la corriente I dividida por el área sobre la cual la corriente está distribuida una semiesfera; $2\pi r^2$, por lo tanto la densidad de corriente decrece con el incremento de la distancia de la fuente de corriente.

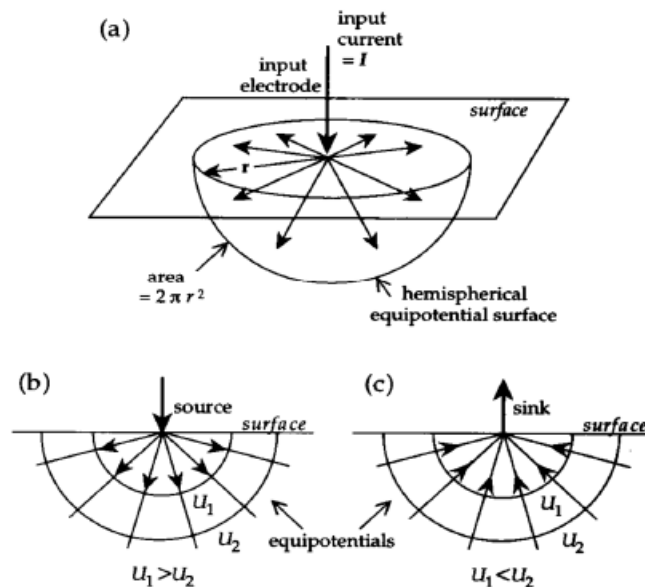


Figura 2.8 a) Trasmisión de corriente en un medio homogéneo. b) y c) líneas de corriente y equipotenciales producidas por una fuente y sumidero de corriente. (Geuna S., 2013).

Donde el campo eléctrico E de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r , J representa el vector de densidad de corriente $ampere/m^2$, σ la conductividad $ohm^{-1} * m^{-1}$ y el vector E de campo eléctrico $voltios/m$, definiéndose como el gradiente del potencial eléctrico $E = -\delta V$.

$$I = 2\pi r^2 J \quad (4)$$

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (5)$$

$$E = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (6)$$

La diferencia de potencial a través de una semiesfera con incrementos en el espesor está dado por $\frac{\delta V}{\delta r} = \rho \cdot J = \rho \frac{I}{2\pi r^2}$. (7)

Así el voltaje V_r a un punto r de la fuente corriente es:

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (8)$$

Para una fuente de corriente, el potencial V_p en cualquier punto P en suelo es igual a la suma de los voltajes para 2 electrodos, tales que $V_p = V_A + V_B$ donde V_A y V_B son la contribución de los potenciales de los electrodos.

$$V_p = - \int_{r_1}^{r_2} \delta V = - \frac{I\rho}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (9)$$

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

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (10)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (11)$$

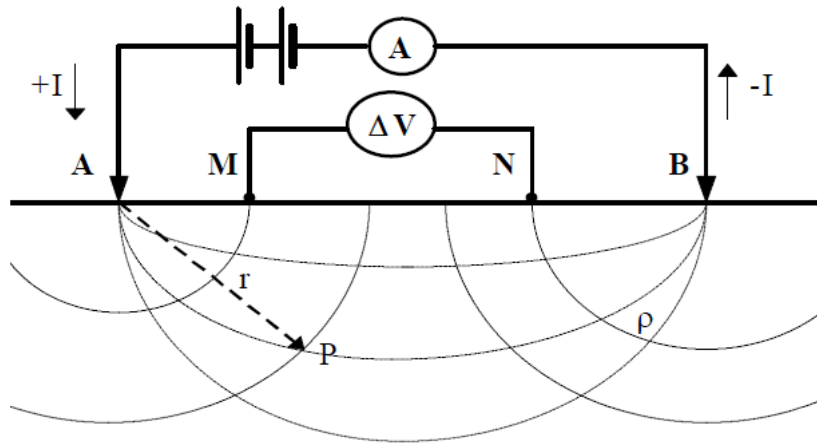


Figura 2.9 a) Dispositivo tetraédrico para la medición de la resistividad La inyección de corriente a través de los electrodos A y B genera un campo eléctrico, la diferencia de potencial se mide en los electrodos de potencial M y N. (Geuna S., 2013).

Y la diferencia de potencial será

$$\delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (12)$$

Si despejamos la resistividad

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} * \frac{\Delta V}{I} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$

Donde k resulta ser una función dependiente del tipo de dispositivo empleado, y viene dado por

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (14)$$

En cualquier dispositivo, si conocemos las distancias mutuas entre los electrodos y medimos la intensidad I que pasa por los electrodos A y B y la diferencia de potencial ΔV que, como consecuencia, aparece entre M y N, podremos calcular la resistividad aparente ρ_a mediante una fórmula del tipo.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

Donde K es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo eléctrico.

En el subsuelo heterogéneo puede quizá ser pensado como una pila de capas con diferentes grosores y diferentes resistividades. En el subsuelo heterogéneo la resistividad aparente definitivamente no es una suma ponderada de todas las resistividades sino un resultado diferente para cada medición y sólo si el medio es homogéneo la formula (15) nos dará su resistividad verdadera. (Paul A. Chapel, 1992).

2.7.4 Método geo eléctrico

La rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica es la prospección eléctrica. La implementación de este método de exploración no destructivo, consiste en la medición de las resistividades eléctricas en el subsuelo mediante la inyección de corriente a través de un par de electrodos metálicos C1 y C2, la medición del potencial se realizara en otro par de electrodos P1 y P2. Su disposición en el suelo y el incremento de la distancia entre ellos incrementan la profundidad de exploración.

2.7.4.1 Arreglo Wenner

Los electrodos se encuentran alineados y simétricos con el punto de estación o , y como se ve en la Figura 2.11 los electrodos de inyección de corriente se sitúan por fuera de los electrodos de potencial y las distancias entre estos se incrementan para lograr mayor profundidad de penetración. Tomando "a" como distancia de separación entre electrodos $C1P1 = P1P2 = P2C2 = a$,

Tiene el inconveniente, sobre el Schlumberger, que todos los electrodos han de modificarse en cada medida (Figura 2.11 i). La función k resulta ser que es mucho más sencilla que la del dispositivo Schlumberger.

Factor geométrico

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a}\right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a}\right)} = k = 2\pi a \quad (16)$$

En general, el dispositivo Wenner es eficaz resolviendo cambios verticales de resistividad (estructuras horizontales), pero una de sus desventajas es que es relativamente pobre en detectar los cambios horizontales (estructuras verticales estrechas) cuando el espaciamiento entre electrodos se aumenta (Loke 2001).

2.7.4.2 Arreglo Schlumberger

En este dispositivo, los electrodos de medida $P1$ y $P2$ se sitúan simétricamente a la distancia $a/2$ del punto estación O . Los electrodos $P1$ y $P2$ están separados por una distancia na de los electrodos de corriente $C1$ y $C2$. Como se ve en la Figura 2.11 i) los electrodos de inyección de corriente se sitúan por fuera de los electrodos de potencial y las distancias entre estos se incrementan para lograr mayor profundidad de penetración. Tomando "a" como distancia de separación entre electrodos $P1P2 = a$ y $C1P1$ y $P2C2 = na$

Factor geométrico

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{L-l} - \frac{1}{L+l}\right) - \left(\frac{1}{L+l} - \frac{1}{L-l}\right)} = k = \frac{\pi}{2} \frac{L^2 - l^2}{l} \quad (17)$$

$$k = \pi n(n + 1)a \quad (18)$$

Este arreglo es similar al arreglo Wenner, siendo ambos sensitivos para detectar estructuras horizontales y verticales. Sin embargo, la Figura 3.11 ii) muestra que la profundidad media de investigación para el arreglo Wenner es 10% menor que para el arreglo Schlumberger con la misma distancia entre los electrodos $C1$ y $C2$.

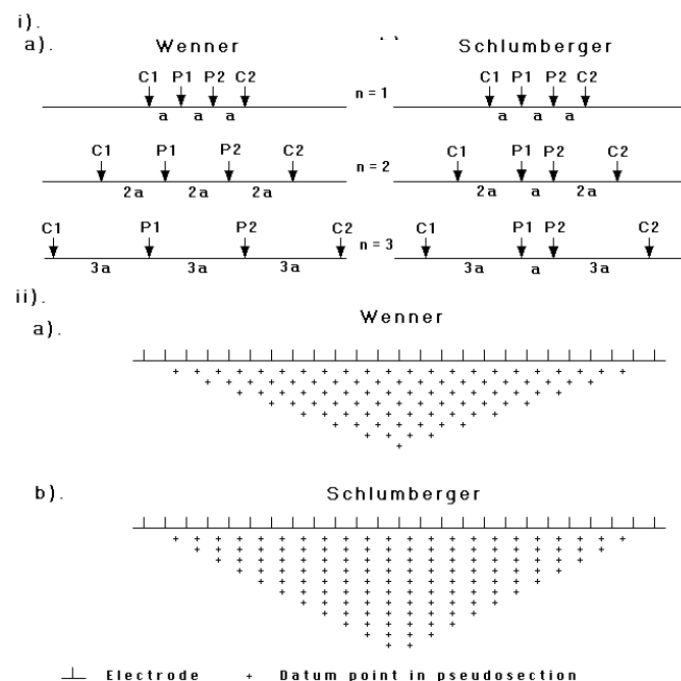


Figura 2.10 i) Disposición de electrodos para el arreglo a) Wenner y b) Schlumberger. ii) pseudosección (Loke, 2004).

2.7.4.3 Arreglo Dipolo Dipolo

Los electrodos P_1 y P_2 están separados por una distancia na con los electrodos de corriente C_1 y C_2 en estos dos pares de electrodos están separados por una distancia a

Factor geométrico

$$k = 2\pi n(n + 1)(n + 2)a \quad (19)$$

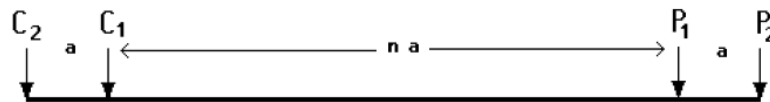


Figura 2.11 Arreglo dipolo dipolo (Loke, 2004)

El arreglo dipolo- dipolo es sensible a cambios laterales de resistividad, no así a cambios verticales de resistividad. Eso significa que es bueno para identificar estructuras verticales, tales como diques y cavidades, pero relativamente pobre en identificar estructura horizontales tales como sills o capas sedimentarias. La profundidad media de investigación de este arreglo depende de ambos el espaciamiento a y el factor n .

