

**C O N T E N I D O**

<b>Índice de Tablas y Figuras.</b>	<i>i</i>
<b>Resumen.</b>	<i>viii</i>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>Objetivos generales.</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO. I. Propiedades Eléctricas de las Rocas.</b>	<b>5</b>
<b>I.1. Introducción.</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Resistividad Eléctrica.</b>	<b>6</b>
<b>I.3. Factores que intervienen en la resistividad.</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1. Resistividad de los minerales que conforman la roca .</b>	<b>7</b>
<b>I.3.2. Porosidad de la roca.</b>	<b>8</b>
<b>I.3.2.1 Anisotropía de las rocas.</b>	<b>9</b>
<b>I.3.3. Grado de humedad de la roca.</b>	<b>10</b>
<b>I.3.4. Resistividad de los fluidos contenidos en los poros.</b>	<b>11</b>
<b>I.3.5. Doble Capa Eléctrica y Capacidad de Intercambio Catiónico.</b>	<b>13</b>
<b>I.3.6. Temperatura.</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO. II. Métodos indirectos utilizados en la caracterización del sitio.</b>	<b>16</b>
<b>II.1. Relación entre zona contaminada por hidrocarburos y anomalía de resistividad.</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).</b>	<b>17</b>
<b>II.2.1. Introducción.</b>	<b>17</b>
<b>II.2.2. Conceptos Básicos.</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2.1. Ecuaciones de Maxwell.</b>	<b>18</b>
<b>II.2.2.2. Profundidad de Investigación.</b>	<b>22</b>
<b>II.2.2.3. Dispositivo electródico.</b>	<b>24</b>
<b>II.2.2.4. Resistividad Aparente (<math>\rho_a</math>).</b>	<b>25</b>
<b>II.2.3. Fundamentos del método SEV.</b>	<b>26</b>
<b>II.2.3.1. Cortes Geoeléctricos.</b>	<b>27</b>

---

---

<b>II.2.3.2. Clasificación de los Cortes Geoeléctricos.</b>	<b>28</b>
<b>II.2.3.3. Función Kernel o función característica.</b>	<b>29</b>
<b>II.2.3.4. Cálculo numérico de curvas teóricas para medios estratificados.</b>	<b>30</b>
<b>II.2.3.5. Funciones de Dar Zarrouk.</b>	<b>31</b>
<b>II.2.3.5.1. Resistencia Transversal Unitaria (T).</b>	<b>31</b>
<b>II.2.3.5.2. Conductancia Longitudinal Unitaria (S).</b>	<b>32</b>
<b>II.2.3.5.3. Triángulo de Anisotropía.</b>	<b>32</b>
<b>II.2.3.5.4. Fórmulas de las Curvas de Dar Zarrouk (CDZ).</b>	<b>34</b>
<b>II.2.3.6. Tomografía Eléctrica.</b>	<b>36</b>
<b>II.2.4. Metodología de campo para Sondeo Eléctrico Vertical SEV aplicada al sitio de estudio.</b>	<b>37</b>
<b>II.3. Método de Perfilaje Electromagnético (PEM).</b>	<b>38</b>
<b>II.3.1. Introducción.</b>	<b>38</b>
<b>II.3.2. Fundamento Teórico.</b>	<b>39</b>
<b>II.3.3. Metodología de campo para Perfilaje Electromagnético PEM aplicada al sitio.</b>	<b>41</b>
<b>II.4. Mediciones de Resistividad en muestras de agua y suelo.</b>	<b>42</b>
<b>II.4.1. Introducción</b>	<b>42</b>
<b>II.4.2. Mediciones de Resistividad en muestras de agua (MRA).</b>	<b>42</b>
<b>II.4.3. Mediciones de Resistividad en muestras de suelo (MRS).</b>	<b>43</b>
<b>II.4.4. Inversión Petrofísica.</b>	<b>46</b>
<b>II.4.4.1. Teoría de la Inversión Petrofísica.</b>	<b>46</b>
<b>II.4.4.2. Proceso de Inversión Petrofísica.</b>	<b>48</b>
<b>II.5. Método Gasométrico.</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO III. Aplicación de la Tecnología Geoeléctrica en un Sitio Urbano Contaminado por Hidrocarburos.</b>	<b>54</b>
<b>III.1. Introducción.</b>	<b>54</b>
<b>III.2. Antecedentes Generales.</b>	<b>54</b>
<b>III.3. Características Geológicas del Sitio.</b>	<b>56</b>
<b>III.3.1. Estratigrafía.</b>	<b>56</b>

