

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL
REGIONAL, UNIDAD OAXACA



Maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales

Especialidad en transformación de recursos naturales
(Ingeniería de procesos)

ESTUDIO GEOFISICO USANDO METODOS ELECTROMAGNÉTICOS EN UN MEDIO FRACTURADO AFECTADO POR LIXIVIADOS

T e s i s

Que para obtener el grado de
Maestro en ciencias

Presenta:

Alberto Bortolotti Villalobos

Director de tesis: Dr. Salvador I. Belmonte Jiménez

Santa Cruz Xoxocotlán, Oax. Enero de 2009



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 05 del mes de diciembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Estudio geofísico usando métodos electromagnéticos en un medio fracturado afectado por lixiviados"**

Presentada por el alumno

Bortolotti

Villalobos

Alberto

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Dr. Andrés Pech Pérez

Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo

Dr. Prisciliano Felipe de Jesus cano Barrita

Dr. Magdalena Caballero Caballero

EI PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR
UNIDAD OAXACA
IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 02 del mes diciembre del año 2008, el (la) que suscribe Bortolotti Villalobos Alberto alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061456**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez. y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estudio geofísico usando métodos electromagnéticos en un medio fracturado afectado por lixiviados”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoox@ipn.mx ó alberto_oax@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIDIR-UNIDAD-OAXACA

BORTOLOTTI VILLALOBOS ALBERTO

D e d i c a t o r i a

Este trabajo esta dedicado a mi familia:

a mi padre (Rafael) y mi madre (Micaela) por su apoyo y ayuda,

a mis hermanas (María, Margarita y Micaela),

a mi esposa (Yolanda) e hija (Karla Anahí) por su comprensión y ayuda,

Gracias por todo su apoyo incondicional que me han brindado.

A g r a d e c i m i e n t o s

Al Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez.

Por compartir su experiencia, conocimiento y tiempo para lograr el desarrollo de esta Tesis.

A mis asesores de tesis y miembros del comité revisor:

M. en C. María Ladrón de Guevara, Dr. Andrés Pech Pérez, Dr. Juan Rodríguez, Ramírez, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrirta y al Dr. Juan Alejandro Vázquez Feijoo. Por su actitud crítica con el afán de mejorar la calidad del trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional y al CIIDIR Unidad Oaxaca.

Por todo su apoyo y tiempo, a fin de formarnos como mejores profesionistas y buenos investigadores en un futuro cercano.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Por la beca otorgada durante toda la maestría.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores.

Por la beca otorgada a través de los proyectos:

- Evaluación de la contaminación subterránea generada por el tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca. Con clave SIP-20060280.
- Estudio hidrogeológico del sistema acuífero del Valle de Zaachila, para evaluar la cantidad y calidad del agua subterránea. Con clave SIP-20070076.
- Estudio hidrogeológico del sistema acuífero del Valle de Zaachila, para evaluar la cantidad y calidad del agua subterránea. Con clave SIP-20080567.

A mis compañeros del CIIDIR: Martha, Francisco y Eberth y a la Maestra Maria Ladrón de Guevara.

Por su apoyo en el trabajo de campo realizado, ya que su ayuda fue muy valiosa.

Resumen

La presente investigación se realizó en el tiradero a cielo abierto de la ciudad de Oaxaca, que se localiza al sureste de la capital del estado, aproximadamente a 15 km por la carretera Oaxaca-Puerto Ángel, en el Distrito de Zaachila. Dicho lugar constituye actualmente un importante problema ambiental, debido a que allí se generan lixiviados que se infiltran en el subsuelo. El propósito de la misma consistió en evaluar la respuesta de dos métodos geofísicos para la identificación de zonas fracturadas y contaminadas, empleándose dos métodos electromagnéticos, el método de Bobinas Electromagnéticas y el método de Muy Baja Frecuencia (VLF, Very Low Frequency).

Esté estudio se justificó por cuanto posee utilidad práctica, relevancia social, por su conveniencia y en base a los beneficios que generará. Se sustenta en la teoría de la prospección geofísica, principalmente en la de los métodos electromagnéticos de bobinas electromagnéticas y de VLF.

Se realizaron levantamientos geofísicos en dos periodos distintos en agosto de 2007 y febrero de 2008. En el primer periodo se realizó el levantamiento de 4 perfiles comunes para ambos métodos geofísicos con longitudes de 325, 320, 300 y 645 m respectivamente, con estaciones a cada 5 m, posicionando geográficamente cada estación con equipo GPS postproceso. Para la segunda fecha mencionada se evaluaron nuevamente los mismos perfiles con el método de VLF y se agregaron dos perfiles más con longitudes de 275 m y de 415 m. Los perfiles fueron ubicados estratégicamente en la zona del tiradero, realizándose 4 perfiles dentro del perímetro del mismo en su lado sur, norte, oeste, así como en su parte central respectivamente, mientras que los dos restantes (2 y 3) se ubicaron en la parte sur fuera del tiradero.

El instrumento utilizado con el método de bobinas electromagnéticas fue el EM-34 marca Geonics, que opera con dos posiciones y a distintas separaciones de 10 m (6400 Hz), 20 m (2600 Hz) y 40 m (600 Hz), y que generan como respuesta el valor de la conductividad aparente. Para el caso del VLF se usó un equipo marca Scintrex, el cual opera bajo frecuencias entre 15 a 30 kHz emitidas por antenas militares de gran alcance.

Los datos obtenidos se procesaron utilizando modelos 2D que proporcionaron resultados razonables sobre la conductividad eléctrica del subsuelo; con los datos de VLF se han inferido zonas fracturadas que favorecen la percolación de los lixiviados, mientras que EM-34 indica la distribución de la conductividad en el subsuelo la cual ha sido afectada por este tipo de contaminante. De los resultados obtenidos revelan una zona anómala conductora principal en la parte sur-este del tiradero que se incrementa hacia la parte central del mismo y que continúa hasta una profundidad teórica de 60 m, coincidiendo con la zona por donde se encuentra el dren natural a lo largo del cual fluyen los lixiviados.

Abstract

This investigation was carried out in the open landfill which is located in the southeastern part of Oaxaca city, capital of the state. Such place constitutes an important environmental problem at the moment due to leached products that infiltrates the underground are generated there. The investigation purpose consisted of evaluating the result of two geophysical methods for the identification of fractured and polluted areas using two electromagnetic methods: the Electromagnetic Coil and the VLF (very low frequency) method.

This study was justified due to its practical utility and social relevance as well as its convenience based on the benefits that it will generate. It is founded on the geophysical prospecting, mainly on that one of the electromagnetic methods of electromagnetic coils and the one of Very Low Frequency.

Geophysical surveys were carried out in two different periods (August of 2007 and February of 2008). In the first period, the rising of 4 common profiles for both geophysical methods were carried out with lengths of 325, 320, 300 y 645 m respectively, with stations every 5 m and positioning each station geographically with equipment GPS postprocess. For the second mentioned date, the same profiles were evaluated again with the VLF method and two more profiles of 275 and 415 meters long were added. The profiles were located strategically in the garbage dump area, being carried out 4 profiles inside the perimeter of the landfill (South, North, West as well as in its central part respectively), while the other two (2 and 3) were located in the southern part outside of the garbage dump.

The instrument used with the method of electromagnetic coils was the EM-34 which works with two positions to different separations of 10 m (6400 Hz), 20 m (2600 Hz) and 40 m (600 Hz) that generate as an answer the value of the apparent conductivity. An equipment Scintrex which works with frequencies between 15 to 30 kHz was used for the case of VLF. These frequencies are emitted by long-range military antennas.

The obtained data were processed using 2-D models that provided reasonable results about the electric conductivity of the underground. Fractured areas which favour dump leaching infiltration have been inferred with the VLF data while EM-34 indicates the distribution of the conductivity un the underground that has been affected by this pollutant type. The obtained results indicate, in the southeatern part of the landfill, an anomalous area that increases in the central part of garbage dump. This zone continues until a 60 meters theoretical depth coinciding with the area where the natural drain is located and through which dump leaching flows.

Índice general

Índice general.....	i
Índice de tablas.....	iii
Índice de figuras.....	iv
Introducción.....	1
Antecedentes.....	4
Capítulo 1. Planteamiento de la investigación.....	6
1.1. Introducción.....	6
1.2. Planteamiento del problema.....	6
1.3. Justificación de la investigación.....	7
1.4. Objetivo general y objetivos específicos.....	8
1.5. Hipótesis.....	9
Capítulo 2. Marco teórico y conceptual.....	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Teoría de prospección electromagnética.....	10
2.2.1. Generalidades del método.....	10
2.2.2. Método de prospección con bobinas electromagnéticas.....	14
2.2.3. Método de prospección con VLF.....	17
2.3. Aspectos geológicos.....	24
2.3.1. Estratigrafía.....	24
2.3.2. Rumbo y echado.....	25
2.3.3. Pliegues.....	26
2.3.4. Fracturas.....	27
Capítulo 3. Descripción del área de estudio.....	29
3.1. Introducción.....	29
3.2. Localización.....	29
3.3. Situación actual del tiradero.....	30
3.4. Contexto geológico.....	33
3.5. Contexto hidrogeológico.....	34
Capítulo 4. Materiales y métodos.....	36
4.1. Introducción.....	36
4.2. Metodología.....	36

4.2.1. Delimitación de la unidad de análisis.....	37
4.2.2. Variables involucradas.....	37
4.2.3. Selección de los métodos geofísicos.....	37
4.2.4. Localización del área de estudio.....	37
4.2.5. Ubicación de sitios particulares.....	38
4.2.6. Medición por medio de métodos geofísicos seleccionados.....	38
4.2.7. Levantamiento geológico.....	39
4.2.8. Posicionamiento de puntos con GPS postproceso.....	39
4.2.9. Instrumentación utilizada.....	40
4.2.10. Descripción de análisis y procesamiento e interpretación de resultados.....	40
Capítulo 5. Resultados y discusión.....	44
5.1. Introducción.....	44
5.2. Procesado inicial.....	44
5.3. Datos procesados y resultados.....	50
5.4. Análisis y discusión de resultados.....	72
Conclusiones y recomendaciones.....	87
Bibliografía.....	89
Glosario.....	93

Indice de tablas

Tabla 1.- Profundidad de exploración de acuerdo a la separación de las bobinas.....	15
Tabla 2.- Listado de actividades realizadas para el desarrollo de la presente investigación.....	36

Índice de figuras

Figura 1. Espectro de ondas electromagnéticas.....	10
Figura 2. Inducción electromagnética, producida por un transmisor y que se propaga a través del suelo induciendo corriente en cualquier conductor que se halle en su recorrido.....	11
Figura 3. Representación de las bobinas electromagnéticas conectadas entre sí.....	14
Figura 4. Campos electromagnéticos generados por ondas de radio.....	19
Figura 5. Corte estratigráfico característico de la zona donde se localiza el tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	25
Figura 6. Rumbo y echado. Estratos inclinados de un afloramiento en el terreno.....	26
Figura 7. Formas de los pliegues anticlinales y sinclinales.....	27
Figura 8.- Falla normal.....	28
Figura 9.- Falla inversa.....	28
Figura 10.- Falla Transversal.....	28
Figura 11. Plano de ubicación del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	29
Figura 12. Perspectiva de febrero de 2008, del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	30
Figura 13. Contaminación de las aguas superficiales, captación de agua y lixiviados en una laguna que se localiza al suroeste del tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca	31
Figura 14. Contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de lixiviados.....	31
Figura 15. Vulnerabilidad del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	31
Figura 16. Crecimiento de la mancha urbana en febrero de 2008, en las periferias del lado oeste del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	32
Figura 17. Laguna de lixiviados construida exprofeso para el saneamiento del tiradero...32	
Figura 18. Geología de la zona de estudio.....	33
Figura 19. Secuencia rítmica de lutita y arenisca.....	34
Figura 20. Escurrimientos superficiales en la zona del tiradero de la ciudad de Oaxaca...35	
Figura 21. Unidades hidrogeológicas en la zona del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	35
Figura 22. Localización de los perfiles estudiados, se muestran en línea punteada.....	38
Figura 23. Ubicación de las estaciones VLF utilizadas situadas respectivamente en Hawaii, Annapolis (USA) y en Puerto Rico.....	39
Figura 24. Conglomerado de prismas en 2D.....	41