2.7.4.4 Arreglo Polo Dipolo

Uno de los electrodos de corriente C_1 o C_2 es fijado a una gran distancia de los otros electrodos. Los cuales tienen un espaciamiento a entre P_1 y P_2 . Separación de na entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 y del de corriente C_2 .

Factor geométrico

$$k = 2\pi n(n + 1)a \quad (20)$$

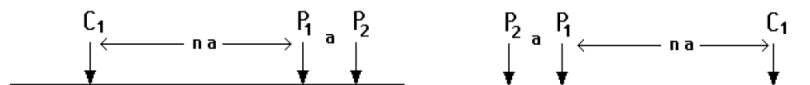


Figura 2.12 Arreglo Polo-Dipole (Loke, 2004)

Esta configuración tiene buena cobertura horizontal pero una señal significativamente más alta comparada con el dispositivo Dipolo-dipolo, además no es tan sensible al ruido como el Polo-polo. El dispositivo Polo-dipolo es asimétrico, a diferencia de los otros arreglos; sobre estructuras simétricas las anomalías de resistividad aparente en la sección son asimétricas. Para eliminar este efecto, sería conveniente repetir las mediciones con un arreglo inverso.

2.7.4.5 Arreglo Polo Polo

Los electrodos de potencial y corriente $C2$ y $P2$ están fijados a una gran distancia de los electrodos $C1$ y $P1$.

Factor geométrico

$$k = 2\pi a \quad (21)$$

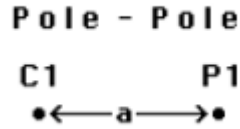


Figura 2.13 Arreglo Polo-Polo (Loke, 2004)

El arreglo Polo-Polo tiene una cobertura horizontal muy amplia y profundidad de investigación mayor que otros arreglos. Sin embargo, tiene una resolución relativamente pobre, reflejada por el espaciamiento comparativamente grande de electrodos.

Una de sus desventajas es que, a causa de la gran distancia que existe entre los electrodos $P1$ y $P2$, se puede generar una cantidad importante de ruido capaz de degradar severamente la calidad de las medidas, por lo que este conjunto se usa principalmente en perfiles 2D relativamente pequeños de 50 a 80 metros totales.

3.7.5 Imágenes de resistividad

Las imágenes de resistividad son un método geoelectrico que mide la variación de la resistividad en alta resolución en 2D. La forma de obtener una imagen es a través de un barrido horizontal del subsuelo a una profundidad constante ($n=1$) y a un espaciamiento de electrodos también constante (a), este escaneo se realiza a lo largo de la línea de muestreo (longitud de la imagen). Posteriormente se incrementa el semiespacio de muestreo ($n=2$), y nuevamente se escanea de manera horizontal toda la línea de medición. Este procedimiento se realiza de manera iterativa n -veces, hasta alcanzar la profundidad deseada características del suelo.

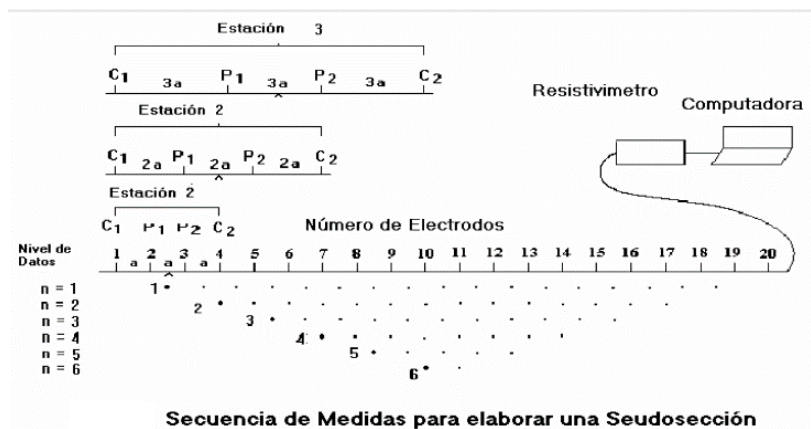


Figura 3.14 Arreglos de los electrodos en los sondeos eléctricos 2-D y la secuencia de las medidas utilizadas para construir los pseudosecciones (Loke, 2004).

Capítulo III

3 Aplicación a sitios contaminado por hidrocarburos

3.1 características generales de la zona afectada

Esta zona se localiza en la parte centro sur del estado de Puebla, teniendo acceso a través de la autopista Puebla-Orizaba. Esta zona fue afectada por un derrame de hidrocarburos hace aproximadamente 2 meses al tiempo que se realizaron las mediciones por lo que se considera un derrame maduro. El derrame fue ocasionado por una toma clandestina del gaseoducto de la Red Minatitlán que trasporta combustible diésel propiedad de Pemex.

3.2 Marco geológico

3.2.1 Geología regional

El sitio regionalmente se ubica en la parte central del Eje Neo volcánico tras mexicano, constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México (Moser, 1972). Los caracteres vulcanológicos apoyan la existencia de dos tipos de estructuras: grandes estrato volcanes, con orientación general N-S, que coinciden con la orientación de los pliegues que se observan en el sur de México y un gran numero pequeños volcanes, alineados en dirección NE-SW, sobre fracturas de tensión que son responsables de la formación de fosas tectónicas. Los volcanes crecen así en altura, por la acumulación de lava, se extienden lateralmente, con pendientes suaves por el depósito de material proveniente de las fases explosivas. Y las fosas tectónicas son rellenadas por depósitos flujos piroclásticos compuesto de lavas, tobas, brechas y cenizas volcánicas de edad terciaria y aluviones de edad cuaternaria.

En el aspecto local la geología está caracterizada por rocas calizas con estratificación en capas gruesas perteneciente a la Formación Orizaba de edad Cretácico inferior; estas calizas se encuentran en estratos gruesos que afloran cercanas a las poblaciones de Tepeaca y Tecamachalco con características apropiadas para la producción de cal hidratada y cemento. Esta unidad se encuentra soportando suelos de tipo aluvial que bajo la influencia de la escorrentía han llegado a la acumulación de sedimentos en zonas de menor pendiente. La zona de estudio está constituida por materiales poco consolidados de granulometría fina a gruesa característicos de una litología perteneciente a arcillas y arenas. Una de las características interesantes de la zona son los sistemas de conductos de litología arenosa y escasa continuidad lateral "paleo cauces" que se encontraron en el sitio contaminado, dentro de una excavación realizada por la empresa que lleva acabo la remediación del sitio, se presume que fue una red de

drenaje que bajo cambios en las condiciones ambientales permitieron el cubrimiento de esta estructura geológica.