---

---

<b>III.3.2. Geología.</b>	<b>58</b>
<b>III.3.3. Litología.</b>	<b>59</b>
<b>III.3.4. Hidrogeología.</b>	<b>59</b>
<b>III.4. Planeación y Selección de la Tecnología de Medición.</b>	<b>60</b>
<b>III.5. Detección de Ductos Metálicos (DDM).</b>	<b>61</b>
<b>III.6. Aplicación del Método PEM.</b>	<b>61</b>
<b>III.7. Aplicación del Método SEV.</b>	<b>64</b>
<b>III.7.1. Trabajo de Campo.</b>	<b>65</b>
<b>III.7.2. Interpretación Cualitativa.</b>	<b>66</b>
<b>III.7.2.1. Secciones de Resistividad Aparente.</b>	<b>66</b>
<b>III.7.2.2. Análisis Estadístico de Resistividad Aparente.</b>	<b>68</b>
<b>III.8. Mediciones de Resistividad de Muestras de Agua (MRA).</b>	<b>69</b>
<b>III.9. Mediciones de Resistividad de Muestras de Suelo (MRS).</b>	<b>69</b>
<b>III.10. Inversión Petrofísica.</b>	<b>70</b>
<b>III.11. Interpretación Cuantitativa.</b>	<b>71</b>
<b>III.11.1. Secciones de Resistividad Interpretada.</b>	<b>72</b>
<b>III.12. Resultados.</b>	<b>73</b>
<b>III.12.1. Comparación de Resultados de PEM con SEV.</b>	<b>74</b>
<b>III.13. Conclusiones.</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO IV. Interpretación conjunta de los resultados obtenidos con métodos geoelectrónicos y gasométricos.</b>	<b>77</b>
<b>IV.1. Introducción.</b>	<b>77</b>
<b>IV.2. Resultados obtenidos por métodos gasométricos.</b>	<b>77</b>
<b>IV.3. Interpretación conjunta.</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO V. Verificación de los resultados de la Interpretación Conjunta. Aplicación del Método Geoquímico</b>	<b>84</b>
<b>V. 1. Estudio geoquímico realizados en muestras de suelo .</b>	<b>85</b>
<b>V. 2. Estudio geoquímico en muestras de hidrocarburos en fase libre.</b>	<b>88</b>

---

<b>CAPÍTULO VI. Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>92</b>
<b>VI.1. Conclusiones.</b>	<b>92</b>
<b>VI.2. Recomendaciones.</b>	<b>93</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS.</b>	<b>99</b>
<b>A1. Desarrollo de la Función Característica en SEV.</b>	<b>99</b>
<b>A1.1. Relación de Recurrencia de Pekeris.</b>	<b>99</b>
<b>A1.2. Propiedades de la Función Característica.</b>	<b>111</b>
<b>A2. Filtrado Lineal Digital.</b>	<b>103</b>
<b>A3. Teoría Electromagnética.</b>	<b>107</b>
<b>A4. Teoría de la Modelacion Petrofísica.</b>	<b>116</b>
<b>A5. Conceptos relacionados con el método COV's .</b>	<b>120</b>
<b>A6. Tabla completa con todas las variables utilizadas en el cálculo del Parámetro Integral.</b>	<b>122</b>

---

**ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS****CAPÍTULO I.**

**Tabla I.1:** Resistividad de la arena y caliza, así como de los minerales que las conforman. \_\_\_\_\_ 7

**Figura I.1:** Relación entre la resistividad y Porosidad de la roca, calculada para una muestra de arena con una salinidad de 0.1 g/l, 100% saturada a una temperatura de 20°C. \_\_\_\_\_ 8

**Figura I.2:** A) Poros orientados, la resistividad  $A_1$  es menor que la resistividad  $A_2$ . B) Poros sin orientar, la resistividad  $A_1$  es igual a la resistividad  $A_2$ . \_\_\_\_\_ 9

**Tabla I.2:** Valores típicos del coeficiente de anisotropía . \_\_\_\_\_ 10

**Figura I.3:** Relación entre la resistividad de la roca y su humedad determinada para una muestra con 25% de porosidad y saturación total con agua de salinidad 0.1 g/l, a una temperatura de 20°C. \_\_\_\_\_ 11

**Tabla I.3:** Movilidad de iones en solución acuosa a 18 C. \_\_\_\_\_ 12

**Figura I.4:** Resistividad de una solución de NaCl y de una muestra de arena con porosidad de 25% y saturada 100% con dicha solución a una temperatura de 20°C. \_\_\_\_\_ 12