Figura 25. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM (electromagnéticas) del perfil 1, para la modalidad de dipolo vertical	44
Figura 26. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 1, para la modalidad de dipolo horizontal	44
Figura 27. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 2, para la modalidad de dipolo vertical.....	45
Figura 28. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 2, para la modalidad de dipolo horizontal.....	45
Figura 29. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 3, para la modalidad de dipolo vertical.....	45
Figura 30. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 3, para la modalidad de dipolo horizontal.....	45
Figura 31. Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 4, para la modalidad de dipolo vertical.....	45
Figura 32. Grafica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 4, para la modalidad de dipolo horizontal.....	45
Figura 33. Gráfica de los datos VLF del perfil 1 de agosto 2007.....	46
Figura 34. Gráfica de los datos VLF del perfil 2 de agosto 2007.....	46
Figura 35. Gráfica de los datos VLF del perfil 3 de agosto 2007.....	46
Figura 36. Gráfica de los datos VLF del perfil 4 de agosto 2007.....	46
Figura 37. Gráfica de los datos VLF del perfil 1 de febrero 2008.....	46
Figura 38. Gráfica de los datos VLF del perfil 2 de febrero 2008.....	46
Figura 39. Gráfica de los datos VLF del perfil 3 de febrero 2008.....	47
Figura 40. Gráfica de los datos VLF del perfil 4 de febrero 2008.....	47
Figura 41. Gráfica de los datos VLF del perfil 5 de febrero 2008.....	47
Figura 42. Gráfica de los datos VLF del perfil 6 de febrero 2008.....	47
Figura 43. Imagen del perfil 1 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal.....	48
Figura 44. Imagen del perfil 2 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal	48
Figura 45 Imagen del perfil 3 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal	49
Figura 46. Imagen del perfil 4 de bobinas EM, para las modalidad de dipolo vertical y horizontal	49

Figura 47. Topografía del perfil 1.....	50
Figura 48. Topografía del perfil 2.....	50
Figura 49. Topografía del perfil 3.....	50
Figura 50. Topografía del perfil 4.....	50
Figura 51. Topografía del perfil 5.....	50
Figura 52. Topografía del perfil 6.....	50
Figura 53. Gráfica de los datos procesados del perfil 1 para la modalidad de dipolo vertical	51
Figura 54. Gráfica de los datos procesados del perfil 1 para la modalidad de dipolo horizontal.....	51
Figura 55. Gráfica de los datos procesados del perfil 2 para la modalidad de dipolo vertical.....	51
Figura 56. Gráfica de los datos procesados del perfil 2 para la modalidad de dipolo horizontal.....	51
Figura 57. Gráfica de los datos procesados del perfil 3 para la modalidad de dipolo vertical	51
Figura 58. Gráfica de los datos procesados del perfil 3 para la modalidad de dipolo horizontal.....	51
Figura 59. Gráfica de los datos procesados del perfil 4 para la modalidad de dipolo vertical.....	52
Figura 60. Gráfica de los datos procesados del perfil 4 para la modalidad de dipolo horizontal.....	52
Figura 61. Imagen con los datos procesados del perfil 1 de bobinas EM.....	52
Figura 62. Imagen con los datos procesados del perfil 2 de bobinas EM.....	53
Figura 63. Imagen con los datos procesados para el perfil 1, integrando el dipolo vertical y el horizontal.....	53
Figura 64. Imagen con los datos procesados para el perfil 2, integrando el dipolo vertical y el horizontal.....	53
Figura 65. Imagen con los datos procesados para el perfil 3 de bobinas EM.....	54
Figura 66. Imagen con los datos procesados para el perfil 4 de bobinas EM.....	54
Figura 67. Imagen con los datos procesados para el perfil 3, integrando el dipolo vertical y el horizontal.....	55
Figura 68. Imagen con los datos procesados para el perfil 4, integrando el dipolo vertical y el horizontal.....	55

Figura 69. Gráfica del filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente real, agosto de 2007.....	56
Figura 70. Gráfica del filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.....	56
Figura 71. Imagen del perfil 1, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.....	56
Figura 72. Imagen del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.....	57
Figura 73. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2, correspondiente al componente real, agosto de 2007.....	57
Figura 74. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.....	57
Figura 75. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.....	58
Figura 76. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.....	58
Figura 77. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3, correspondiente al componente real, agosto de 2007.....	59
Figura 78. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3, correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.....	59
Figura 79. Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.....	59
Figura 80. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.....	59
Figura 81. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4, correspondiente al componente real, agosto de 2007.....	60
Figura 82. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.....	60
Figura 83. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.....	60
Figura 84. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.....	61
Figura 85. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	62

Figura 86. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	62
Figura 87. Imagen del perfil 1, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	62
Figura 88. Imagen del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	62
Figura 89. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	63
Figura 90. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	63
Figura 91. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	63
Figura 92. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	64
Figura 93. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	64
Figura 94. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	64
Figura 95. Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	65
Figura 96. Imagen del perfil 3, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	65
Figura 97. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	66
Figura 98. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	66
Figura 99. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	66
Figura 100. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	66
Figura 101. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 5, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	67
Figura 102. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 5, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	67

Figura 103. Imagen del perfil 5, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	67
Figura 104. Imagen del perfil 5, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	68
Figura 105. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 6, correspondiente al componente real, febrero de 2008.....	68
Figura 106. Gráfica de filtrado Fraser del perfil 6, correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.....	68
Figura 107. Imagen del perfil 6, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.....	69
Figura 108. Imagen del perfil 6, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.....	69
Figura 109.- Imagen del perfil 2 correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007 con promedios móviles.....	70
Figura 110. Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.....	70
Figura 111. Imagen del perfil 3 correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007 con promedios móviles.....	70
Figura 112. Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.....	71
Figura 113. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF agosto 2007 con promedios móviles.....	71
Figura 114. Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF febrero de 2008 con promedios móviles.....	71
Figura 115. Imagen del perfil 5, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.....	72
Figura 116. Imagen para el perfil 1, en donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que, se efectuaron los sondeos.....	73
Figura 117. Imagen para el perfil 2, en donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.....	74
Figura 118. Imagen para el perfil 3, en donde se integran los datos de bobinas	

electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.....	75
Figura 119. Imagen para el perfil 4, en donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos, para el perfil 4.....	75
Figura 120. Imagen del perfil 5, sólo para datos VLF de febrero de 2007.....	76
Figura 121. Imagen del perfil 6, sólo para datos VLF de febrero de 2007.....	76
Figura 122. Perspectiva a distintas profundidades para los datos procesados de bobinas EM, correspondientes a la modalidad de dipolo horizontal, agosto 2007. Donde DH10, DH20 y DH40 son separaciones entre las bobinas.....	78
Figura 123. Perspectiva a distintas profundidades para los datos procesados de bobinas EM, correspondientes a la modalidad de dipolo vertical, agosto 2007. Donde DV10, DV20 y DV40 son separaciones entre las bobinas.....	79
Figura 124. Perspectiva a distintas profundidades, con los datos procesados de VLF correspondientes al periodo de agosto 2007.....	80
Figura 125. Perspectiva a distintas profundidades, con los datos procesados de VLF correspondientes al periodo de febrero de 2008.....	81
Figura 126. Orientación de los perfiles estudiados dentro y en el perímetro del tiradero de la ciudad de Oaxaca.....	82
Figura 127. Dirección preferencial de los buzamientos.....	82
Figura 128. Dirección preferencial de las fracturas.....	82
Figura 129. Modelo geológico – geofísico del perfil 1.....	83
Figura 130. Modelo geológico – geofísico del perfil 2.....	84
Figura 131. Modelo geológico – geofísico del perfil	84
Figura 132. Modelo geológico – geofísico del perfil 4.....	85
Figura 133. Modelo geológico – geofísico del perfil 5.....	86
Figura 134. Modelo geológico – geofísico del perfil 6.....	86

Introducción

El acelerado crecimiento demográfico que experimenta el mundo y el excesivo consumo de los recursos naturales han propiciado que el medio ambiente se deteriore, contaminando el aire, el suelo y el agua del planeta; siendo la contaminación ambiental una de las principales preocupaciones de los científicos e investigadores de la Tierra en todo el mundo (Mondelli et al., 2007; Soupios et al., 2007).

Dentro de los problemas más graves que sufren las ciudades son la generación e inadecuada disposición final de los residuos sólidos. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (2005), cada año se generan en el país más de 32 millones de toneladas de residuos sólidos municipales, y casi 11 millones son colocados en tiraderos a cielo abierto sin ningún control.

Teniendo una contribución importante en esta contaminación ambiental la mala disposición de residuos sólidos (Busquets y Casas, 1995; Samsudin et al., 2006), que son depositados en lugares que no cumplen con la normatividad ambiental vigente; en este caso con la NOM-083-SEMARNAT-2003, que se refiere a las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción y operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

La capital del estado de Oaxaca no es la excepción en cuanto a contaminación ambiental por mala disposición de residuos urbanos, ya que en ésta se generan aproximadamente 225 Ton/día de residuos sólidos (Calvo, 2005); sin embargo, la coordinación de servicios municipales considera que 800 Ton. son depositadas al día en el tiradero a cielo abierto localizado en el Municipio de Zaachila, el cual opera desde más de 24 años, y cuenta con una extensión de 16 Ha. Con esto se genera un ambiente propicio para la formación de lixiviados que escurren y posiblemente se infiltran en el subsuelo, contaminando las aguas superficiales y los sistemas acuíferos.

Esto es un riesgo para la población que se aloja cerca de éste tiradero, ya que debido a la necesidad de agua potable para su consumo excavan pozos artesianos para conseguirla, con

la posibilidad de que esté contaminada, existiendo riesgo para su salud (Adepelumi et al., 2005; Samsudin et al., 2006). Dada esta situación, cualquier solución que conlleve al saneamiento de la contaminación provocada, y principalmente generada por los lixiviados, requiere de ciertos datos básicos para la planificación económica e ingenieril de la solución más adecuada. Entre éstos se encuentra la determinación de la pluma contaminante que puede ser localizada por medio de métodos geofísicos (Rozycki, 1995; Kaya et al., 2007). La Geofísica aporta información que puede ayudar a determinar la geometría, extensión espacial y profundidad de una pluma contaminante (Soupios et al., 2007). Cabe considerar que antes de un amplio programa de estudio geofísico sobre una posible zona contaminada, una cuidadosa selección de las técnicas adecuadas es de vital importancia (Liu et al., 2006).

A fin de obtener mayor información de la distribución de la contaminación y en especial de la que se encuentra directamente ligada con el agua subterránea, la investigación realizada en el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la respuesta de los métodos geofísicos en un medio fracturado afectado por lixiviados; para ello se emplearon dos métodos geofísicos electromagnéticos, específicamente el de bobinas electromagnéticas y el very low frequency (VLF) adecuados a la zona bajo estudio; es decir, el tiradero a cielo abierto de la ciudad de Oaxaca.

Este trabajo se estructuró en cinco capítulos, presentándose en el primero el planteamiento de la investigación donde se plasmaron elementos relevantes como la justificación, planteamiento del problema, los objetivos y las hipótesis de investigación que condujeron y guiaron el desarrollo del trabajo.