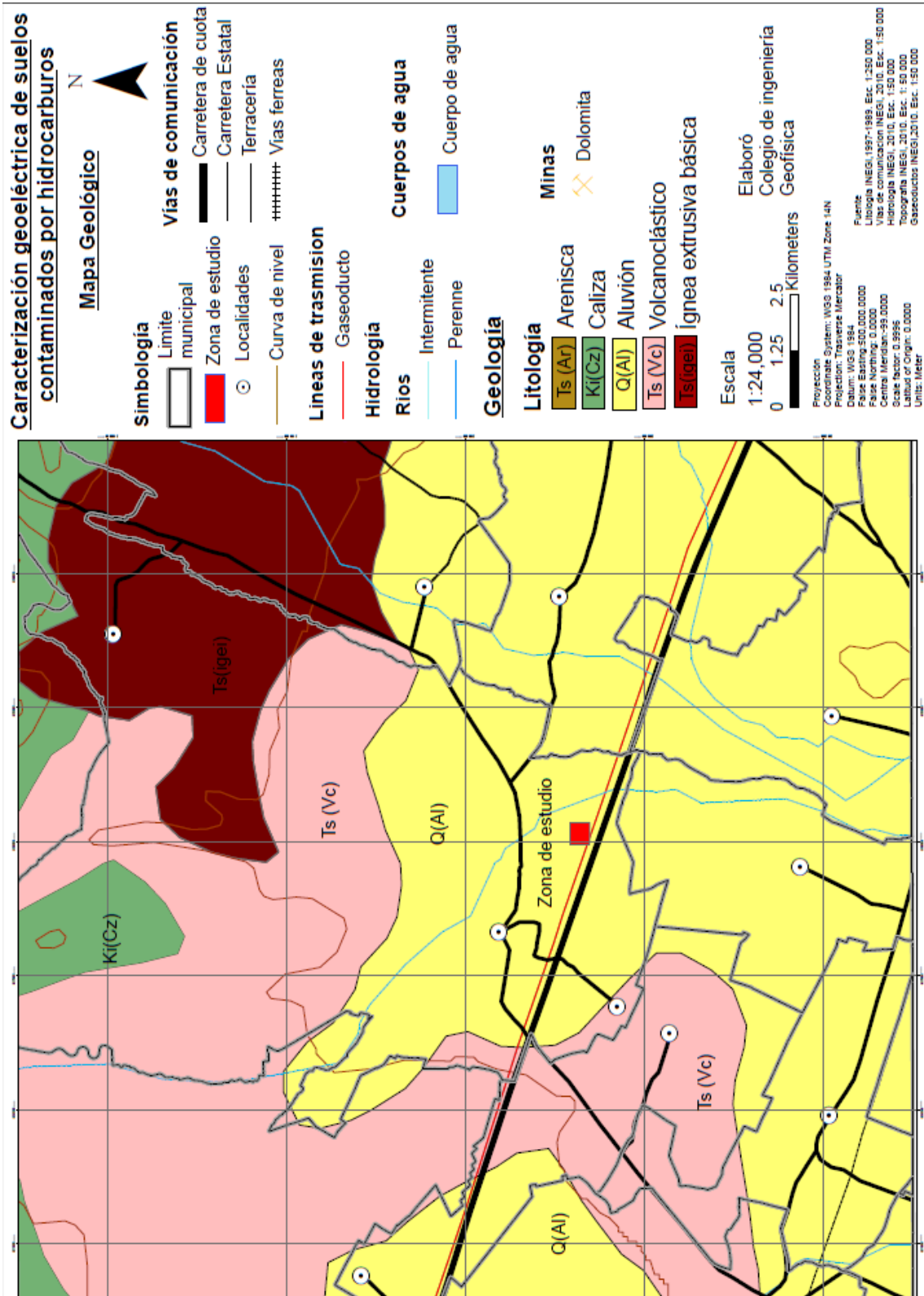


Figura 3.1 Mapa geológico regional escala 1:24000 generado en ARCGIS 10

3.3 Método geoelectrico aplicado a suelos contaminados

La medición de la resistividad es fundamental en la evaluación de formaciones contaminadas porque los hidrocarburos son excelente aislantes presentando valores muy altos de resistividad, en tanto que el medio no contaminado puede adoptar una amplia gama de valores dependiendo del tipo de litología. El contraste entre la resistividad de una zona contaminada por hidrocarburos y la roca circundante depende de la edad del derrame. Según Gonzales J. et al, (2011) la anomalía de baja resistividad en las zonas contaminadas aparece tres o cuatro meses después del derrame ("derrame maduro") pero en el caso de un derrame fresco o reciente la presencia de una anomalía de alta resistividad puede ser esperada. Por lo tanto, existe una gran diferencia entre la resistividad de las rocas rellenas con hidrocarburos recientemente y cuando pasan varios años. Las anomalías de baja resistividad en las zonas contaminadas por hidrocarburos han sido reportadas por algunos autores. Según Sauck et al., (1998) proponen la hipótesis que el hidrocarburo derramado en el medio físico cambia con el tiempo las propiedades eléctricas del mismo, el comportamiento cambia de eléctricamente resistivo a conductivo, debido a la descomposición de los compuestos orgánicos, estas reacciones de óxido reducción generan en el suelo la dispersión de electrones que al aplicar un campo eléctrico, permite la circulación de corriente eléctrica más fácilmente. Por lo tanto la respuesta eléctrica de baja resistividad va a depender de la madurez del derrame y esto va a influir en la selección y optimización de las tecnologías aplicadas para la caracterización y remediación de sitios contaminados por hidrocarburos, estas hipótesis han sido reforzadas por estudios geoquímicos en áreas contaminadas con hidrocarburos. Investigaciones dirigidas en la caracterización de plumas de contaminación llevadas a cabo por Acevedo (2012), propone una aplicación conjunta de métodos directos (muestreo y análisis químico de suelo) e indirectos tomografía eléctrica, para la caracterización de un sitio urbano contaminado. En donde logró identificar una capa geoelectrica de baja resistividad ($\rho < 10 \text{ Ohm-m}$), lo que, de acuerdo a la información litológica del sitio, no se debe a un aumento del contenido de arcilla, siendo la causa más probable es la existencia de contaminación madura, afectada por los procesos de biodegradación.

3.4 Ubicación de puntos de muestreo y sección de tomografía eléctrica.

Los datos aquí proporcionados son los resultados de un estudio realizado por una empresa contratada para llevar a cabo el muestreo de suelo y análisis químico. Los puntos analizados fueron 33 con profundidades de muestreo entre 0.15 y 3.15 m de profundidad. Analizando los resultados obtenidos para hidrocarburos fracción media (HFM), se observa que catorce muestras de suelo de un total de 33 (que representan 42%), registran valores por arriba de los valores máximos permisibles (1200 mg/kg). Los valores que exceden dicho límite, oscilan entre 2508 mg/kg y 21654.7 mg/kg.

El análisis en la distribución del muestreo directo, muestra que la zona sur tiene concentraciones por encima de los LMP entre 1200 y 21654.7 mg/kg. El punto de muestreo 33 es el más representativo a 3 m de profundidad con concentración de 21654 mg/kg. En cambio, la zona norte presenta concentraciones menores al LMP (1200 mg/kg) excepto por los puntos de muestreo 2 y 3 con concentraciones entre 1200 y 21654.7. Estos puntos de muestreo se encuentran dentro de la zona que ya fue remediada por lo que extendimos nuestro completo interés a la parte sur, donde se realizaron 6 tomografías eléctricas para determinar la distribución horizontal y vertical de la pluma contaminante.

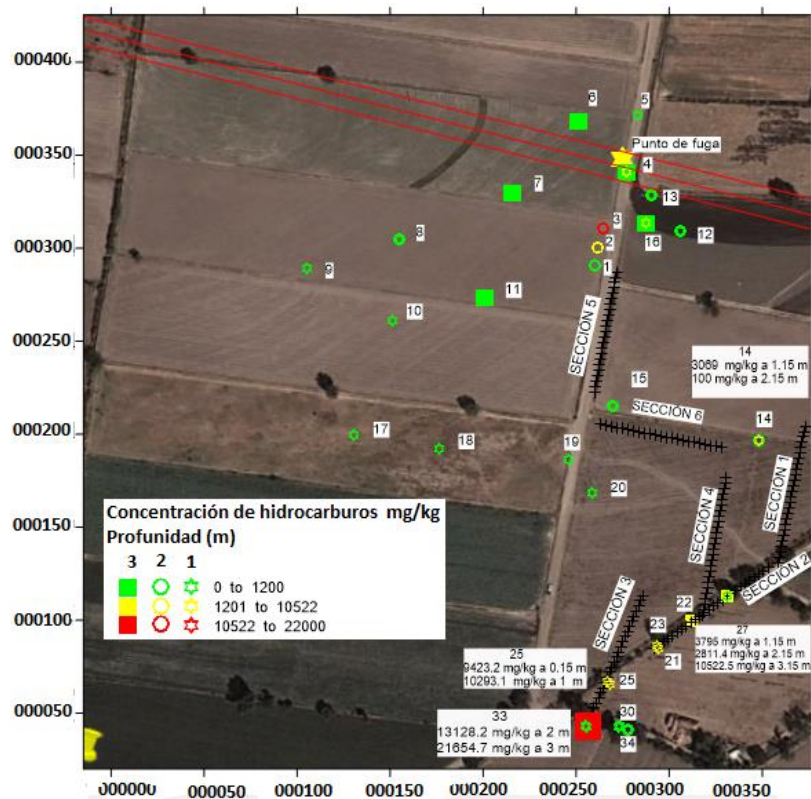


Figura 3.2 Ubicación de los 33 puntos de muestreo con concentraciones entre 50 a 21654 (mg/kg), máxima profundidad alcanzada 3.15 metros.

3.4.1 Instrumentación y procedimiento de medición

Para determinar las condiciones geológicas y la distribución de la pluma de contaminación, se realizaron 6 imágenes de resistividad cada una con una longitud de 72 metros. Las imágenes se realizaron con un arreglo Wenner-Schlumberger, con separación entre electrodos de 3 m y con un total de 7 ($n=7$) barridos horizontales. El equipo utilizado para las tomografías de resistividad eléctrica fue un resistivímetro SARIS marca Scientrex este equipo consiste de una consola electrónica multi-electrodo que permite introducir corriente eléctrica al subsuelo y medir la diferencia de potencial debido a la inyección de corriente.

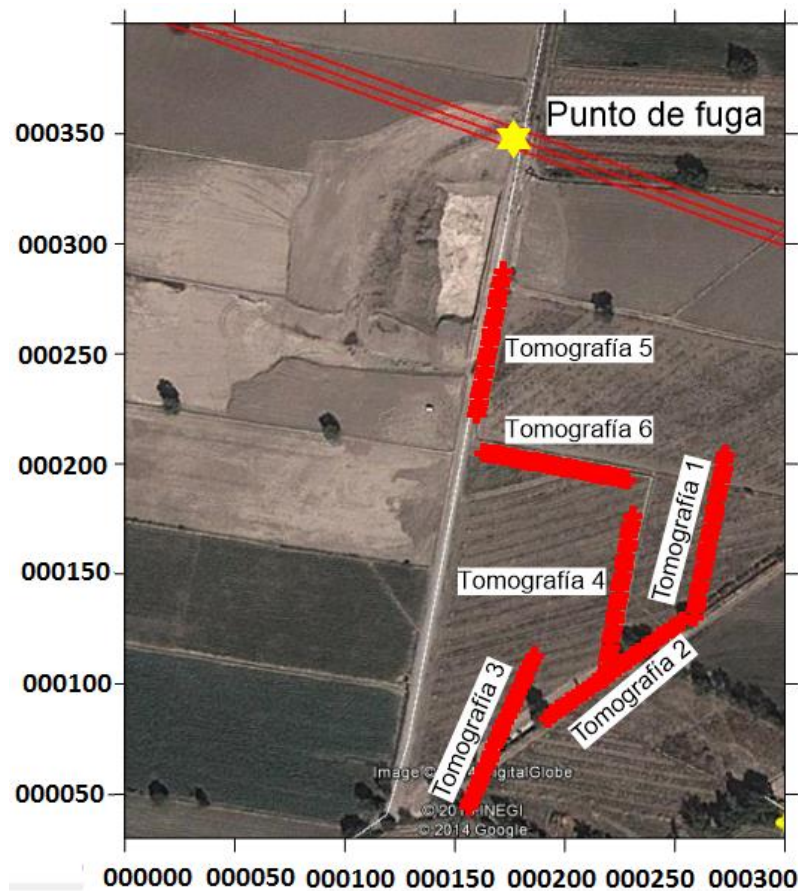


Figura 3.3 Zona de estudio las líneas de color rojo son las líneas de conducción de PEMEX.

3.4.2 Procesamiento e interpretación de datos geofísicos

Para la inversión de los datos se utilizó el software RES2DINV (desarrollado por Geotomo Software) este software se encuentra en el sistema de procesamiento de datos geofísicos SPRODAG, BUAP. Este software genera modelos de resistividad en dos dimensiones, obteniendo imágenes eléctricas. El modelo utilizado para la inversión en 2D consiste en un número de bloques rectangulares correspondientes a la distribución de los datos en la pseudosección. Una subrutina del modelado se utilizó para calcular la resistividad aparente y una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados para la rutina de inversión. El programa se respalda con dos técnicas de modelado: diferencias finitas y elemento finito.

3.5 Tomografías eléctricas

Los resultados obtenidos mediante la técnica de Tomografía Eléctrica nos muestra una imagen geoelectrica de alta resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades, las cuales fueron correlacionadas con los resultados del método directo. Se identificaron 3 unidades geo eléctricas las cuales se describen a continuación;

3.5.1 Tomografía 1

Se presenta la unidad U2 con resistividad de 31 a 45 ohm-m y de espesor entre 2 a 4 m de espesor en forma de manto resistivo, el cual se extiende a lo largo del perfil. Sin embargo, converge en ambos extremos de la sección. La U3 con resistividades mayores a 45 ohm-m se encuentra rodeando a la unidad U2, cuenta con espesores entre 1 y 3 m en la parte superior y en la parte inferior se encuentra soportando a la U2 con un subsecuente incremento en las resistividades a profundidad sin determinar el espesor del estrato resistivo.