**Figura I.5:** Representación de las capas de Helmholtz y Gouy. \_\_\_\_\_ 13

**Figura I.6:** Relación entre la conductividad eléctrica, el diámetro capilar y diferentes concentraciones de sales, para una solución de NaCl. \_\_\_\_\_ 14

**Tabla I.4: Espesor de la DCE en una solución de NaCl. \_\_\_\_\_ 14**

**Tabla I.5: CIC para diferentes materiales. \_\_\_\_\_ 15**

## **CAPÍTULO II.**

**Figura II.1: Dispositivos tetraelectródicos a) Schlumberger, b) Wenner. \_\_\_\_\_ 18**

**Figura II.2: Vectores de densidad de corriente en un semiespacio homogéneo. \_ 19**

**Figura II.3: Potencial producido por los electrodos de corriente en el electrodo M.  
\_\_\_\_\_ 20**

**Figura II.4: Vector densidad de corriente en el punto de atribución. \_\_\_\_\_ 22**

**Figura II.5: Gráfica de profundidad contra componente horizontal del vector de corriente. \_\_\_\_\_ 23**

**Figura II.6: Ejemplos de la relación entre la separación de los electrodos de corriente y la profundidad de estudio. \_\_\_\_\_ 23**

**Figura II.7: Dispositivos Tetraelectródicos. \_\_\_\_\_ 24**

**Figura II.8: Medio heterogéneo. \_\_\_\_\_ 25**

**Figura II.9: Modelo 1D; la posición de los electrodos de potencial, M y N, es fija, mientras que los de corriente, A y B, se van separando para obtener distintas profundidades de investigación. \_\_\_\_\_ 27**

**Figura II.10: Corte Geoeléctrico estratificado y su notación. \_\_\_\_\_ 28**

**Figura II.11: Curvas de resistividad verdadera para  $\rho_1 > \rho_2$  y  $\rho_1 < \rho_2$  (Cortes Geoeléctricos de 2 capas). \_\_\_\_\_ 29**

- Figura II.12: Curvas de resistividad verdadera (Cortes Geoeléctricos de 3 capas).**  
 \_\_\_\_\_ 29
- Figura II.13: Modelo para la definición de los parámetros de Dar Zarrouk (S y T).**  
 \_\_\_\_\_ 31
- Figura II.14: Triangulo de Anisotropía Con J: (h,  $\rho$ ), M: (h,  $\rho$ ), Z: (hA,  $\rho_m$ ), h = espesor, M se llama punto de Hummel y el Z punto de Dar Zarrouk.** \_\_\_\_\_ 34
- Figura II.15: Ejemplo de tomografía eléctrica con varios puntos de SEV en configuración Wenner.** \_\_\_\_\_ 36
- Figura II.16: Esquema de la aplicación en campo del sondeo Schlumberger en su modalidad de tomografía eléctrica.** \_\_\_\_\_ 37
- Figura II.17: Matriz de valores de  $\rho_a$  obtenidos a partir de mediciones de SEV a lo largo de un perfil.** \_\_\_\_\_ 37
- Figura II.18: Flujo de corriente inducida (en el vacío Tx = es la bobina transmisora, Rx = bobina receptora, S distancia entre bobinas.**  
 \_\_\_\_\_ 40
- Figura II.19. Esquema de la implementación de los dipolos horizontales (A) y dipolos verticales (B).** \_\_\_\_\_ 41
- Figura II.20: Resistivímetro de suelo.** \_\_\_\_\_ 44
- Figura II.21: Modelo de suelo para diferentes contenidos de arcilla (Shevnin et., al., 2007).** \_\_\_\_\_ 47

**Figura II.22: Modelo que representa las curvas teóricas de resistividad con tra salinidad de agua contenida en los poros para diferente contenido de arcilla en suelos areno - arcillosos (Shevnin et., al., 2007).** \_\_\_\_\_ **49**

**Figura II.23: Curva que representa la relación entre la porosidad del suelo y el contenido de arcilla para la Figura II.22 (Shevnin et., al., 2007).** \_\_\_\_\_ **50**