Posteriormente se incluyó un marco teórico y conceptual donde se plasma la teoría y algunos conceptos relacionados con los métodos de prospección empleados para detectar zonas anómalas que permiten el paso a los lixiviados como las fracturas. Luego se incluyó en el capítulo 3, información básica relacionada con el área de estudio, que dan una idea de donde y cómo se encuentra físicamente el tiradero de la ciudad de Oaxaca. En el capítulo 4 se describe la metodología empleada para la realización del trabajo experimental, parte fundamental de toda investigación y en el capítulo 5 se presenta el procesado inicial para cada método geofísico empleado. También se incluyen los resultados, el análisis y discusión de los datos obtenidos. Para terminar con las conclusiones y recomendaciones

pertinentes. Finalmente, se proporciona un marco bibliográfico para aquellos lectores interesados que quisieran profundizar en el tema si así lo requieren.

Antecedentes

La prospección geofísica tiene como propósito deducir las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos, bien sea naturales o provocados, directa o indirectamente relacionados con la estructura geológica del subsuelo (Custodio, 1983), y que originalmente fue desarrollada como un método efectivo para la prospección del petróleo y de depósitos minerales.

El gran proceso tecnológico y científico ha hecho que los métodos de prospección se desarrollen constantemente aplicándose de forma generalizada, dependiendo del objetivo a investigar; ofreciendo una forma de obtener información detallada acerca de las condiciones del suelo y de las rocas del subsuelo de manera no destructiva. Esta capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbar el sitio ofrece el beneficio de costos más bajos y menos riesgo, dando mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio. Es necesario a menudo utilizar más de un método para lograr obtener la información deseada constituyendo una importante fuente de correlación, de extrapolación y de verificación de la información geológica.

Actualmente la prospección geofísica es muy utilizada en estudios hidrogeológicos y en la detección de contaminantes en el subsuelo (Adepelumi et al., 2006; Samsudin et al., 2006; Santos et al., 2006; Kaya et al., 2007; Mondelli et al., 2007; Soupios et al., 2007) tendiendo una importante contribución los métodos electromagnéticos.

Los métodos electromagnéticos como el de bobinas electromagnéticas y el de (VLF) son métodos utilizados recientemente en la detección de contaminantes y cuyo principio de operación de manera general gira en torno a la conductividad eléctrica, la cual proporciona información sobre la porosidad, saturación del agua, salinidad, contenido de arcilla, y materia orgánica, que no se pueden determinar por otros métodos geofísicos de investigación (Pellerin et al., 2005).

Por otro lado, se han aplicado algunos métodos geofísicos en el tiradero de la ciudad de Oaxaca para conocer cual es el grado de contaminación en el que se encuentra y conocer de esta manera la extensión que abarca ésta; se han realizado algunas investigaciones en

proyectos ejecutados en el CIIDIR Oaxaca en los cuales se han plasmado importantes resultados, tales como los realizados por Navarro et al., (2006) donde aplicó los métodos geofísicos específicos de bobinas electromagnéticas y de VLF en el área de tiro de los residuos sólidos) observando anomalías que alcanzaban conductividades eléctricas con valores máximos de 140 mS/m, asociando estos con la presencia de los lixiviados y concluyendo que la aplicación de los dos métodos permiten verificar las zonas anómalas.

Belmonte et al. (2006) efectuaron perfiles perpendiculares a la dirección del escurrimiento usando los métodos de resistividad de potencial natural y secciones con el método electromagnético de bobinas; obtuvieron resultados razonables de acuerdo al medio geológico y que el método de potencial natural (SP) proporcionó resultados poco resolutivos. Belmonte et al. (2005), por otra parte, mencionan que el acuífero de Zaachila presenta de media a alta vulnerabilidad, lo que le hace susceptible a la contaminación causada por fuentes superficiales como los lixiviados que son generados en el tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca.

Capítulo 1. Planteamiento de la investigación

1.1. Introducción.

Toda investigación requiere del establecimiento de directrices lógicas y metodológicas que la guíen, para lograr resultados razonables, por lo que este capítulo se estructuró de la siguiente manera: planteamiento del problema, justificación, objetivos e hipótesis de investigación, para lograr el desarrollo de este trabajo. Describiéndose en incisos subsecuentes cada elemento metodológico.

1.2.- Planteamiento del problema.

El tiradero de la ciudad de Oaxaca actualmente constituye un importante problema ambiental, que refleja la problemática de los residuos sólidos a nivel mundial; los tiraderos en general representan un foco de contaminación del suelo y principalmente de las aguas subterráneas, dado a que allí se generan lixiviados con altos contenidos en metales pesados; los lixiviados en el tiradero de Oaxaca tienen un flujo superficial de aproximadamente 8 l/seg, afectando las propiedades químicas del suelo y de las rocas (Navarro et al., 2006). Estos lixiviados escurren a través de drenes naturales y una importante cantidad se infiltra en el subsuelo, acrecentando las posibilidades de contaminación del acuífero (Belmonte et al., 2006), y que aumentan principalmente debido a la infiltración de agua pluvial con contaminantes en el suelo (Soupios et al., 2007).

Las posibilidades de contaminación del acuífero en la zona del tiradero de la ciudad de Oaxaca son altas ya que de acuerdo a estudios realizados para evaluar su vulnerabilidad a la contaminación subterránea (Aragón et al., 2006), el factor de transito de infiltración en el tiradero se encuentra entre $0.172E^{-06}$ a $34.546E^{-06}$ l/seg., valor por encima de lo que establece la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, cuyo valor debe ser igual o menor a $3E^{-10}$ l/seg., lo cual no garantiza que los lixiviados lleguen sin carga contaminante de importancia al acuífero. El medio geológico está formado principalmente de rocas sedimentarias intensamente fracturadas. Además, la presencia de una falla geológica en la zona (Belmonte et al., 2005), evidencia la posibilidad de que se estén infiltrando los lixiviados, llevando a cabo la contaminación de las aguas subterráneas, lo cual representa

un riesgo para el acuífero y una vez que suceda esto, su restauración sería muy difícil y complicada.

Existen técnicas para explorar el subsuelo y determinar si los lixiviados están alcanzando la profundidad a la que se encuentra el acuífero, además de determinar su posible contaminación, siendo los métodos de prospección geofísica recomendables en el estudio de cualquier tiradero (Busquets y Casas, 1995; Mondelli et al., 2007), para detectar la existencia de plumas contaminantes y definir sus características (Soupios et al., 2007). Los métodos geofísicos tienen entre otras ventajas que su utilización es rápida y no destructiva, siendo más económicos que los métodos directos y proporcionan una visión global de la zona de estudio.

Algunos autores como Cossu et al. (2005) y Soupios et al. (2007) mencionan que los tiraderos a cielo abierto son favorables a las investigaciones geofísicas porque contienen generalmente materiales de desecho caracterizados por altas conductividades eléctricas; Karlik (2001) recomienda los métodos geofísicos electromagnéticos como los de bobinas electromagnéticas y VLF (Very Low Frequency), como herramientas viables para el mapeo de la contaminación subterránea, y con ello poder determinar la extensión de la pluma contaminante. Este estudio, al emplear técnicas geofísicas, contribuirá al conocimiento general de los lixiviados, si se están infiltrando a través de las fracturas existentes en la zona del tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca y si estos están contaminado el sistema acuífero.

1.3. Justificación de la investigación.

Los métodos geofísicos fueron seleccionados por ser económicos en comparación con métodos de perforación in situ, además por su aplicación que es de forma rápida y no destructiva, por lo que son amigables con el medio ambiente. También por estar acorde con el medio geológico fracturado y físico, que con otros métodos como por ejemplo el de resistividad, que se usa ampliamente para la detección de plumas contaminantes, no daría una respuesta adecuada debido a la presencia de capas de suelo alternadas con basura, la cual presenta en su composición con un alto porcentaje de plásticos, que dificultarían la obtención de datos.

La aplicación de estos métodos geofísicos y los resultados encontrados contribuirá a determinar zonas de suelo contaminadas, fracturas por donde puedan estar infiltrando los lixiviados que pudieran contaminar el acuífero; es decir, definir con cierta exactitud las características geométricas de la pluma contaminante. De tal manera que las autoridades correspondientes puedan tomar decisiones importantes como ubicar pozos de monitoreo, clausurar pozos de extracción de agua potable y lo más importante si es necesario reubicar o limitar el crecimiento de la mancha urbana hasta que las condiciones de contaminación sean las más adecuadas.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, este trabajo tiene un vínculo social muy importante con soluciones reales y prácticas que beneficiarán indirectamente a los pobladores de las colonias cercanas al tiradero de la ciudad de Oaxaca y al medio ambiente si se logra determinar que la contaminación de los lixiviados está alcanzando la profundidad del acuífero. Cabe mencionar que aunque la investigación no contribuye a construir una nueva teoría, tiene relevancia científica ya que los métodos geofísicos empleados tienen relativamente poco tiempo de usarse en cuestiones ambientales y cualquier aportación en la aplicación, identificación e interpretación de datos resulta relevante.

1.4.- Objetivo general y objetivos específicos.

Objetivo general

Evaluar la respuesta de los métodos geofísicos Very Low Frequency (VLF) y de bobinas electromagnéticas (EM) en un medio fracturado afectado por lixiviados, generados por el tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca, para la identificación de zonas fracturadas y contaminadas.

Objetivos específicos

- a).- Identificar zonas fracturadas a partir de métodos electromagnéticos (VLF y EM).
- b).- Correlacionar datos de los métodos electromagnéticos (VLF y EM) con la geología del lugar, para determinar los patrones preferenciales de fracturamiento de la base del tiradero.

c).-Obtener modelos geológico-geofísicos del área del tiradero, en los que se podrá observar la presencia de los lixiviados y su distribución espacial.

1.5. Hipótesis.

a).- Los métodos geofísicos electromagnéticos (VLF y EM) definirán la presencia de fracturas producidas por fallas geológicas por donde se infiltran lixiviados al subsuelo.

b).- La respuesta de los métodos VLF y EM será afectada por la presencia de estratos de suelo y basura depositadas sobre el tiradero, ocultando la información del subsuelo.

Capítulo 2. Marco teórico y conceptual.

2.1. Introducción

El campo de estudio donde se inserta este trabajo de investigación es el de la Geofísica, cuya aplicación se basa en los principios y prácticas de la física para la resolución de los problemas relacionados con la Tierra. Por otro lado tiene su base teórica en la prospección geofísica, principalmente en la de los métodos electromagnéticos: bobinas electromagnéticas y de VLF notando que este último utiliza frecuencias extremadamente bajas tal y como se aprecia en la figura 1. Los métodos mencionados se describen en incisos subsecuentes, al igual que algunos conceptos relevantes sobre estructuras geológicas que son importantes para visualizar el entorno donde se desarrolla el presente trabajo.

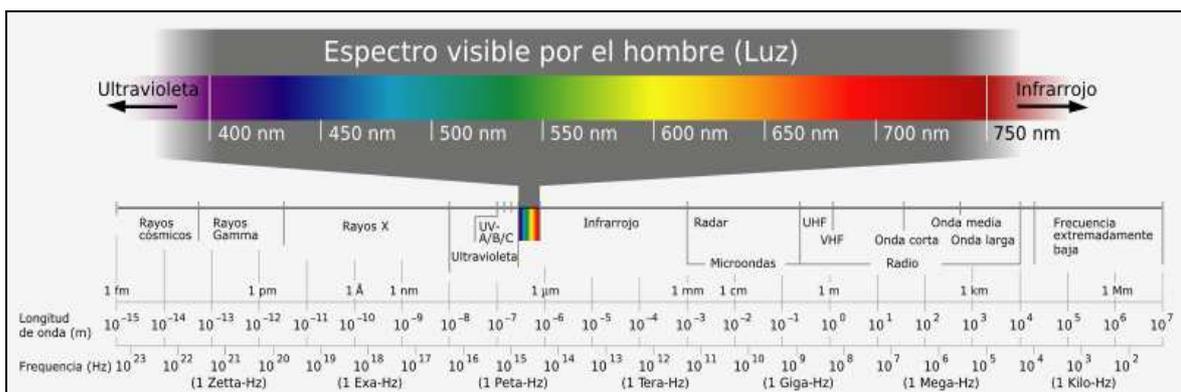


Figura 1.- Espectro de ondas electromagnéticas.