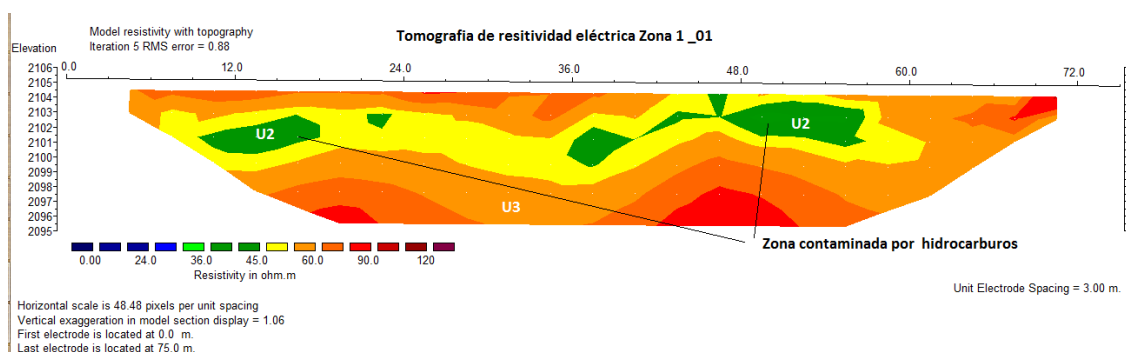


Figura 3.4 Imagen de resistividad 01

3.5.2 Tomografía 2

La unidad U2 con resistividad de 37 a 45 ohm-m y espesores entre 1 a 3 m se extiende hasta los 45 m de distancia. La unidad U2 alberga un núcleo de baja resistividad con resistividades de 24 a 30 ohm-m y espesores de 2 a 4 m. este núcleo se encuentra rodeado por la unidad U1b con un incremento de la resistividades de 31 a 36 ohm-m y espesores de 2 a 3 m. La unidad U3 con resistividades mayores a 45 ohm-m extiende por debajo de estas unidades y a partir de los 48 m de distancia se presentan núcleo resistivo. Se encuentra a 30 m de la tomografía el punto de muestro 27 con una concentración de hidrocarburos de 10522.5 mg/kg a 3.15 metros de profundidad

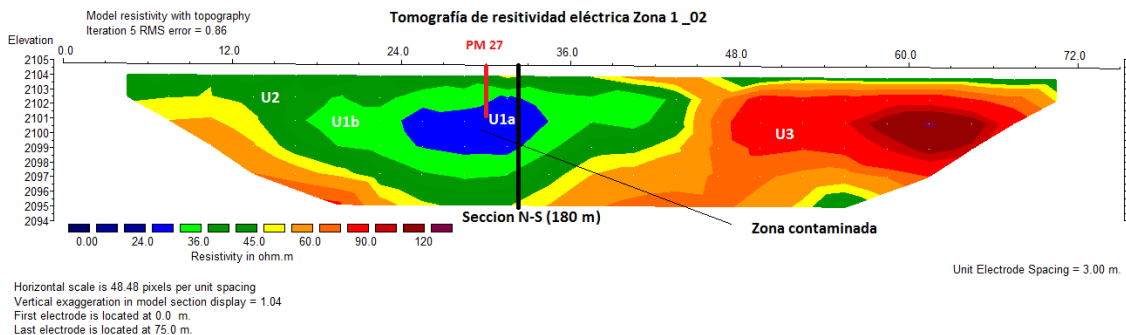


Figura 3.5 Imagen de resistividad 02

3.5.3 Tomografía 3

La Unidad U2 con resistividades de 37 a 45 ohm-m y espesores de 1 a 4 m se extiende hasta los 42 m de distancia. En esta parte la unidad U2 alberga un núcleo de baja resistividad con resistividades de 24 a 30 ohm-m y espesor de 1 a 3 m correspondiente a la unidad U1a y rodeado por un incremento en la resistividad de 31 a 37 ohm-m y espesores de 1 a 2 metros. A partir de los 50 m de distancia la unidad U2 se presenta de manera discontinua con espesores de 1 a 3 m. La unidad U3 con resistividades mayores a 45 ohm-m se encuentra soportando estas unidades. El punto de muestro 25 con concentración de 10293 mg/kg a una profundidad de 1 m se encuentra a una distancia de 28 m del inicio de la tomografía.

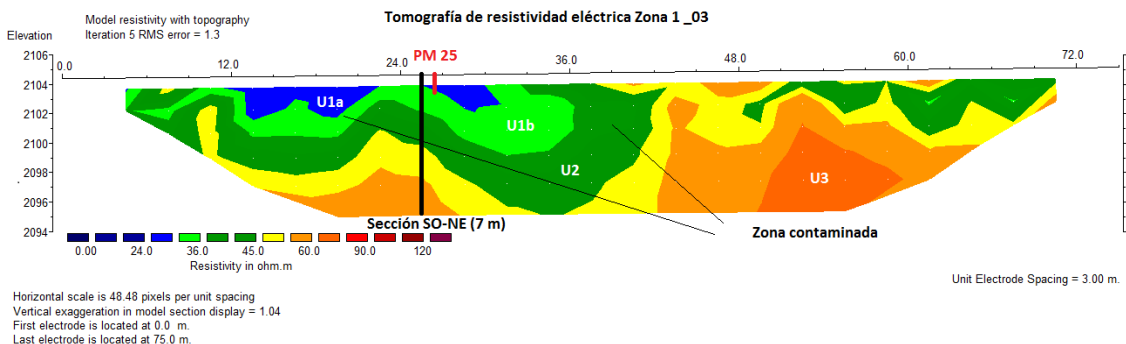


Figura 3.6 Imagen de resistividad 03

3.5.4 Tomografía 4

La unidad U2 con resistividad de 37 a 45 ohm-m y espesores de 1 a 2 m, se extiende hasta los 35 m de distancia. En esta parte la unidad U2 alberga una anomalía de baja resistividad con resistividad de 31 a 36 ohm-m y espesores de 1 a 3 m correspondiente a la unidad U1b. A partir de los 35 m de distancia se presentan un área de discontinuidades geo eléctricas asociadas a la unidad U2 con espesores de 2 a 4 m. La unidad U3 con resistividades mayores a 45 ohm-m se encuentra entre los 28 y 35 m, esta se extiende hacia la base de la tomografía con un incremento en la resistividad.

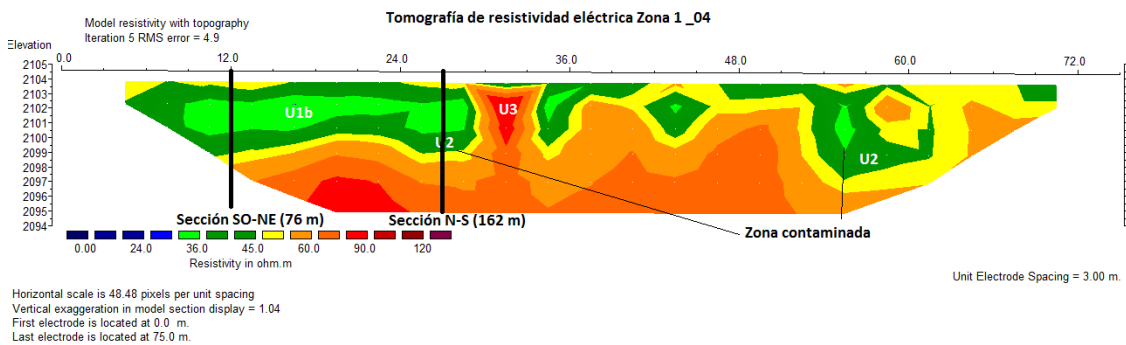


Figura 3.7 Imagen de resistividad 04

3.5.5 Tomografía 5

La unidad U2 con resistividades de 37 a 45 ohm-m y espesores de 1 a 3 m, se extiende sobre la parte más superficial, presentado los mayores espesores en los extremos de la tomografía albergando la unidad U1b con resistividad de 31 a 36 ohm-m y espesor de 1 a 2 m. La unidad U3 con rangos de resistividad mayores a 45 ohm-m se encuentra soportando la unidad U2.

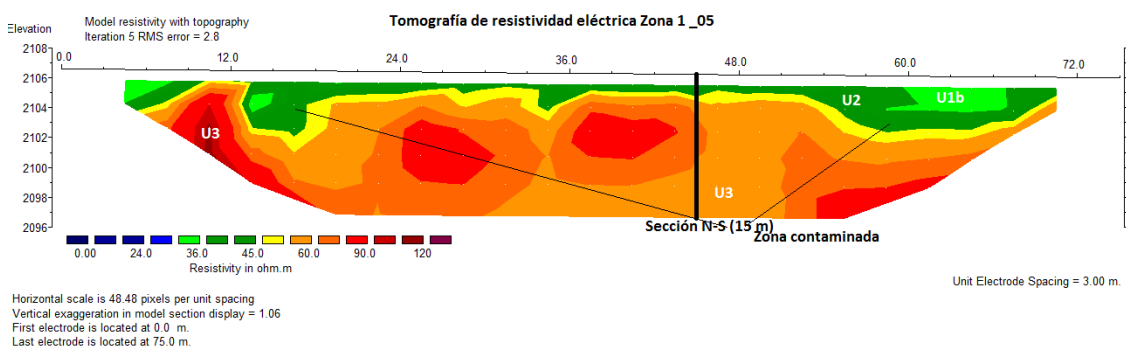


Figura 3.8 Imagen de resistividad 05

3.5.6 Tomografía 6

La unidad U2 con resistividades de 37 a 45 ohm-m se extiende hasta los 2 m de profundidad, albergando una anomalía de baja resistividad con resistividades de 31 a 36 ohm-m y de espesor menor a 1 metro en la parte central de la tomografía, correspondiente a la unidad U1b. La unidad U3 con resistividades mayores a 45 ohm-m se encuentra soportando a la unidad U2.