**Tabla II.5.1: Potencial de ionización para diferentes compuestos.** \_\_\_\_\_ **52**

**Figura II.24: Esquema de un Fotoionizador.** \_\_\_\_\_ **53**

### **CAPÍTULO III.**

**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 es tratigráfica con dirección SW-NE.** \_\_\_\_\_ **55**

**Figura III.2: A) Vista de la calle principal en el área de estudio. B) Excavaciones realizadas.** \_\_\_\_\_ **56**

**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.** \_\_\_\_\_ **57**

**Tabla III.1: Información litológica generalizada para la zona de estudio.** \_\_\_\_\_ **59**

**Figura III.4: Técnica inductiva de localización de ductos utilizando el equipo Fisher TW6.** \_\_\_\_\_ **61**



---

<b>Figura III.5: Aplicación del método PEM en un área contaminada.</b>	<b>63</b>
<b>Figura III.6: Mapa de resistividad aparente obtenido por el método PEM. Se indican las zonas anómalas principales.</b>	<b>63</b>
<b>Figura III.7: Aplicación del método SEV en un área contaminada.</b>	<b>64</b>
<b>Figura III.8: Esquema del área de estudio con la ubicación del TAS, el punto de fuga de hidrocarburos y excavaciones realizadas. El esquema incluye la ubicación de los perfiles de TRE realizados.</b>	<b>65</b>
<b>Figura III.9: Secciones de resistividad aparente obtenidas de la aplicación del método SEV.</b>	<b>67</b>
<b>Figura III.10: Distribución estadística de los valores de resistividad aparente para todos 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.</b>	<b>68</b>
<b>Figura III.11: Equipo Hanna HI98130 para el método MRA.</b>	<b>69</b>
<b>Tabla III.2: Parámetros petrofísicos de las muestras de suelo colectadas en los puntos 1 a 5.</b>	<b>69</b>
<b>Figura III.12: Muestras de suelo colectadas en el sitio de estudio.</b>	<b>70</b>
<b>Figura III.13: Curvas de resistividad versus salinidad obtenidas en laboratorio para 5 muestras de suelo.</b>	<b>71</b>

---

**Tabla III.3: Intervalos de profundidad para las capas interpretadas en cada perfil de SEV mediante el programa Res2DInv (M.H.Loke). \_\_\_\_\_ 71**

**Figura III.15: Secciones de resistividad interpretada obtenidas de la aplicación del método SEV. \_\_\_\_\_ 72**

**Figura III.16: Mapas horizontales de resistividad para capas 3, 4 y 5 por datos de SEV. \_\_\_\_\_ 74**

**Figura III.17: Mapa comparativo de resistividad entre método SEV y PEM. \_\_\_\_ 76**

#### **CAPÍTULO IV.**

**Tabla IV.1: Valores de COV's medidos en campo. \_\_\_\_\_ 78**

**Figura IV.1: Mapa de anomalía de COV's. \_\_\_\_\_ 79**

**Figura IV.2: Comparación entre las anomalías mostradas por COV's (A) y las anomalías de PEM (B). \_\_\_\_\_ 79**

**Tabla IV.2: Escala de pesos por anomalía de SEV, PEM y COVs. \_\_\_\_\_ 81**

**Tabla IV.3: Determinación del parámetro integral (Tabla completa en el anexo de este capítulo). \_\_\_\_\_ 82**

**Figura IV.3: Mapa de parámetro integral. \_\_\_\_\_ 83**

#### **CAPÍTULO V.**

**Figura V.1: Mapa integral con la ubicación de los pozos de muestreo. \_\_\_\_\_ 84**

**Tabla V.1: Resultados de hidrocarburos en fracción ligera y BTEX en muestras de suelo, los valores fuera de norma están resaltados (NOM -138 SEMARNAT 2003).** \_\_\_\_\_ **86**

**Figura V.2: Muestras de hidrocarburo obtenidas en la zona de estudio, la muestra más fresca (A -B) es de color negro debido a la presencia de chapopote próximo a la fuga. C es la muestra biodegradada.** \_\_\_\_\_ **88**

**Tabla V.2: Resultados del análisis PIONA a muestras de hidrocarburo en fase libre.** \_\_\_\_\_ **89**

**Figura V.3: Gráfica de resultados del análisis PIONA a muestras de hidrocarburo en fase libre.** \_\_\_\_\_ **89**

**Figura V.4: Relación BT/EX.** \_\_\_\_\_ **90**

**Tabla V.3: Relaciones para la estimación de evaporación, lavado y biodegradación de muestras en fase libre.** \_\_\_\_\_ **91**

## ANEXOS.

**Figura A1.1: Secuencia de estratos de Pekeris.** \_\_\_\_\_ **99**

**Tabla A2.1: Parámetros del Filtro Lineal para Sondeos Eléctricos Verticales.** \_ **106**

**Figura A7.1: Esquema del etano  $\text{CH}_3$  - $\text{CH}_3$ .** \_\_\_\_\_ **120**

**Figura A7.2: Esquema del Benceno.** \_\_\_\_\_ **120**