2.2. Teoría de prospección electromagnética

2.2.1. Generalidades del método

La prospección electromagnética mide la conductividad eléctrica aparente del subsuelo y se fundamenta en el hecho de que un campo electromagnético, figura 2 (Young, 2002) producido por una antena o bobina por la que pasa una corriente alterna, se propaga a través del subsuelo, induciendo otras corrientes alternas en cualquier conductor que se halle en su recorrido. Cuando esto ocurre, una fuerza electromotriz o un voltaje se genera dentro del conductor, según la Ley Faraday:

$$EMF_C = M_{TC} \frac{dI_T}{dt} \text{ ----- (1)}$$

De donde:

EMF_C = Fuerza electromotriz o voltaje en el conductor.

M_{TC} = Inductancia mutua entre el transmisor y el cuerpo conductor.

dI_T/dt = Derivada de la corriente(I_T) en el transmisor con respecto al tiempo.

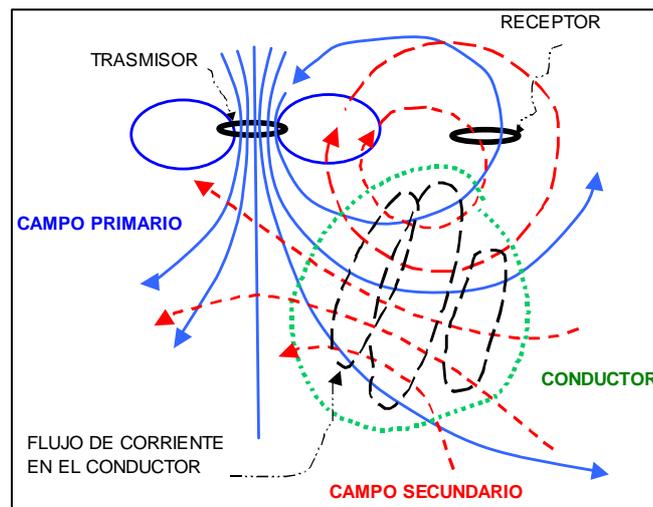


Figura 2.- Inducción electromagnética, producida por un transmisor y que se propaga a través del suelo induciendo corriente en cualquier conductor que se halle en su recorrido.

La corriente fluye en el conductor en respuesta a la fuerza electromotriz inducida. Estas corrientes atraviesan generalmente el conductor en los planos perpendiculares a las líneas del campo de la fuerza electromotriz del transmisor, a menos que sea restringido por la geometría de los conductores. El flujo actual dentro del conductor genera un campo secundario magnético formando líneas de fuerza. La bobina del receptor, en una cierta distancia de la bobina del transmisor es energizada por dos campos electromagnéticos: el del transmisor y el de las corrientes inducidas en la tierra.

De la ley de Faraday, la EMF inducida en el receptor se puede expresar como:

$$EMF_R = M_{RT} \frac{dI_T}{dt} + M_{RC} \frac{dI_C}{dt} \text{ ----- (2)}$$

De donde:

$EMF_R = EMF$ inducido en el receptor.

M_{RT} = Inductancia mutua entre el receptor (R) y el transmisor (T).

M_{RC} = Inductancia mutua entre el receptor (R) y el conductor (C).

dI_T/dt y dI_C/dt = Derivada de la corriente inducida en el conductor (C) o el transmisor (T) con respecto al tiempo.

I_T y I_C = corriente inducida en el conductor (C) o el transmisor (T)

Cabe señalar que las corrientes inducidas ocurren en las capas subsuperficiales (subsuelo) y que las magnitudes y distribución están en función de la frecuencia del transmisor, energía, geometría y de las propiedades eléctricas del subsuelo o conductor. La discusión se simplifica por que se asume la presencia de un solo conductor en un medio menos conductor.

El método electromagnético opera en el dominio de la frecuencia; el transmisor emite una corriente variable en forma sinusoidal en una frecuencia específica. La inductancia mutua entre el transmisor y el conductor es una cantidad compleja, la fuerza electromagnética inducida en el conductor estará en fase con respecto al campo primario. En el receptor, el campo secundario generado por las corrientes en el conductor también estará en fase por la misma cantidad. Existen tres formas de medida y descripción de los campos secundarios:

La primera es por medio de la amplitud y fase, la amplitud del campo secundario puede ser medida y se expresa generalmente como porcentaje. El desplazamiento de fase del campo recibido se mide por una fracción de tiempo.

La segunda forma consiste en separar electrónicamente el campo recibido en dos componentes: el primer componente está en fase con el campo transmitido mientras que el segundo componente está desfasado exactamente 90 grados con el campo transmitido. Al componente en fase a veces se llama componente real, y el componente desfasado se llama a veces de cuadratura o componente imaginario. Ambas medidas requieren alguna clase de acoplamiento de la fase entre el transmisor y el receptor estableciendo una referencia del tiempo o de la fase. Esto comúnmente se hace con un acoplamiento directo del alambre o a veces con un acoplamiento de radio, o sincronizando exactamente los relojes en el transmisor y receptor.

La tercera forma es por medio del sistema de ángulo inclinado, el dominio de la frecuencia de los sistemas electromagnéticos son ángulos inclinados cuando no tienen referencia de acoplamiento entre las bobinas del transmisor y receptor. El receptor mide simplemente el campo total independiente de la fase, y la bobina del receptor se inclina para encontrar la dirección máxima o mínima de la fuerza del campo magnético, en cualquier momento el campo magnético secundario puede estar en una dirección diferente del campo primario. Con los sistemas del ángulo inclinado, el objetivo es medir desviaciones de la normal de la dirección en campo e interpretar éstos en términos de conductores geológicos.

El parámetro de la respuesta de un conductor es definido por el producto de la conductividad por el espesor, de la permeabilidad (μ), de la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$), y del cuadrado de una cierta dimensión anómala en el objetivo (a^2). El parámetro de respuesta es una cantidad sin dimensiones. En las unidades de MKS, un mal conductor tendrá un parámetro de respuesta menor a 1, mientras que un buen conductor tendrá valores mayores a 1.

La interpretación de los sondeos electromagnéticos siguen pasos básicos, la mayor parte de los sistemas comunes de los EM tienen monogramas asociados. Los nomogramas son diagramas en los cuales los parámetros medidos se trazan variando la conductividad del modelo y unos o más factores geométricos, como profundidad, espesor, etc. Algunas consideraciones que se hacen en la mayoría de los métodos electromagnéticos es que consideran estratos homogéneos y capas horizontales. El primer paso es procurar determinar la forma de la anomalía y aproximar la causa de la misma. El segundo paso es medir las características de la anomalía por ejemplo amplitudes en fase y desfasadas, y trazar éstos a escala en los diagramas apropiados. De los diagramas y de la forma de la anomalía, se pueden hacer estimaciones generalmente para: calidad del conductor, profundidad, espesor, etc.

Una de las aplicaciones que puede tener este método electromagnético es el de caracterizar tiraderos a cielo abierto y conlleva a evaluar las condiciones hidrogeológicas locales, detectar y cartografiar la existencia de plumas contaminantes, y determinar las características de los residuos contenidos. Entre las ventajas de los métodos electromagnéticos en general están la excelente resolución en la conductividad, que no

tienen problemas de inyección de corriente, que se pueden hacer cálculos simples con varias capas de tierra, son de fácil uso y por ende de rápidas mediciones (Soupios et al., 2007).

2.2.2. Método de prospección con bobinas electromagnéticas

El método consta de dos bobinas, una emisora (Tx) y otra receptora (Rx) conectadas entre sí (figura 3). La bobina emisora emite ondas multifrecuencia; la bobina receptora mide las componentes de fase y cuadratura del campo magnético vertical a diferentes frecuencias y genera como respuesta el valor de la conductividad aparente en ese punto. Siendo la conductividad eléctrica (CE) la inversa de la resistividad (R), se puede aplicar la siguiente expresión:

$$CE(\mu S / cm) = \frac{10,000}{R(ohm - m)} \cdot \text{-----} (3)$$

La intensidad del campo secundario depende básicamente de la conductividad del subsuelo. Es decir si el medio es altamente conductivo, el campo magnético secundario tendrá una magnitud notable y si el medio es de baja conductividad, el campo magnético secundario o inducido será pequeño (Telford, 1990).

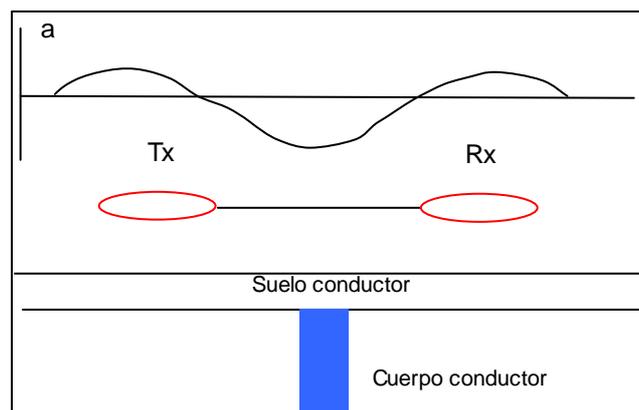


Figura 3.- Representación de las bobinas electromagnéticas conectadas entre sí.

Uno de los instrumentos más conocidos es el EM34 de Geonics, que opera con dos posiciones de las bobinas (vertical y horizontal) y distintas separaciones entre éstas de 10

(6400 Hz), 20 m (2600 Hz) y 40 m (600 Hz). Estas condiciones determinan una profundidad efectiva de exploración.

De acuerdo a la separación y a la posición de las bobinas la profundidad de exploración varía de la siguiente manera (tabla 1):

Tabla 1.- Profundidad de exploración de acuerdo a la separación de las bobinas.

SEPARACIÓN ENTRE BOBINAS (EN METROS)	FRECUENCIAS USADAS EN HZ	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN (EN METROS)	
		DIPOLO HORIZONTAL	DIPOLO VERTICAL
10	6400	7.5	15
20	2600	15	30
40	600	30	60

Fuente: Himi et al (2000).

Donde el alcance depende en gran medida de la distancia transmisor-receptor, por lo tanto, por cada transmisor-receptor de separación y para cada frecuencia, el instrumento cuenta con un circuito de compensación. (Pellerin et al., 2005), donde la conductividad eléctrica medida es un promedio ponderado de la distribución de la conductividad en el subsuelo.

Virtualmente toda la respuesta de la Tierra está en el componente de fase y de cuadratura de la señal recibida. Con estas consideraciones, el campo magnético secundario se puede representar como:

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \text{-----} \quad (4)$$

De donde:

H_s = Campo magnético secundario en la bobina del receptor.

H_p = Campo magnético primario en la bobina del receptor.

$\omega = 2 \pi f$.

f = Frecuencia en Hz.

μ_0 = Permeabilidad del espacio libre.

σ = Conductividad de Tierra en (Sm/m).

s = Espaciamiento del entre bobinas en m.

i = (-1)^{1/2} = Denota que es el campo secundario, 90 grados fuera de la fase con el campo primario.