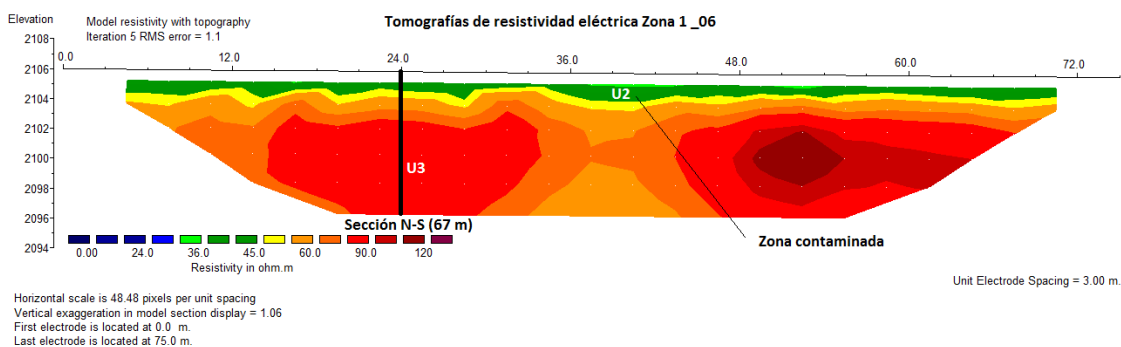


Figura 3.9 Imagen de resistividad 06

3.7 Correlación del método directo (muestreo) y el método indirecto

La integración de los resultados del método directo e indirecto se muestra en la Tabla 3.1 correlación de la respuesta eléctrica con las zonas del suelo que presentan mayor contaminación. Esta tabla muestra que a una profundidad de 1.15 m se tienen concentraciones entre 50 y 1200 mg/kg esta zona pertenece a la unidad geoelectrica U2 (37- 45 ohm-m). Entre los 1.15 a 2.15 m de profundidad se tienen concentraciones entre 1200 a 10522 mg/kg esta zona pertenece a la unidad geoelectrica U1b (31-36 ohm-m). La máxima profundidad alcanzada por el punto de muestro es de 3.15 m presentan concentración mayores a 10522 mg/kg esta zona pertenece a la unidad geoelectrica U1a (24 a 30 ohm-m). Sin embargo, la representación gráfica de la resistividad muestra un comportamiento similar por debajo de los 3.15 m, lo que nos indica que el punto de muestro no logro identificar adecuadamente la extensión de la pluma de contaminación a profundidad. Nosotros interpretamos que la pluma de contaminación se extiende de los 1.15 hasta los 9.5 m profundidad basados en la información eléctrica, la cual presenta lo valores mínimos de resistividad en la parte central del perfil eléctrico y las concentraciones en esta zona están por encima de los LMP. La unidad U1a se extiende de los 3.5 a hasta los 7.5 m de profundidad con espesor de 4 m dentro de esta zona y la unidad U1b se encuentra entre los 1.15 y 3.15 m en la parte superior y en la parte inferior entre los 7.5 y 9.5 m. Ambas unidades U1a y U1b están asociadas a suelos contaminados por hidrocarburos, superando el límite máximo permisible para uso

agrícola 1200 mg/kg. La unidad geoelectrónica U2 se encuentra en la zona superior considera como zona de embarramiento hasta los 1.15 m de profundidad. En la parte inferior partir de los 9.5 m se considera el frente de contaminación. Por lo que concluimos que en esta zona la pluma de contaminación se encuentra migrando. La unidad U2 tiene concentraciones por debajo de los LMP, aunque no está considerado como suelo contaminado su permanencia en el suelo puede generar impactos negativos al ambiente y a la salud.

Representación gráfica de la variación de la resistividad contra la concentración de hidrocarburos

Escala 1 U = 1 m	Unidad geoelectrónica		Resistividad (Ohms.m)		Profundidad de muestro (m)	Concentración Punto Muestreo 27 (mg/kg)	Movimiento de la pluma de contaminación
			10	50			
1	U2		37 - 45	38.00	0.15	50-1200	Zona de embarramiento
2	U1	b	31 - 36	33.45	1.15	1200-10522	Pluma de contaminación
3					2.15		
4	U1	a	24 - 30	26.47	3.15	>10522	
5				27.09			
6							
7	U1	b	31 - 36	34.61			
8							
9	U2		37 - 45	43.17			Frente de contaminación
10							

Limite maximo permisible para uso agrícola 1200mg/kg según la norma NOM-138-SEMARNAT//SS-2003

Contacto Inferido con geofísica

Tabla 3.1 correlación de la respuesta eléctrica con las zonas del suelo que presentan mayor contaminación.

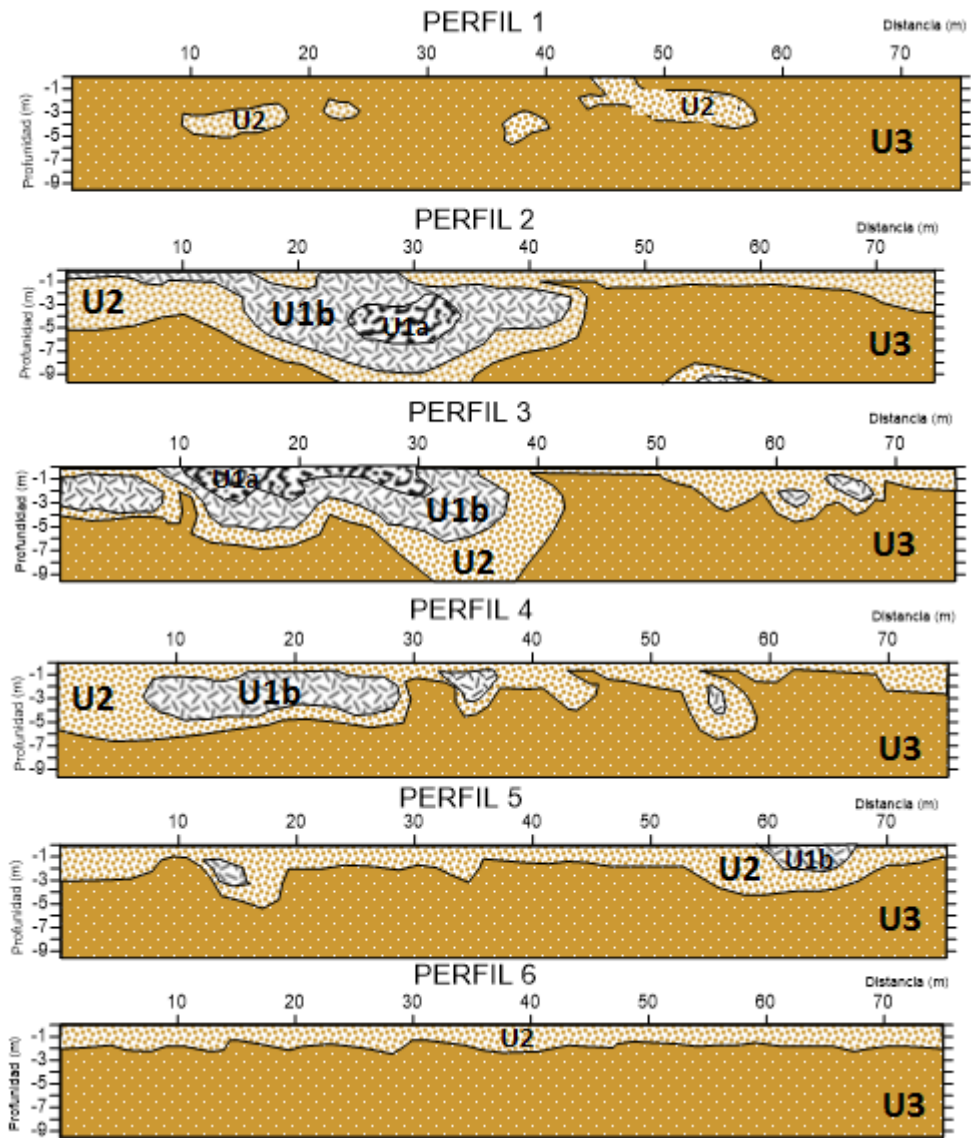
Integración Geofísica- Geológica

La distribución de las unidades eléctricas en el sitio contaminado muestran que existen núcleos de bajas resistividad unidad U1a (24-30 ohm-m) al sur de la zona con espesores de 1 a 3 m y con concentraciones mayores a 10522 mg/kg. La unidad U1b (30-36ohm-m) con concentraciones (1200 a 10522 mg/kg) se extiende ampliamente en todo la zona presentándose en forma de discontinuidades y solo en la zona sur se encuentra rodeando a la unidad U1a. La unidad U2 (37-45 ohm) en la zona este se encuentra en forma de capa conductiva con espesores de 1 a 3 m. estas bajas resistividades están asociadas a la descomposición de los compuestos orgánicos permitiendo que el flujo de corriente eléctrica se propague a través de los electrones dispersos dentro del suelo. La unidad U2 se extiende desde la zona norte con espesores de 1 a 3 m hasta la zona sur con espesores de 4 a 6 m. La unidad U3 de resistividades mayores 45 ohm-m se encuentra soportando a estas unidades y se extiende hacia la base de los perfiles eléctricos, esto se puede tribuir a un núcleo más compacto, y por sus características físicas impida el paso del contaminante a zonas más profundas. Los resultados del método directo y del método indirecto se muestran en la integración Geofísica-Geológico ambiental. Tabla 4.2 la cual muestra la descripción litológica de las unidades U1a y U1b las cuales están asociadas a suelos arcillo-arenosos con concentraciones por encima del LMP (1200mg/kg). La unidad U2 (37-45 ohm-m) asociado a un estrato arcillo-arenoso y U3 (>45 ohm-m) se encuentra asociado a un estrato arcilloso libre de contaminación se encuentran por debajo del LMP. Sin embargo, su permanencia en el suelo puede producir efectos adversos al ambiente y a la salud.