El problema de cálculo teórico de la respuesta de un conductor frente a un campo electromagnético consiste en la resolución de las ecuaciones de Maxwell para determinadas condiciones de frontera. El hecho de tener una resolución compleja, los estudios se limitan a modelos sencillos. Así se ha determinado que en diferentes condiciones definidas técnicamente como una operación con un valor del número de inducción o producto entre la separación de las bobinas y la profundidad en que la amplitud del campo electromagnético decrece un factor igual a e⁻¹ muy bajo (<1), la relación entre el campo magnético secundario y el primario es una función lineal de la conductividad del terreno dada por Busquets y Casas, (1995):

$$\sigma_a = 4 \frac{H_s}{\mu_0 w s^2} \frac{H_p}{\dots} \quad (5)$$

De donde:

σ_a = Conductividad aparente del terreno.

H_p = Campo magnético en la bobina emisora

H_s = Campo magnético en la bobina receptora

$w = 2\pi f$

f = Frecuencia en Hz

μ_0 = Permeabilidad en el vacío.

s = Separación entre bobinas

$\frac{H_s}{H_p}$ = Cuadratura

La intensidad de las corrientes inducidas depende, entre otros factores, de la susceptibilidad de la masa magnética y de la frecuencia del campo primario. Generalmente la corriente es más intensa, cuando la resistividad, la susceptibilidad magnética y la

frecuencia son más grandes. La profundidad de penetración, en cambio, depende de la frecuencia del emisor y de la conductividad del terreno. Su valor es función de:

$$d = 500 \left(\frac{\rho_a}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \text{-----} \quad (6)$$

Los datos obtenidos a partir de los perfiles electromagnéticos son representados por medio de mapas de contorno de igual valor de conductividad aparente. Con ellos se pretende tener un modelo de cómo varía la conductividad con la profundidad, puesto que cada configuración y separación entre bobinas proporciona información de diferentes profundidades.

Algunas ventajas y limitaciones de este método específico son:

Ventajas:

La resolución lateral es excelente si se compara con las técnicas resistivas convencionales y trabaja de forma más rápida y más efectiva que éstas. Adquiere la misma profundidad de penetración con aperturas entre bobinas mucho menores que entre electrodos si se utilizan calicatas eléctricas.

Limitaciones:

El método es susceptible a diferentes fuentes de ruido no controlables como la existencia de una topografía pronunciada, los materiales altamente conductivos que componen el suelo, la existencia de lentes de arcilla no conocidos, etc. Las líneas de alta tensión también son una fuente de ruido muy importante, que impide la práctica del método. Tiene menos resolución para determinar las variaciones verticales de la resistividad que el Sondeo Eléctrico Vertical a causa de su número limitado de intervalos de profundidad.

2.2.3. Método de prospección con VLF

La técnica de VLF se basa en la aplicación de ondas electromagnéticas de radio de muy baja frecuencia entre 15-30 KHz que pueden ser detectadas a más de 10 km, y que son

utilizadas para la prospección geofísica de zonas fracturadas, agua subterránea, contaminantes y minerales (Jeng et al., 2004; Dutta et al., 2006; Drahor 2006; Ganerod et al., 2006; Zlotnicki et al., 2006; Kaya et al., 2007), determinando características eléctricas de los suelos y de rocas de baja profundidad (Hutchinson y Barta, 2002) donde existe un contraste en la conductividad eléctrica; y se ha utilizado ampliamente desde el decenio de 1960 y originalmente desde 1940, las poderosas estaciones de VLF transmiten señales que viajan alrededor del mundo a través de la ionosfera y la superficie terrestre, para comunicaciones marinas.

La existencia de fallas y fracturas en un medio hidrogeológico contribuye a mejorar la conductividad hidráulica y su porosidad, y actúan a su vez como estructuras de control del movimiento del agua subterránea (Sharma y Baranwal, 2005; Adepelumi et al., 2006). De esta manera pueden actuar como vías para el flujo de lixiviados, aumentando significativamente la conductividad eléctrica del subsuelo (Mondelli et al., 2007; Soupios et al., 2007). Esto a su vez ocasiona perturbaciones en las señales medidas con instrumentos VLF. La profundidad de penetración depende en gran medida de la conductividad del terreno, pero comúnmente esta no sobrepasa los 100 m (Oskooit y Pedersen, 2005). Los instrumentos VLF son muy ligeros y portátiles, y pueden ser utilizados para estudiar grandes zonas con bastante rapidez (Liu et al., 2006).

La señal que emana de las antenas alrededor del mundo y que pueden ser captada en campo por medio de instrumentos VLF y que según la teoría básica electromagnética a largas distancias de la fuente la longitud de onda se aproxima a una onda plana (Zlotnickia et al., 2006), y es una combinación de un campo primario (H_p) que al desplazarse en fase frente a un cuerpo conductor este se convierte entonces en la fuente de un campo secundario (Kaya et al., 2007). Es decir, las corrientes en el conductor son generadas cuando las ondas de radio (campo electromagnético) pasan a través de un conductor enterrado (por ejemplo una fractura), creando un campo electromagnético secundario (figura 4).

El vector suma del campo primario y el secundario producen un campo elíptico polarizado en el tiempo. Esta forma elíptica polarizada consta de dos componentes de la misma frecuencia, pero de diferente amplitud y fuera de fase entre sí.

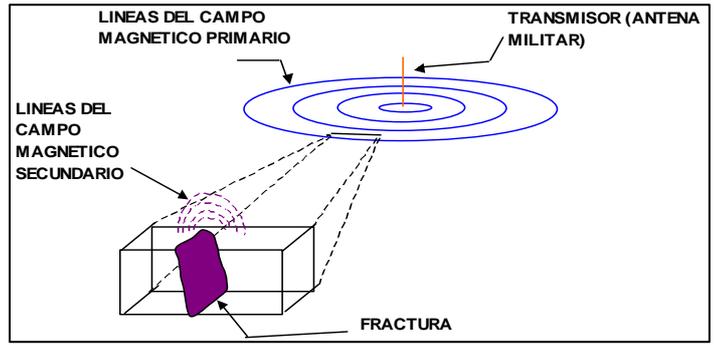


Figura 4.- Campos electromagnéticos generados por ondas de radio.

La amplitud de la componente que se encuentra en fase con el campo primario (H_p) es el componente real o en fase, mientras que el componente que está fuera de fase con el campo primario es el componente imaginario o componente de cuadratura (Eze et al., 2004).

La ecuación de campo electromagnético apreciable desde la zona conductiva es la ecuación de Maxwell:

$$\nabla^2 \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = i\sigma\mu\omega \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} \text{-----} (7)$$

Donde E es el campo eléctrico, H el campo magnético, σ la conductividad (S / m), μ la permeabilidad (H/m) y ω la frecuencia angular. Desde que se considera la posibilidad de alternancia de los campos se asume una solución periódica de la forma:

$$H_y(x,t) = H_0 e^{i\omega t} e^{-yz} \text{-----} (8)$$

De los que:

$$H_y = \left\{ H_0 \exp i\left(\omega t - \frac{\sigma\mu\omega}{2} Z\right) \right\} X \exp\left(-\frac{\sigma\mu\omega}{2}\right)^{\frac{1}{2}} Z \text{-----} (9)$$

El último factor exponencial de la ecuación (9) indica un termino decauyente. Siendo el inverso de este factor la profundidad de penetración δ definida por:

$$\delta = \left(\frac{1}{\pi f \mu \sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \text{-----} (10)$$

Donde $\omega = 2 \pi f$ (f frecuencia lineal en Hz).

Por otro lado, tanto la inclinación de ángulo (θ) y la elipticidad (e) se calculan utilizando las fórmulas propuestas por Smith y Ward (1974) mencionados por Sharma y Baranwal (2005); Duta et al. (2006) y se expresan como:

$$\tan 2\theta = \pm \frac{2(H_z / H_x) \cos \Delta\phi}{1 - (H_z / H_x)^2} \text{ ----- (11)}$$

$$y \ e = \frac{H_z H_x \text{sen} \Delta\phi}{H_i^2} \text{ ----- (12)}$$

De donde θ es el ángulo de inclinación, e es la elipticidad, H_z y H_x son las amplitudes, la diferencia de fase $\Delta\phi = \phi_z - \phi_x$, en la que ϕ_z es la fase del H_z y ϕ_x es la fase de H_x y $H_1 = |H_z e^{i\Delta\phi} \text{sen} \theta + H_x \cos \theta|$. La tangente del ángulo de inclinación es una buena aproximación del cociente del componente verdadero del campo magnético secundario vertical al campo magnético primario horizontal. La elipticidad es una aproximación del cociente del componente de cuadratura del campo magnético secundario vertical al campo primario horizontal. Estas cantidades se llaman anomalías verdaderas ($= \tan \alpha \times 100\%$) e imaginarias, respectivamente y ellas se expresan normalmente como porcentaje ($= ex100\%$).

$$\text{En forma simplificada: } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta H}{H} \text{sen } \alpha \cos \phi \right) \text{ ----- (13)}$$

Donde H es el campo primario, ΔH es el campo secundario, ϕ es el cambio de fase del campo secundario al primario. Donde ΔH se encuentra inclinado en ángulo α hacia arriba del plano H debido al acoplamiento entre el transmisor y la estructura del subsuelo. Se define a $\Delta H \text{sen } \alpha = \Delta H_y$ (componente vertical), entonces la ecuación (13) se convierte en:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta H_y}{H} \cos \phi \right) \text{ ----- (14)}$$

Donde $\Delta H_y \cos \phi =$ componente real o en fase del campo secundario.

La tangente del ángulo de inclinación es casi proporcional al componente real del campo secundario, que se mide en dirección vertical. Para un pequeño ángulo la tangente del ángulo de inclinación es el ángulo en si, es decir:

$$\theta \approx \frac{\Delta H}{H} \cos \phi \text{ (componente real) ----- (15)}$$

El ángulo de inclinación es proporcional a la fase (real) de la componente vertical del campo secundario. Por lo tanto, la medición del ángulo de inclinación es muy similar a la medición de la componente real (en fase) del campo secundario en dirección vertical.

Por otro lado en cuanto al análisis de VLF, los datos se pueden mejorar mediante la aplicación de procedimientos de filtrado. La aplicación de un filtrado es fundamental para obtener una fácil correlación entre la anomalía y la estructura. El filtro está diseñado para la supresión del ruido de los datos. El Filtrado Fraser así como el de Karous y Hjelt son dos métodos ampliamente empleados en el procesamiento de datos de VLF mediante la generación de las densidades de corriente equivalente (Karous y Hjelt 1983).

El filtro Fraser es una función pasabajas de suavizado de los datos del ángulo inclinado, y cuyos cruces son convertidos en picos para facilidad del análisis. El filtrado consiste en hacer un promedio de la medida de ángulo inclinado producida por un conductor del subsuelo. En una secuencia lineal de los datos $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ del ángulo inclinado medido en un intervalo regular, el filtro F_1 de Fraser es:

$$F_1 = (M_3 + M_4) - (M_1 - M_2) \text{ ----- (16)}$$

El primer valor F_1 se traza entre las posiciones M_2 y M_3 ; el segundo valor se traza entre M_3 y M_4 . Teniendo el filtrado bastante aceptación en la comunidad geofísica (Adepelumi et al., 2005; Cossu et al., 2005; Liu et al., 2006; Santos et al., 2006; Zlotnicki et al., 2006).

El filtrado de la densidad de corriente en muchos instrumentos puede calcular la densidad de la corriente a partir de la medición de la medida de la magnitud del campo magnético. Karous y Hjelt (1983) desarrollaron un filtro lineal estadístico, basado en Fraser. Este filtro

proporciona un perfil de la densidad de corriente con la profundidad (H0) que se deriva de la magnitud del componente vertical del campo magnético en una localización específica.

Karous y Hjelt suponen conductores alargados en la dirección perpendicular a la línea de estudio, determinando la densidad de corriente producida por un campo magnético, por lo que consiste en corrientes inducidas en los mismos conductores y en corrientes concentradas en los conductores circundantes de menor conductividad. El problema de la densidad de corriente se resuelve por medio de la teoría del filtrado lineal. En el caso de dos dimensiones las corrientes inducidas son líneas perpendiculares a la línea de estudio, de donde la componente vertical del campo magnético causado por la densidad de corriente se deduce de la Ley de Biot-Salvart:

$$H_z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \zeta) \cdot (x - \xi) \cdot d\zeta / [(x - \zeta)^2 + \zeta^2] \quad \text{----- (17) Integral de}$$

convolución, que puede simplificarse asumiendo que la densidad de corriente es limitada en una franja alargada de ancho Δz de profundidad $\zeta = z$. Con:

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \zeta) d\zeta = I_a(\zeta) = I_a(\xi) \cdot \Delta z \quad \text{----- (18)}$$

Tenemos:

$$H_z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_a(\xi) \cdot \Delta z \cdot (x - \xi) \cdot d\xi / [(x - \xi)^2 + z^2] \quad \text{----- (19)}$$

Como se dispone de datos de campo sólo en puntos discretos, la integral de inversión no es más que una distribución discreta de las corrientes. Los datos $H_{zm}(x)$ se encuentran disponibles en puntos igualmente equidistantes con intervalo de Δx . La distribución de la corriente se calcula en los puntos situados a una profundidad $z = \Delta x$. Entonces:

$$H_{zm}(x_i) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_a(\xi_j) \Delta z \cdot \Delta x \cdot (x_i - \xi_j) / [(x_i - \xi_j)^2 + \Delta x^2] \quad \text{----- (20)}$$

$$\begin{aligned} x_i &= i \cdot \Delta x \\ \xi_j &= (j + j_0) \cdot \Delta x \\ 0 &\leq j_0 < 1 \end{aligned}$$

Escribiendo:

$$H_i = \frac{2\pi}{\Delta z} \cdot H_{zm}(x_i) \text{----- (21)}$$

y

$$I_a(\xi_j) = I_j$$

Tenemos:

$$H_i = \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_j \cdot K_{ij} \text{----- (22)}$$

Con

$$K_{ij} = \frac{i - j - j_o}{(i - j - j_o)^2 + 1} \text{----- (23)}$$

El filtro inverso ideal equivalente a encontrar una solución de (22). El número de coeficientes del filtro es teóricamente infinito, pero en la práctica debe limitarse a un número finito. Por lo tanto:

$$H_i = \sum_{j=-n}^n I_j \cdot K_{ij} \text{----- (24)}$$

Y

$$I_j = \sum_{i=-n}^{n+1} K_{i0}^{-1} \cdot H_{i+j} \text{----- (25)}$$

Los experimentos desarrollados por Karous y Hjelt los llevaron a cabo con un número finito de coeficientes del filtro (Karous y Hjelt 1983). Los resultados mostraron que el siguiente filtro funciona bien en la práctica:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} \cdot I_a(\Delta x/2) = -0.205H_{-2} + 0.323H_{-1} - 1.446H_0 + 1.446H_1 - 0.323H_2 + 0.205H_3 \text{--- (26)}$$

Por lo que la profundidad se puede calcular de:

$$I_a(0) = \frac{2\pi(-0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3)}{z} \text{--- (27)}$$

Donde la intensidad de corriente equivalente I_a en una posición horizontal y una profundidad z específica se basa en un filtro simétrico de la corriente medida (del componente magnético medido del campo anómalo).

Ventajas del método:

Las ventajas del VLF son que es un método no destructivo, no invasivo, de bajo consumo energético y es extremadamente amigable con el medio ambiente, es rentable, y proporciona mediciones rápidas, en particular en lugares donde otros métodos geofísicos son inadecuados. Debido a su ligereza, el fácil funcionamiento del instrumento y bajos costos de operación, este método EM es altamente productivo y adecuado para un rápido estudio preliminar de estructuras geológicas en terrenos o zonas cubiertas, así como en terrenos accidentados (Jeng et al., 2004).

Desventajas del método:

Un gran inconveniente con este método es que la adquisición de datos VLF es totalmente dependiente de un transmisor con cobertura en el área estudiada. Los transmisores de vez en cuando se apagan (Ganerod et al., 2006).

Otras limitaciones de los sondeos VLF son la sensibilidad al ruido a los metales ferrosos y no ferrosos, un solo punto de asignación de datos, y relativamente poca profundidad de investigación probablemente no más de 100 metros, pero aún dentro del umbral de penetración de las investigaciones ambientales (Soupios et al., 2007).

2.3. Aspectos geológicos

Se explican brevemente algunos conceptos de indicadores estructurales que se encuentran en el área estudiada.

2.3.1. Estratigrafía

La estratigrafía es el estudio de las rocas formadas por varias capas o estratos (figura 5). Estudia la disposición y caracteres de los depósitos sedimentarios y rocas asociadas que

constituyen la corteza terrestre, así como los cambios que puedan presentar por efectos geotectónicos. Analiza su morfología, distribución, relaciones existentes con las unidades estratigráficas circundantes, la litología característica de cada una, y sus propiedades físicas y químicas; con el fin último de conseguir la distribución espacial y temporal, u orden de la sucesión que presentan los depósitos terrestres (divididos en periodos geológicos), las condiciones en las que se han formado y las variaciones que han sufrido consecuencia de los movimientos de la corteza terrestre.

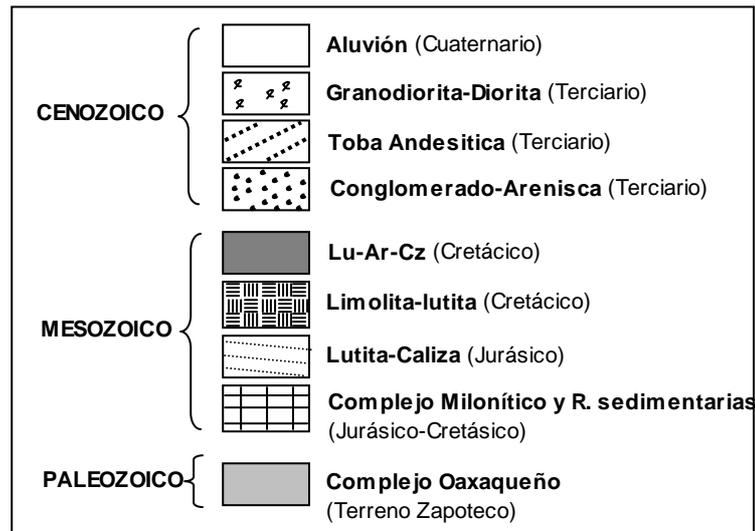


Figura 5.- Corte estratigráfico característico de la zona donde se localiza el tiradero de la ciudad de Oaxaca.

Todas estas características sirven para reconocer y reconstruir secuencialmente eventos geológicos tales como el avance o retiro del mar, plegamientos o las extinciones ocurridas a determinados organismos en el transcurso del tiempo geológico. Las unidades estratigráficas son cuerpos rocosos de la corteza terrestre individualizados y descritos dentro de los estudios geológicos relativos a regiones diversas.

2.3.2. Rumbo y echado

Sobre una superficie inclinada hay una direcci3n en la cual se puede dibujar una l3nea horizontal llamada el rumbo y que puede medirse sobre las capas expuestas; esta medici3n, que es su orientaci3n, puede hacerse con una brújula. Perpendicular al rumbo se encuentra la direcci3n de la máxima pendiente, denominada el echado (figura 6). El ángulo de inclinaci3n representado por una l3nea trazada en el estrato en la direcci3n en la direcci3n del echado forma un ángulo con la horizontal que es el ángulo de echado.

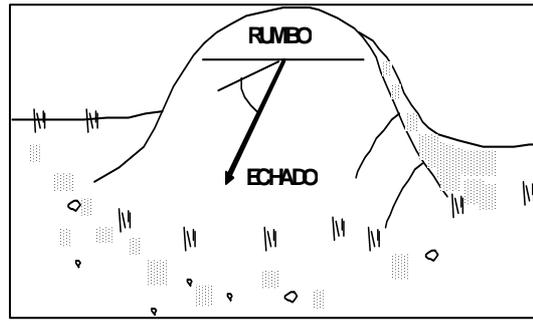


Figura 6.- Rumbo y echado. Estratos inclinados de un afloramiento en el terreno. Se muestra ángulo de echado.

El rumbo y echado son los dos conceptos fundamentales en la geología estructural, que es un método de la geología para definir la actitud de los estratos inclinados. La información se pasa a un mapa mediante una flecha corta (flecha de echado) con su extremidad en el punto de observación con un número que indica el ángulo del echado. Para capas horizontales se utiliza el símbolo +, es decir, donde el echado es cero.

2.3.3. Pliegues

Deformación de las rocas, generalmente sedimentarias, en la que elementos de carácter horizontal, como los estratos o los planos de esquistosidad (en el caso de rocas metamórficas), quedan curvados formando ondulaciones alargadas y más o menos paralelas entre sí.

Los pliegues se originan por esfuerzos de compresión sobre las rocas que no llegan a romperlas; en cambio, cuando sí lo hacen, se forman las llamadas fallas. Por lo general se ubican en los bordes de las placas tectónicas y obedecen a dos tipos de fuerzas: laterales, originadas por la propia interacción de las placas (convergencia), y verticales, como resultado del levantamiento debido al fenómeno de subducción a lo largo de una zona de subducción más o menos amplia y alargada, en la que se levantan las cordilleras o relieves de plegamiento.

Los pliegues se pueden clasificar atendiendo a su forma (figura 7) en:

Anticlinales: Los estratos más antiguos se encuentran hacia el núcleo. El pliegue es convexo hacia arriba siempre que no se haya invertido su posición por causas tectónicas.

Sinclinales: los estratos son más jóvenes cuanto más hacia el núcleo. El pliegue es cóncavo hacia arriba siempre que no se haya invertido su posición por causas tectónicas.

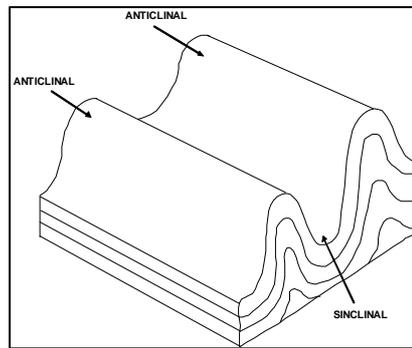


Figura 7. - Forma de los pliegues anticlinales y sinclinales

2.3.4. Fracturas.

Una fractura o también llamada *litoclasa*, es una grieta del terreno producida por fuerzas tectónicas. Muchas fracturas o comúnmente llamadas como medio fracturado, se deben a que el terreno carecía de la necesaria flexibilidad para plegarse al ser sometido a empujes laterales. En las *fracturas simples* o diaclasas, los dos bordes conservan, uno frente a otro, sus posiciones respectivas. Por el contrario, en las *fallas* o *paraclasas*, uno de los lados se hunde o se eleva verticalmente respecto al otro.

La formación de las diaclasas obedece a muy diversas causas, incluyendo fuerzas dirigidas como las que provocan el fallamiento o plegamiento del terreno. Una de las causas más frecuentes de diaclasamiento es el aumento de densidad del material, que a su vez se puede producir por distintos motivos: deshidratación, como ocurre en sedimentos que quedan al aire después de haber estado sumergidos. Enfriamiento, que es el caso de las coladas basálticas, las cuales, una vez solidificada la lava, por el posterior enfriamiento, se dividen en columnas prismáticas. Recristalización, en la que el paso del tiempo favorece, en los materiales geológicos, un reordenamiento de las moléculas que en conjunto amplía la extensión de las redes cristalinas, aumentando la densidad del material, lo que se compensa, como en los casos anteriores, con la formación de grietas.