Integración Geofísica-Geológico ambiental

Unidades geoelectricas	Resistividad (Ohm.m)	Concentraciones de hidrocarburos (mg/kg)	Descripción litológica	Zonas contaminadas	
U1	a	24 - 30	>10522	Suelos arcillo-arenosos con concentraciones por encima de los LMP para uso de suelo agricola (1200mg/kg) según NOM-138-SEMARNAT//SS-2003	Pluma de contaminación
	b	31 - 36	1200 -10522		
U2	37 - 45	50 -1200	Suelos arcillo-arenosos con concentraciones por debajo de los LMP para uso de suelo agricola (1200mg/kg) según NOM-138-SEMARNAT//SS-2003	Zona de embarramiento en la parte superior y frente de contaminación en la parte inferior	
U3	> 45	ND	Suelos arcillosos libres de de contaminación.	Suelo no alcanzado por la pluma de contaminación	

Tabla 3.2 Integración Geofísica-Geológico ambiental

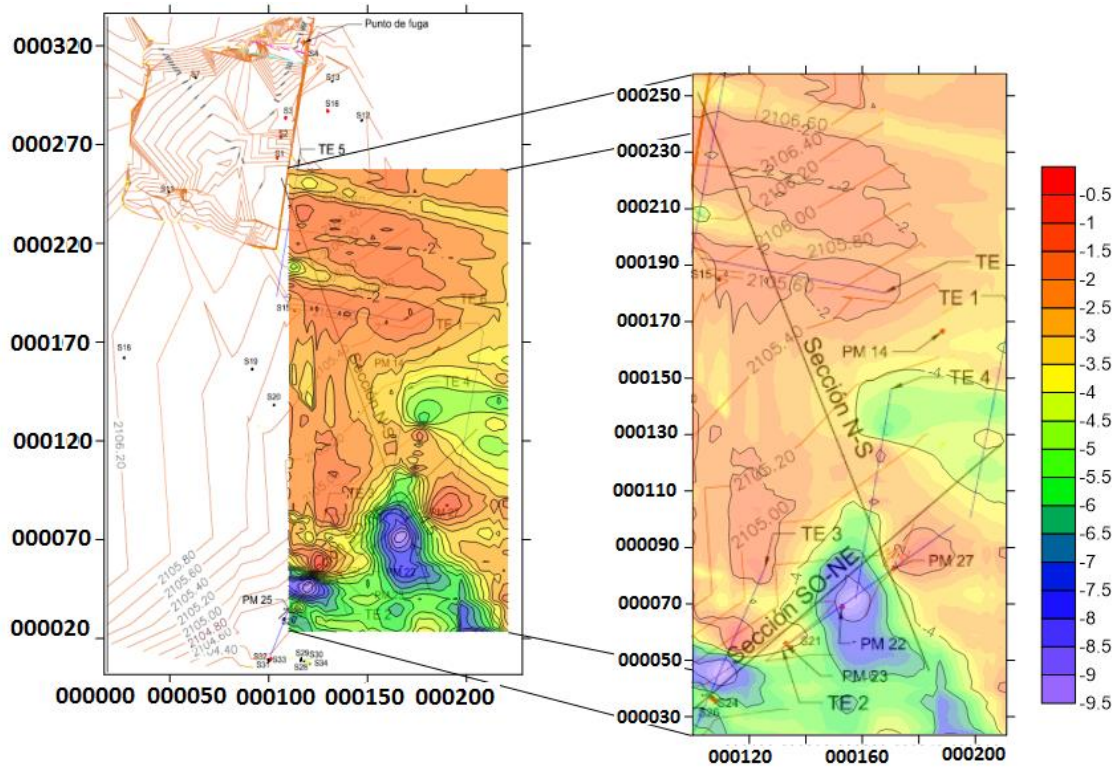


Unidades	Resistividad (ohm-m)	Concentración de hidrocarburos (mg/kg)	Asociación Litológica
U1a	24-30	>10522	Suelo arcillo arenoso por encima de los LMP
U1b	31-36	1200-10522	Suelo arcillo arenoso por encima de los LMP
U2	37-45	50-1200	Suelo arcillo arenoso por debajo de los LMP
U3	>45	N/D	Suelo arcilloso libre de hidrocarburos

Figura. 3.10 perfiles litográficos integrados del sitio contaminado.

3.8 Estratigrafía de la zona de estudio.

Se construyeron 2 secciones litológicas para definir la estratigrafía de la zona; La primera tiene longitud de 220 metros con una dirección N-S y una diferencia de altura de 2 metros, entre las elevaciones de 2106.40 y 2104.50 m.s.n.m., la segunda tiene una longitud de 140 metros con dirección SO-NE y elevaciones de 2104.80 y 2104.00 m.s.n.m., estas secciones son perpendiculares entre si y se construyeron a partir de la integración de las imágenes de resistividad y los puntos de muestreo.



Figuras 3.11 Mapa topográfico y de profundidades del basamento resistivo libre de hidrocarburos.

3.8.1 Sección Norte-Sur

El punto de muestreo 14 tiene una concentración entre (1200-10522 mg/kg) a 0.15 m de profundidad asociado a un estrato arcillo-arenoso de resistividades (31 a 36 ohm-m). A una profundidad de 1 m se tienen concentraciones entre (50-1200 mg/kg) y pertenece a un estrato arcilloso de resistividades mayores a 45 ohm-m. Esto nos indica que en la zona norte la pluma de contaminación no se extendió más allá del metro de profundidad. Sin embargo, los espesores aumentan hacia la zona sur contando con espesores de 6 a 8 m. Se identifica una zona anómala a los 180 m de distancia a 3.15 m de profundidad contando con un espesor de 2 m y concentraciones de 10522 mg/kg (PM27). Por lo que concluimos que en la zona sur las características del suelo permitieron la acumulación de la pluma contaminante reportando concentraciones por encima de los LMP. En contraste, la zona norte está constituida por un estrato de matriz más arcillosa, que por sus características litológicas impide que la pluma contaminante se extienda a zonas más profundas.

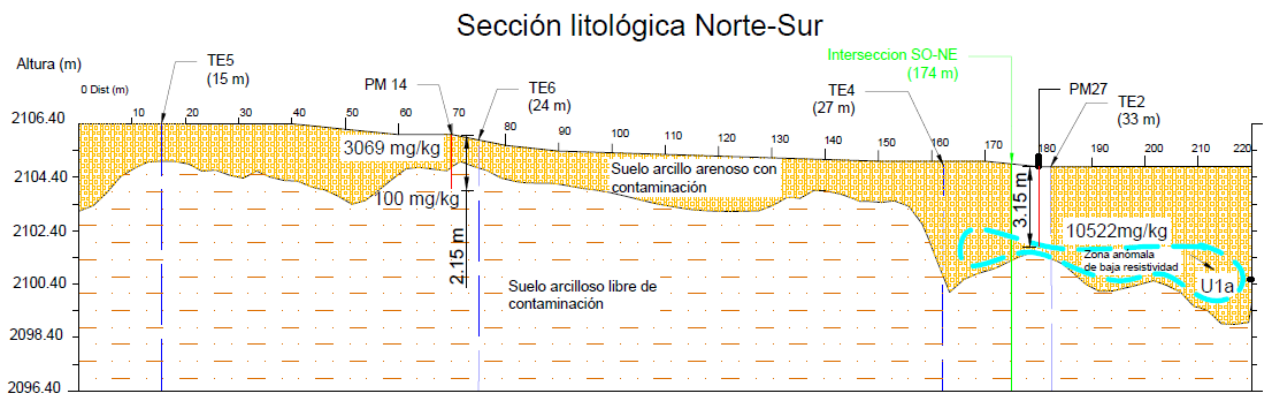


Figura 3.12 Sección litológica Norte-Sur

3.8.2 Sección Suroeste-Noroeste

Con base a los resultados geo eléctricos, la parte suroeste está constituida por estrato arcillo arenoso con resistividades (24 a 36 ohm-m) y espesores que van de 8 m al inicio de la sección y va disminuyendo a 4 m hacia el extremo noroeste. Los puntos de muestreo próximos a la zona se lograron correlacionar dentro de la sección; Los puntos de muestreo PM22 y PM23 tienen concentraciones entre (1200-10522 mg/kg) a 3.15 m y 0.15 m de profundidad respectivamente, están asociados a un estrato arcillo arenoso de resistividades (31 a 36 ohm-m). Este estrato arcillo arenoso lo segmentan dos zonas anómalas de baja resistividad (24 a 30 ohm-m); La primera anomalía se encuentran al inicio de la sección a 1 m de profundidad contando con un espesor de 3 m y concentraciones de 10793 mg/kg (PM25), la segunda se encuentra en la parte central entre los 80 y 85 m de distancia a 3.15 m de profundidad cuenta con un espesor de 2 m y concentraciones de 10522 mg/kg (PM 27). Estas bajas resistividades se asocian a las degradación de los compuestos orgánico, creando un ambiente conductivo. El estrato que soporta todo la capa arcillo arenoso contaminada por hidrocarburos, corresponde a la unidad U3 asociado a suelos arcillosos libres de hidrocarburos con resistividades mayores a 45 ohm, La resistividad aumenta hacia la base de la sección, indica que se encuentra un estrato más compacto, que impide el paso del contaminante a zonas más profundas.

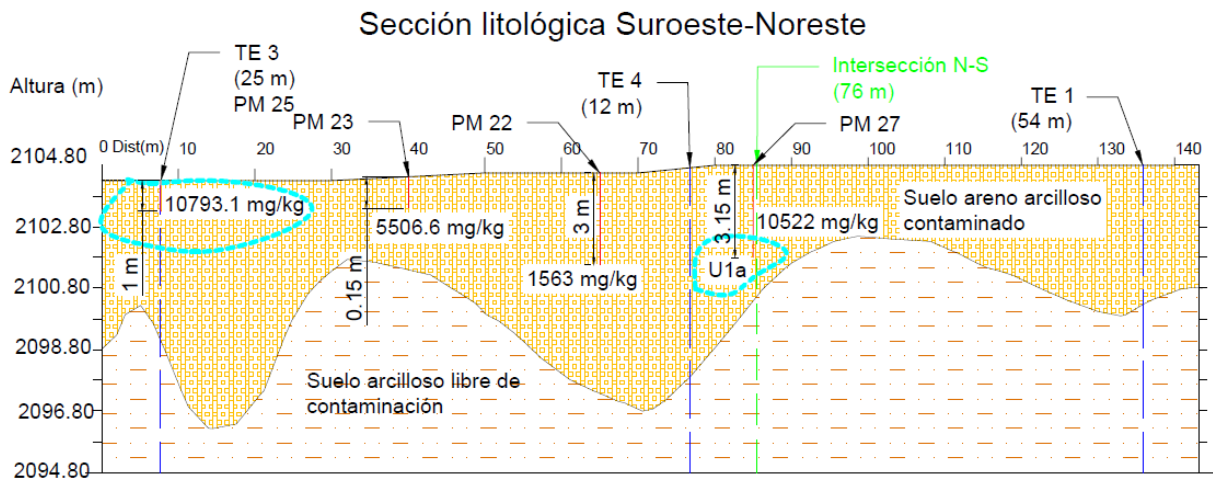


Figura 3.13 sección litológica Suroeste-Noreste

3.9 Extensión de la zona contaminada

La distribución la pluma de contaminación en la zona, está influenciado por la diferencia de elevaciones y las características litológicas de la zona, el relieve del sitio contaminado es poco pronunciado pero suficiente para que el movimiento de la pluma de contaminación se vea favorecido para moverse de la zona norte cercano al punto de fuga con una elevación de 2106. 60 msnm hacía las partes más bajas del sitio con elevaciones de 2104 msnm. La zona norte está constituida por un estrato de matriz arcillosa que impide que la pluma de contaminación se extendiera más haya de 3 m de profundidad. Sin embargo, en la parte sur del sitio, este estrato se encuentra a una profundidad de 8 m, soportando a una unidad de suelo arcillo arenoso que por sus características litológicas permitió que la pluma de contaminación se acumulara en la zona sur contando con espesores entre 4 y 8 m.