Las *fallas* o *paraclasas* se clasifican en tres tipos en función de los esfuerzos que las originan y de los movimientos relativos de los bloques:

Falla normal. Este tipo de fallas se generan por tensión horizontal. El movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal (figura 8). El bloque que se desliza hacia abajo se le denomina bloque de piso, mientras que al que se levanta se llama bloque de techo.

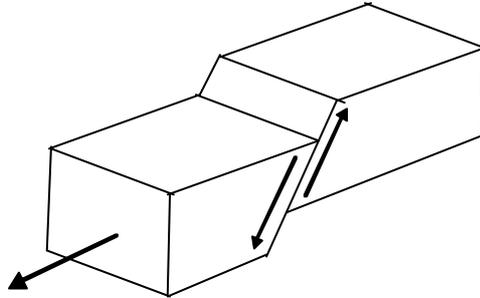


Figura 8.- Falla normal

Falla inversa. Este tipo de fallas se genera por compresión horizontal. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal. El bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso (figura 9). Cuando las fallas inversas presentan un echado inferior a 45°, estas pasan a tomar el nombre de cabalgamiento.

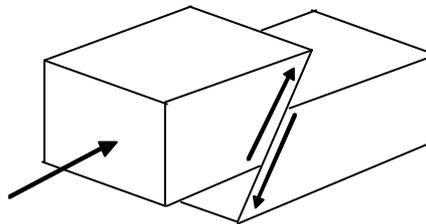


Figura 9.- Falla inversa.

Falla transversales. Estas fallas son verticales y el movimiento de los bloques es horizontal (figura 10). Estas fallas son típicas de límites transformantes de placas tectónicas. Se distinguen dos tipos de fallas de transversales: derechas e izquierdas.

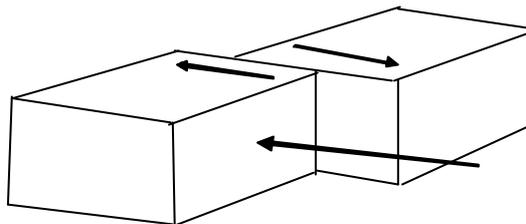


Figura 10.- Falla transversal.

Capítulo 3. Descripción del área de estudio.

3.1. Introducción.

En este capítulo se presenta información básica relacionada con el área de estudio, como su localización y situación actual, así como una descripción de la geología y la hidrogeología de la zona, donde se encuentra el tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca.

3.2.- Localización.

El tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca se ubica al sureste de la ciudad capital del Estado de Oaxaca, aproximadamente a 15 km por la carretera Oaxaca-Puerto Ángel (figura 11), en el Distrito de Zaachila, en las coordenadas UTM de 1872769 N, 746046 W referenciadas a la entrada principal y a una altura promedio de 1640 m.s.n.m.

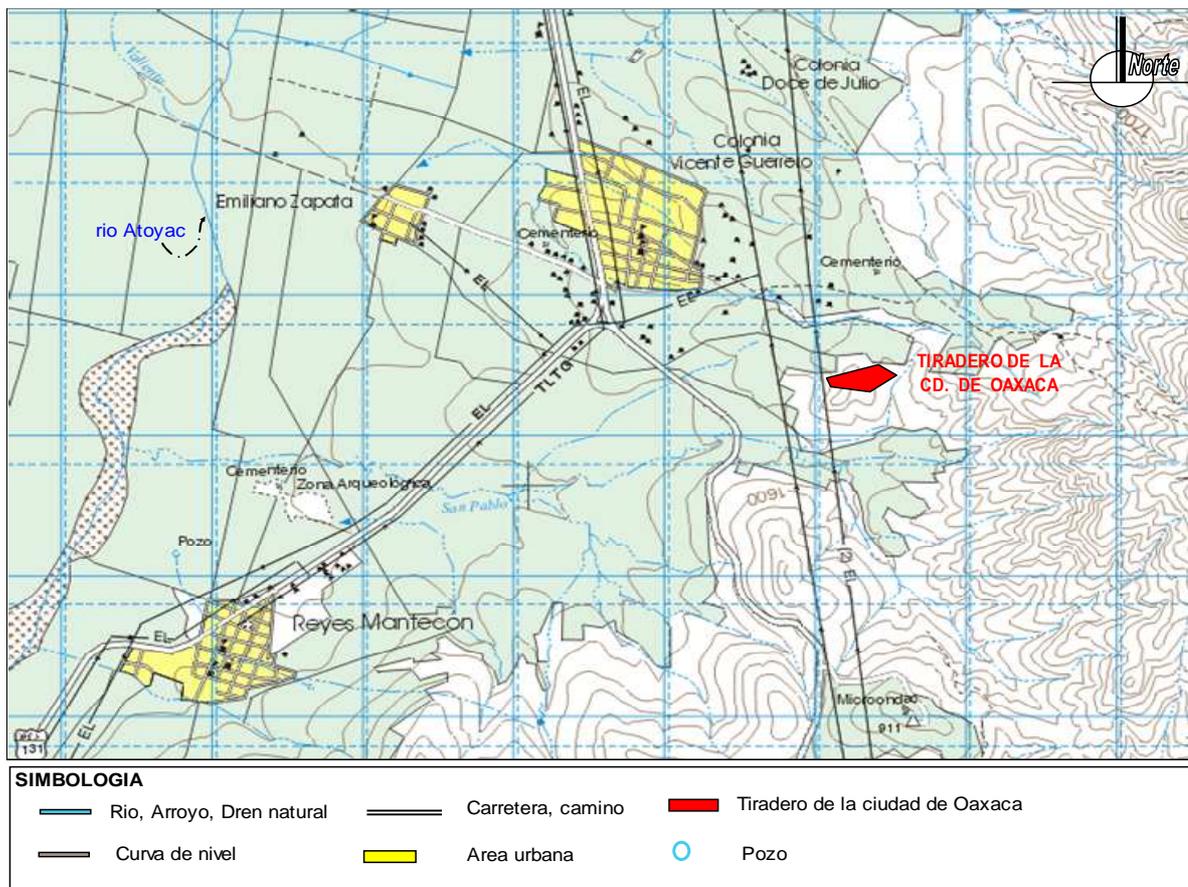


Figura 11. Plano de ubicación del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

3.3. Situación actual del tiradero

El tiradero ha operado por más de 24 años como un depósito de basura a cielo abierto (Figura 12), cuenta con una caseta de vigilancia y una planta procesadora abandonada, recibe, en un área de aproximadamente 16 Ha. aproximadamente 800 Ton/día de residuos sólidos e inclusive peligrosos como los hospitalarios y pilas en desuso por mencionar algunos; recibe desperdicios tanto de la capital del estado de Oaxaca como de sus municipios conurbados.



Figura 12.- Perspectiva de febrero de 2008, del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

Esto ha dado origen a que el medio ambiente de este lugar se degrade. Existiendo por consecuencia contaminación visual, a las aguas superficiales (Figura 13) y subterráneas (Figura 14), al suelo y a la atmósfera, formando lugares propicios para el contagio de enfermedades y para el refugio de fauna nociva. Estudios realizados por Aragon et al. (2006), demuestran que la vulnerabilidad a la contaminación por lixiviados en general es baja en la parte norte, siendo media en la parte sureste con una zona puntual de vulnerabilidad alta, tal como se aprecia en la figura 15; en donde las diferentes tonalidades indican los grados de vulnerabilidad detectados, siendo el color verde baja, el amarillo media y rojo alta vulnerabilidad.



Figura 13.- Contaminación de las aguas superficiales, captación de agua y lixiviados en una laguna que se localiza al suroeste del tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca.

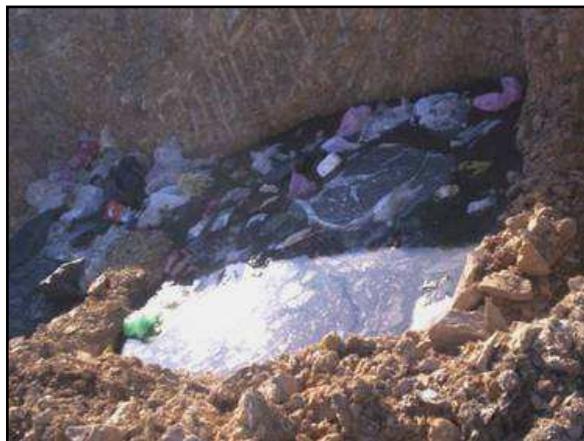


Figura 14.- Contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de lixiviados

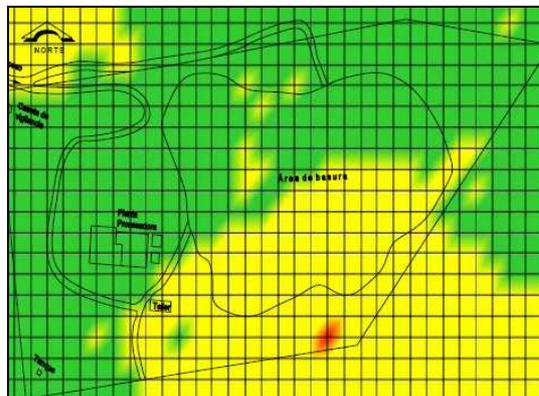


Figura 15.- Vulnerabilidad del tiradero de la ciudad de Oaxaca (según Aragon, et al., 2002).

Este problema se agrava si consideramos que los asentamientos humanos son cada vez más extensos, que incluso las viviendas ya se encuentran en las periferias del basurero (Figura 16), trayendo consigo riesgos a la salud, tanto de los habitantes de las colonias aledañas como de los pepenadores que existen en el lugar, e igualmente de las personas y niños que

cruzan el basurero como vía de acceso. Y si además agregamos a esto que los servicios son casi nulos y que el agua potable es escasa, el panorama de estas colonias es crítico.

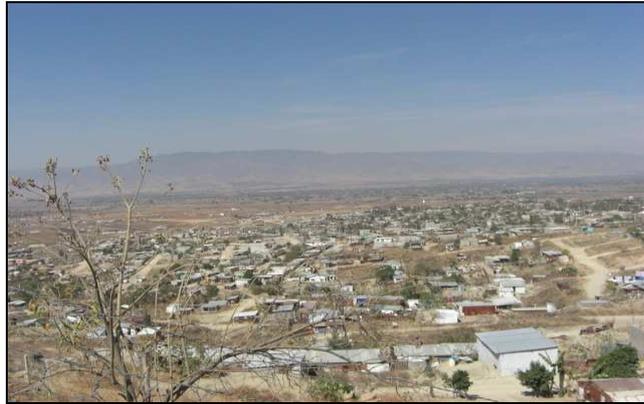


Figura 16.- Crecimiento de la mancha urbana en febrero de 2008, en las periferias del lado oeste del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

Aunque actualmente se está realizando el saneamiento del tiradero municipal; mediante un sistema de captación y extracción de lixiviados integrado por una laguna de lixiviados en forma de pirámide truncada (figura 17), drenes de conducción y de un sistema para la reinyección, con los que se minimizará el flujo de lixiviados y por consecuencia la infiltración al subsuelo; sin embargo, el daño ya está hecho y hay que considerar que los lixiviados llegan a más de 4 km de distancia, por lo que el trabajo de saneamiento es apenas el principio para remediar los impactos ambientales que este basurero ha ocasionado.



Figura 17.- Laguna de lixiviados construida expresamente para el saneamiento del tiradero.