Figura 3.14 Mapa de distribución de la contaminación a través del suelo.

Con el programa Surfer versión 10 desarrollado por Golden software, se elaboró un modelo de distribución de las resistividades en el suelo, con el cual se determinó el movimiento de la pluma de contaminación. La introducción de la información al software, requiere de sus coordenadas geográficas así como un valor para su interpolación, la interpolación se realiza según el método de interpolación Kriging, como puede observarse la unidad U2 se extiende en toda la superficie hasta los 3.82 m *Zona de embarramiento*. Sin embargo, en la zona sur se extiende hasta los 9.56 m de profundidad *Frente de contaminación*. La unidad U2 tiene contenida a la unidad U1b (31-36 ohm-m) y se extiende de los 0.75 m a los 7.46 m de profundidad *Pluma de contaminación*. Dentro de la pluma de contaminación se encuentra un núcleo de baja resistividad perteneciente a la Unidad U1a (24-30 ohm-m) que se extiende de los 1.15 m a los 5.56 m de profundidad. La U3 (>45 ohm-m) se encuentra soportando estas unidades y s considerado como suelo no alcanzado por la pluma de contaminación.

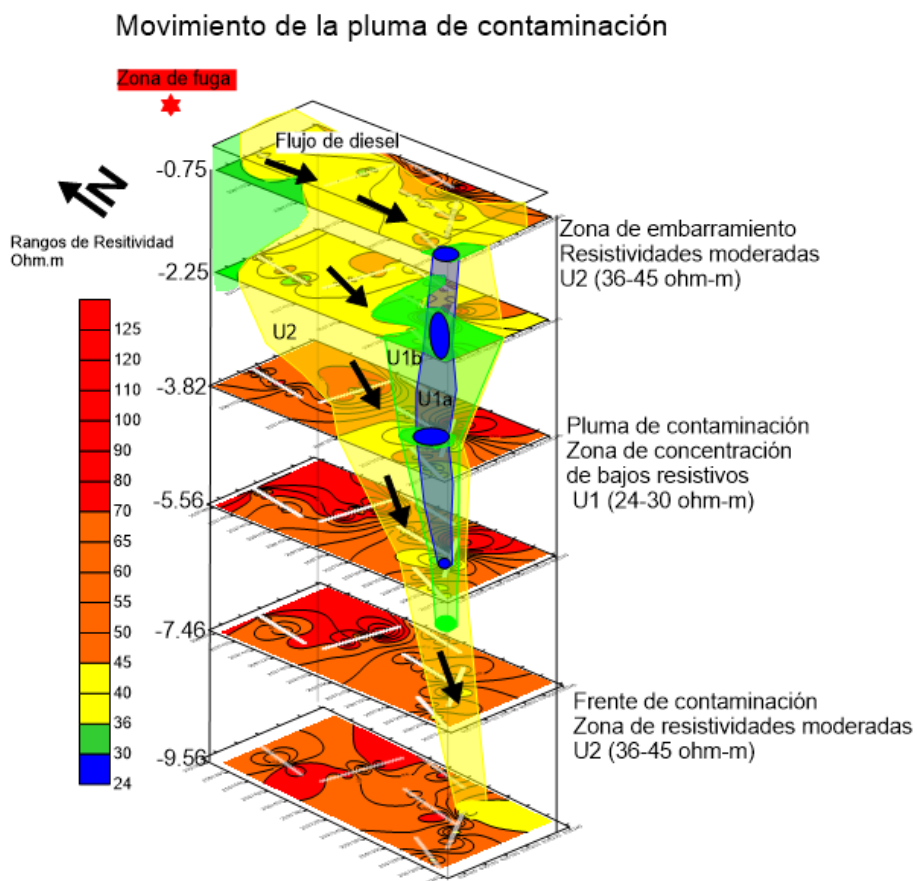
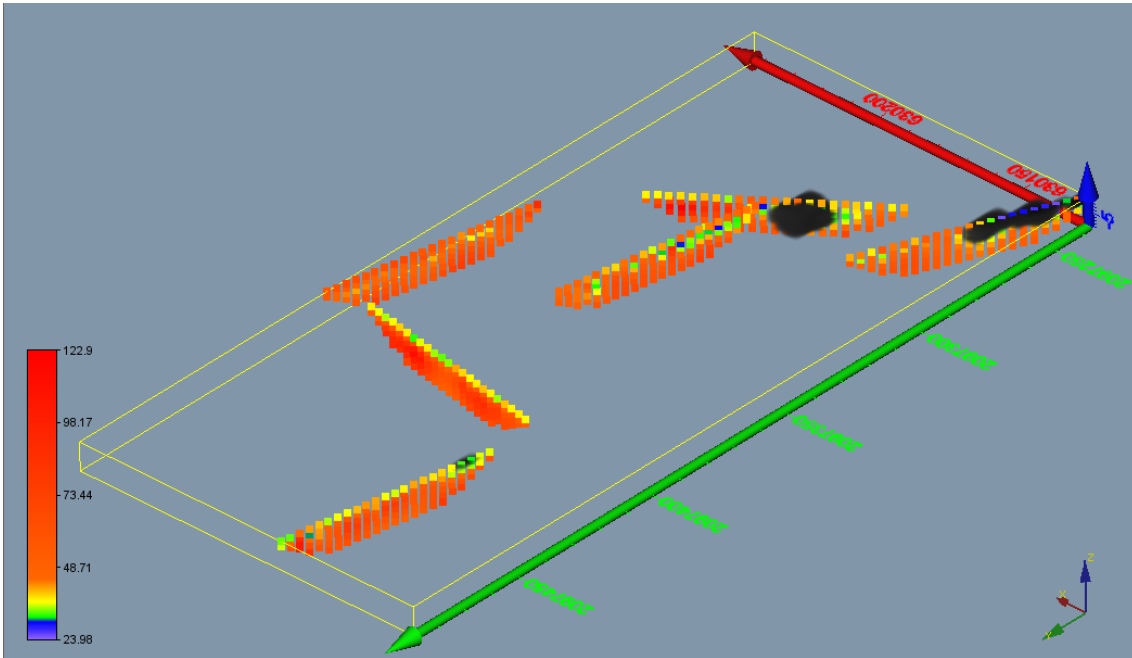


Figura 3.15 mapas de distribución de resistividades

3.10 Remediación

Posterior a la evaluación de un sitio contaminado, se deben proponer técnicas de remediación adecuadas para lograr disminuir las concentraciones de hidrocarburos hasta que cumplan con lo establecido. De acuerdo a la Ley General de Equilibrio, Ecológico y la Protección al Ambiente, la remediación se define como el “Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones propician la evolución y continuidad de los procesos naturales”. El tratar de recuperar la calidad original de un suelo, puede significar un excesivo costo y la aplicación de tecnologías y recursos humanos altamente calificados. Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante. Por lo que se recomienda la extracción de los contaminantes del suelo debido a que la pluma de contaminación se encuentra sobre un estrato arcillo arenosos que por sus características litológicas propician a que la pluma pueda moverse a través del subsuelo hacia alcanzar el nivel freático, de manera que es necesario implementar un programa que disminuya las concentraciones de contaminación evitando que siga la dispersión del contaminante en el ambiente.

Con el programa VOXLER versión 3.0 desarrollado por Golden software, se elaboró un modelo de interpolación 3D con el cual se estimó el volumen de suelo contaminado. La introducción de la información al software, requiere de sus coordenadas geográficas así como de su límite superior e inferior en cota, y un valor para su interpolación. La interpolación tridimensional se realiza según el método de la inversa de la distancia, esto permite generar un modelo geométrico tridimensional. Como puede observarse a continuación, el modelo tridimensional constituye un avance para comprender la distribución de la pluma de contaminación. La Figura 3.16 muestra la existencia de núcleos de baja resistividad asociado a las unidades U1a y U1b con resistividades entre 24 y 36 ohm-m y espesores entre 5 y 7 m que corresponden a suelos arcillo-arenosos con concentraciones por encima de LMP 1200 mg/kg. Se llevó a cabo un análisis geométrico, con lo cual en base a esta información se estimó un volumen de $513m^3$ de suelo que se tendría que extraer como medida de recuperación del sitio contaminado.



La Figura 3.16 Muestra los puntos de atribución que integran los 6 perfiles eléctricos. Puntos de color azul bajos se atribuye a bajos valores de resistividad asociados a material contaminado y de color rojo altos valores de resistividad suelo no contaminado.

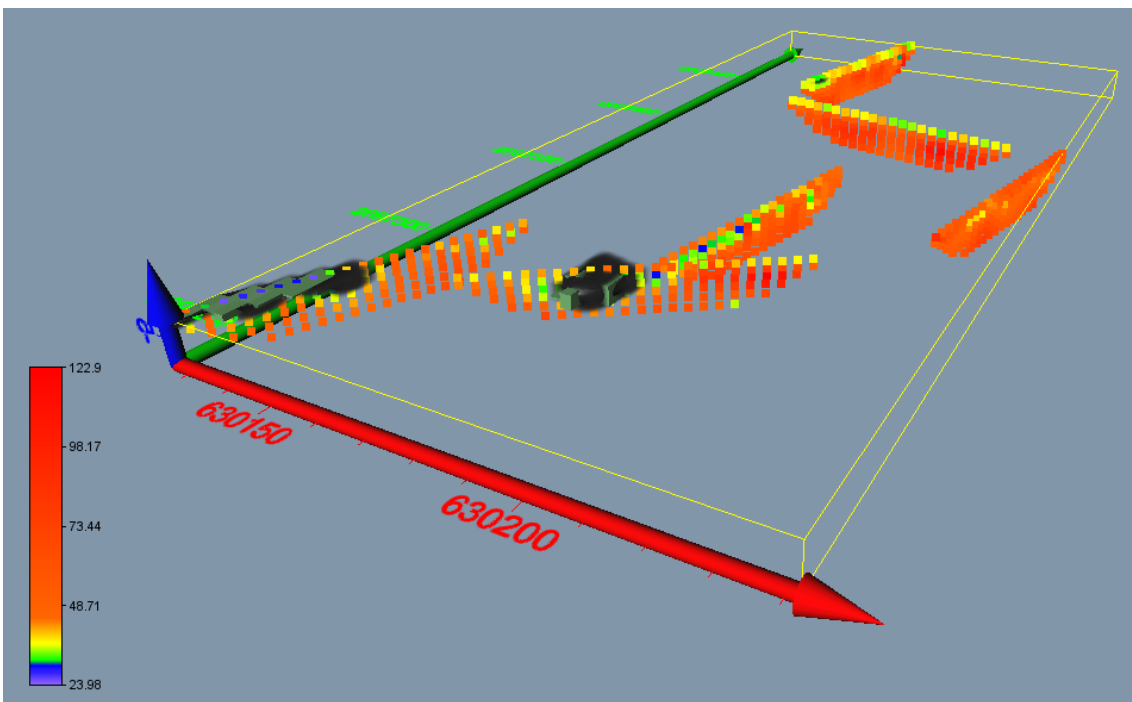


Figura 3.17 se calculó un volumen de 531 m^3 para una rango de resistividad entre 24 - 36 ohm-m

3.11 Conclusión de los trabajo de remediación

Una vez que se lleva a cabo la remediación del sitio conforme al programa aprobado y con la tecnología autorizada por SEMARNAT, se debe seguir un plan de muestreo comprobatorio, con el objetivo de demostrar que las acciones de remediación implementadas en un suelo contaminado, han alcanzado de forma estadísticamente demostrable, concentraciones menores o iguales a los valores establecidos en el Norma NOM 138-SEMARNAT//SS-2003. Por lo tanto el programa de remediación del sitio concluye una vez que los análisis del suelo, indican que las concentraciones de los contaminantes no rebasan los límites establecidos en la NOM 138-SEMARNAT//SS-2003, Los resultados serán incorporados en el Informe de culminación de acciones de remediación que será presentado a la entidad de fiscalización ambiental correspondiente.

Capítulo IV

Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- ▶ Los puntos de muestreo determinaron las concentraciones de hidrocarburos en el suelo mas no definieron correctamente la distribución del contaminante.
- ▶ La tomografía eléctrica nos permitió conocer la distribución y migración de la pluma contaminante en el subsuelo.
- ▶ la pluma de contaminación propuesta siguió una dirección sur y se extendió hasta una distancia de 180 m del punto de fuga.
- ▶ La pluma de contaminación se encuentra emplazada en un estrato arcillo arenoso entre los 2 y 8 m de profundidad.
- ▶ El frente de contaminación se encuentra entre los 9 y 10 m de profundidad, por lo que considera que la pluma de contaminación aún se encuentra migrando.
- ▶ La estimación de volumen de suelo contaminado fue de $531 m^3$.

4.2 Recomendaciones

- ▶ En los trabajos de caracterización y remediación de sitios contaminados, la norma debe de establecer el uso de métodos indirectos.
- ▶ Se recomienda que en la caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos sea necesaria la implementación de métodos exploratorios como la Tomografía eléctrica para la delimitar la pluma de contaminación y determinar la distribución de los puntos de muestreo y profundidad de los mismos.
- ▶ Se recomienda extender el área de investigación, debido a las altas concentraciones que presentan la zona y la amplia distribución del contaminante, pues la permanencia del contaminante como pasivo ambiental puede causar daños adversos al ambiente y al uso de suelo.

Bibliografía

Acevedo, B. D. 2012. Uso de métodos directo e indirecto en la caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos. Tesis licenciatura, Universidad nacional autónoma de México, México.

Atekwana E.; Sauck W.; Werkema D. 2000. Investigation of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 44:167-180.

Atlas R. M. 1984 *Petroleum Microbiology*. Macmillan. Back W. and Baedecker M. J. 1989 *Chemical hidrology in natural and contaminated environments*. *J. Hydrol.* 106, pag 1-28.

Barker, R. y Moore, J. 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge*, 17: 1454-1458.

Borden, R.C.; Daniels, R.A.; LeBrun, L.E., Davis, C.W. 1997. Intrinsic biodegradation of MTBE and BTEX in a gasoline-contaminated aquifer. *Water Resources Research*, 33: 1105-1115.

Chapel Paul A., 1992. *HANDBOOK OF EXPLORATION GEOPHYSICS*

Chaudhry, g. R., 1994. *Biological Degradation and bioremediation of Toxic chemicals*. Dioscorides Press, Portland.

De la Vega M.; Osella A.; Lascano E. 2003. Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics.*, 54: 97- 109.

Diario oficial de la federación (DOF), 2005. Norma oficial Mexicana NOM-138-emarnat-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

Dorn, B. P., Vipond, E.T., Salantrino, P.J., y Wisniewski, L.H. 1998. Assessment of the acute toxicity of crude oils in soils using earthworms, microtox, and plants. *Chemosphere* 37:845-860

Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions. 296 pp.

French McCay, D., Jennings Rowe, J., Whittier, N., 2004. "Estimation of potential impact and natural resource damages of oil". *Journal of Hazardous Materials*. 107, 11-25.

Genua, S. 2003. *Métodos geoelectricos*. Especialización en Geología Minera, Prospección Geofísica Terrestre.

Gonzales J. et al, (2011). Detección de contaminación por hidrocarburos empleando sondeos eléctricos verticales (SEV) en la región de Tuxpan, Estado de Veracruz.

Hernández Márquez Juan O., Rodríguez Villuendas Arturo. 2008. Aplicación de métodos geoelectricos para el diagnóstico de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos. México D.F.

Hernández, L. 2009. Estudio de la contaminación con petróleo de los suelos agrícolas de la cuenca baja del rio Tonalá mediante espectroscopia del infrarrojo cercano. Tesis Maestría. Colegio de postgraduados. Tabasco.

International Council and Clean Transportation (ICCP). 2011. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre.

Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Instituto nacional de ecología. México, D.F..

Kesley, J., Kottler, B., y Alexander M. 1997. Selective chemical extrants to predict bioavailability of soli-aged organic chemicals. *Environ. Sci. Technol.*31:214-217.

Loya, Daniela Itzel. 2003 Tecnologías para la restauración de suelos Contaminados por hidrocarburos. Tesis licenciatura, Universidad Veracruzana, México.

Lesser, J.M. y S. Saval, 2000. Interperismo: efectos de hidrocarburos en suelos y acuíferos. *Teorema Revista Técnico-ambiental*, año, No.2, 34-35.

Lesser, J.M. y S. Saval, 2001. Contaminación de acuíferos División de educación continua, Facultad de ingeniería, UNAM, 2001.

Lovley D.R. 1991. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction. *Microbial Rev.* 55:259-287

Lovely, D. R. 2003. Cleaning up with genomics: applying molecular biology to bioremediation. *Nature Review: Microbiology*, 1: 35–44.

Loke. M. H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Martel, R. y Ayotte, P. 1989. Etat de la situation sur la contamination de la nappe souterraine dans la region de Ville Mercier: Ministere de l'Environment du Quebec.

Marrot, A., Barrios-Martínez, P., Moulin, N. Roche. 2006. Biodegradation of high phenol concentration by activated sludge in an immersed membrane bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 30: 174-183.

Maroto, A y Rogel J. 2002. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. GEOCISA. División de protección ambiental de suelos. En: <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib15/028.pdf>.

Mattney, G. C., 1994 Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis publishers. 360 p.

Medina, S. A. 1999. Lavado y composteo ex-situ de un suelo intemperizado con hidrocarburos. Tesis maestría, Universidad Autónoma Metropolitana de Izztapalapa. México DF. Mulligan, C. y Yong, R. 2004. Natural attenuation of contaminated soil- review article. *Environmental International* 30: 587-601.

Mooser, Federico, 1961, Los volcanes de Colima: Universidad Nacional Autonoma de México, Instituto de Geología, Vol 61, p. 49-71.

Mulligan, C. y Yong, R. 2004. Natural attenuation of contaminated soil- review article. *Environmental International* 30: 587-601.

Orellana, Ernesto. 1982. Prospección eléctrica en corriente continua (2 da edición). Madrid.

Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., Alfayate, J., 2003. Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química. Thomson Editores Spain, Paraninfo, S.A. España.

Petroleos Mexicanos (Pemex). Cuarto informe trimestral 2013 Artículo 71 (párrafo primero) Ley de Petróleos Mexicanos. Febrero, 2014.

PROFEPA, 2000. Disposición y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados. Memoria GDT (1998-2000) sobre restauración de suelos contaminados. México, D.F. 147P.

Ridgeway, H. F., safarik, J., Phipps, D., Carl, P., D., 1990. Identification and catabolic activity of well-derived gasoline degrading bacteria from a contaminated aquifer. *Applied Environmental Microbiology* 56 (1), 3565-3575.

Riser-Roberts E., 1992. Bioremediation of petroleum contaminated sites. C.K. Smoley. CRC Press. 461 p.

Rosales R. M. 2013. Detección y evaluación de la contaminación del suelo por tanques enterrados de almacenamiento de hidrocarburos en estaciones de servicio. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica Cartagena.

Sauck, W.; Atekwana, E.; Nash, M. 1998. Elevated conductivities associated with LNAPL plumes as imaged by geophysical methods. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2(3), 203–212.

Sauck, W. 2000: A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandysediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 151–165.

Servicio Geológico Mexicano, 2010, disponible en <<http://www.sgm.gob.mx>>, consultado en 2010.

Shevnin Vladimir, Delgado R. Omar, Fernández L. Luis, Zegarra M. Héctor, Mousatov Aleksandr y Ryjov Albert (2005). Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, México. *Geofísica Intenacional*. Vol. 44, Num. 3.

Sutherland, JB. 1992. Detoxification of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungi. *Journal of Industrial Microbiology*, 9: 53-62.

Suthersan S.S. 1999. In situ bioremediation. *Remediation engineering: desing concepts*. Ed. Suthan S. Suthersan. Boca Raton: CRC: Press LLC.

Van Deuren, J.; Wang, Z. y Ledbetter, J. 1997. *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*. 3ª Ed. *Technology Innovation Office, EPA*.
<http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.

Tabbagh, A., Panissod, C., Benech, C., Dabas, M., Jolivet, A., Guérin, R. 2002. Un outil de reconnaissance géophysique en milie urbain: la prospection électrostatique. *Revue Française de Géotechnique*, 101: 3-10.

Tempest, DW. 1978. The biochemical significance of microbial growth yields: an assessment. *Trends in Biochemical Sciences*, 3: 180-184.