Considerando que ya se han realizado estudios geofísicos en el tiradero de residuos sólidos de Oaxaca y que una empresa de la iniciativa privada está llevando a cabo trabajos de

saneamiento de manera puntual del saneamiento, en particular la conformación y sello de la superficie del actual tiradero, captación y acondicionamiento de los lixiviados, manejo de los escurrimientos superficiales y control de la generación del biogás (Garrido et al., 2006), existe aun la posibilidad de que las aguas subterráneas se estén contaminando; por lo que este trabajo trata de ser una contribución a la investigación iniciada hace más de 5 años, extendiendo así el área investigada, es decir estudiando nuevas zonas que pudieran estar afectadas por los lixiviados, ya que de los resultados obtenidos pueden tomarse medidas preventivas o correctivas por parte de las autoridades involucradas.

3.4. Contexto geológico.

De acuerdo a la carta geológica de Zaachila E14-12 del INEGI, el tiradero de basura se encuentra en una estratigrafía correspondiente al cretácico superior en el cual ocurrió depositación marina compuesta por rocas sedimentarias como lutitas y areniscas (Figura 18).

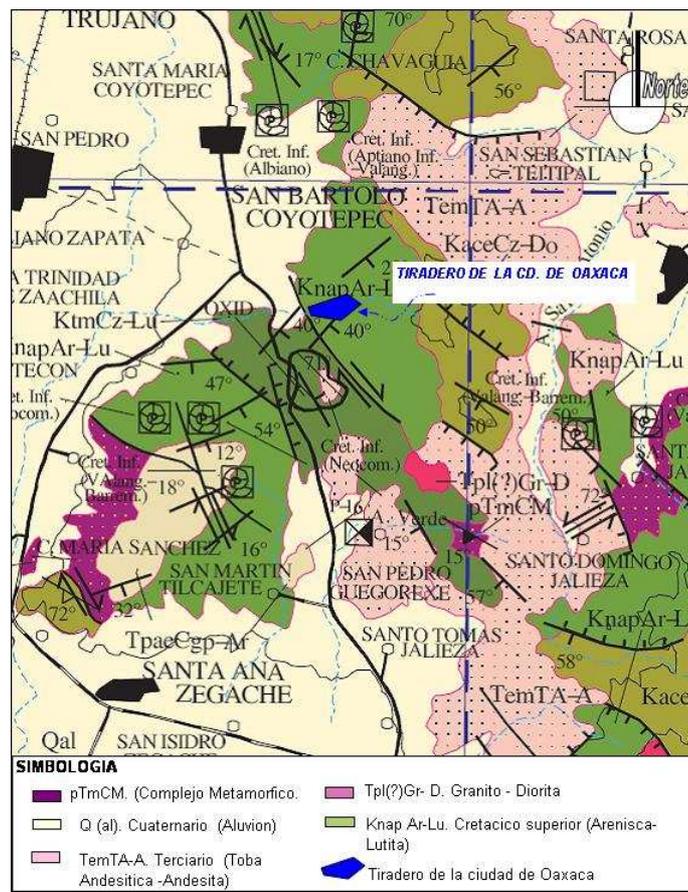


Figura 18.- Geología de la zona de estudio.

Dicha carta refiere la existencia de una unidad geológica de arenisca- lutita compuesta en una secuencia rítmica (figura 19) depositada en un medio marino de aguas someras. Presenta estratos de cinco a cuarenta centímetros de espesor con echados que van de 28 a 40° con textura péltica y samítica. Las areniscas son de color gris claro con tonos pardo claro y amarillo ocre; con granos subangulosos a subredondeados, constituidos por cuarzo, feldespatos, líticos y micas, matriz arcillosa y cementante calcáreo. Las lutitas contienen fósiles y son de color rojizo. La secuencia presenta pliegues isópacos, simétricos y apretados así como fallas normales; la unidad subyace localmente a un derrame basáltico-andesítico con contenido de cuarzo blanco.



Figura 19.- Secuencia rítmica de lutita y arenisca

3.5. Contexto hidrogeológico.

El sitio del tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca se encuentra en la región hidrológica RH-20 denominada Costa Chica- Río Verde, en la cuenca del río Atoyac y en la subcuenca del río Atoyac – Oaxaca de Juárez. En este lugar los escurrimientos presentan un coeficiente de 10 a 20 % que son favorecidos por la topografía de la zona. La red de drenaje está conformada por un sistema de cauces por los que fluyen los escurrimientos superficiales (Figura 20), básicamente son de tipo intermitente y efímero y cuya ramificación es de forma contorneada. En este sistema, el basurero juega un papel importante, pues los lixiviados que ahí se generan circulan de manera permanente por el drenaje superficial.

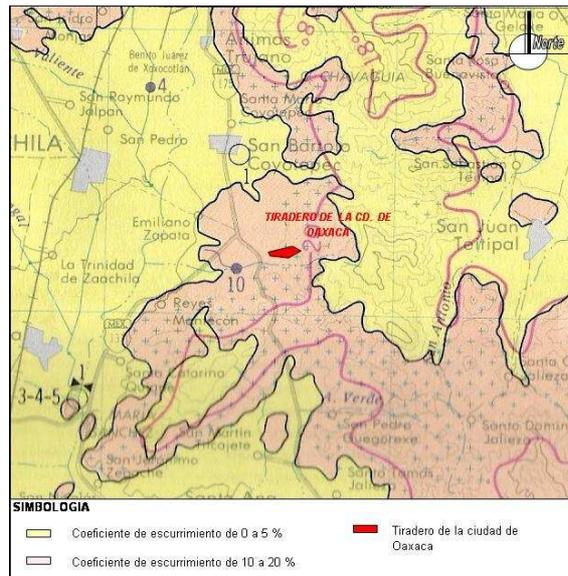


Figura 20.- Escurrimientos superficiales en la zona del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

La densidad de pozos en la zona es baja y la dirección preferencial del flujo subterráneo es hacia el suroeste, de acuerdo a la interpretación geofísica efectuada por Belmonte (2004). Teniéndose en el lugar material consolidado con posibilidades bajas de que exista agua subterránea, de acuerdo al mapa de unidades hidrogeológicas del INEGI (figura 21), sin embargo debido al intenso fracturamiento por el tectonismo de la región pacífica del continente, se ha provocado cierta permeabilidad en la zona, que pudiera ser de interés hídrico.

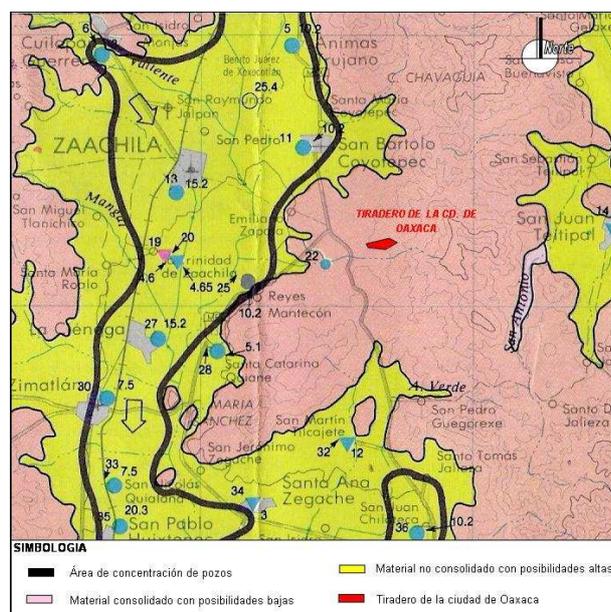


Figura 21.- Unidades hidrogeológicas en la zona del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

Capítulo 4. Materiales y métodos.

4.1. Introducción.

Una de las actividades primarias a desarrollar en una investigación es la de reunir la información pertinente al problema de investigación, bajo una secuencia completa para asegurar que los datos tomados sean los apropiados, de tal modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido de tal suerte que permitan llegar a los resultados esperados, bajo esta premisa; en esta investigación se llevaron a cabo una serie de actividades (tabla 2) para la obtención de datos de calidad que permitieran estudiar la influencia de los lixiviados producidos por el tiradero de la ciudad de Oaxaca y que constituyen un importante problema ambiental, empleándose para ello métodos geofísicos.

Tabla 2.- Listado de actividades realizadas para el desarrollo de la presente investigación

FASE	DESCRIPCIÓN
Preliminares	a) Delimitación de la unidad de análisis.
	b) Variables involucradas.
	c) Selección de los métodos geofísicos.
Diseño experimental	d) Localización del área de estudio.
	e) Ubicación de sitios particulares.
	f) Medición por medio de métodos geofísicos seleccionados.
	g) Levantamiento geológico.
	h) Posicionamiento de puntos con GPS postproceso.
	I) Instrumentación utilizada.
	j) Descripción de análisis y procesamiento e interpretación de resultados.

4.2. Metodología.

A continuación se describen cada una de las actividades mencionadas en la tabla anterior.

4.2.1. Delimitación de la unidad de análisis.

La unidad de análisis es el tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca, ubicado en el Municipio de Zaachila, Oaxaca y que cuenta con aproximadamente 16 Ha.

4.2.2. Variables involucradas.

Se consideraron como variables a controlar la conductividad eléctrica medida en mS/m (miliSiemens por metro) como variable independiente y como variables que la afectan directamente se encuentran la textura del subsuelo, su contenido de porosidad (%), composición mineralógica (%), tipo de roca (lutita, andesita, etc) y edad de la roca (años) entre otros. Que Aunque no se puede conocer la contribución de cada una de ellas, lo importante es saber que la conductividad depende de estos factores, especialmente de la porosidad y la permeabilidad.

4.2.3. Selección de los métodos geofísicos.

Con lo que respecta a las exploraciones geofísicas se emplearon dos métodos electromagnéticos, a saber el de Bobinas electromagnéticas y el VLF (Very Low Frequency) que fueron seleccionados porque, de acuerdo a la literatura, son las mejores opciones para exploraciones geofísicas detalladas en la caracterización de zonas de eliminación de desechos ubicadas en medios fracturados, debido a que el contenido de sales disueltas más metales pesados está directamente relacionado con la conductividad; además, de ser métodos económicos, no invasivos y amigables con el medio ambiente.

4.2.4. Localización del área de estudio.

Se localizó en mapas e imágenes, el área bajo estudio, extrayéndose las partes correspondientes a la del tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca y plasmándose en forma de figuras.

4.2.5. Ubicación de sitios particulares.

Las mediciones se llevaron a cabo en su mayoría principalmente en la parte sur del basurero, debido a los patrones visibles de escurrimientos preferenciales que existen en el lugar y al visible escurrimiento de lixiviados, levantándose los perfiles en forma perpendicular a estos; otro factor importante considerado para la selección del sitio es que esta parte presenta vulnerabilidad alta a la contaminación (Aragón et al., 2006). Por otro lado se efectuaron en menor cantidad sondeos electromagnéticos de bobinas y VLF en la parte central, norte y oeste del tiradero con la finalidad de contrastar la respuesta obtenida.

4.2.6. Medición por medio de métodos geofísicos seleccionados.

Se realizaron mediciones en agosto de 2007 y febrero de 2008; efectuándose 4 perfiles con las dos técnicas geofísicas en el primer periodo mencionado, 3 de ellos en el sur y un perfil en el lado norte. los cuatro con dirección E-W siendo estos comunes para ambos métodos (bobinas electromagnéticas y VLF). Las mediciones realizadas se hicieron con estaciones a cada 5 m, elegidas sobre la base de los objetivos de la investigación y los detalles necesarios para la caracterización de los lixiviados, con longitudes de 325m, 320m, 300m y 645 m respectivamente. Para el segundo periodo mencionado se levantaron datos con VLF sobre los mismos 4 perfiles y se incluyeron dos más, los perfiles 5 y 6 (figura 22), uno en la parte central del tiradero con dirección E-W y otro en la parte oeste con dirección N-S con longitudes de 275 y 415 m respectivamente.

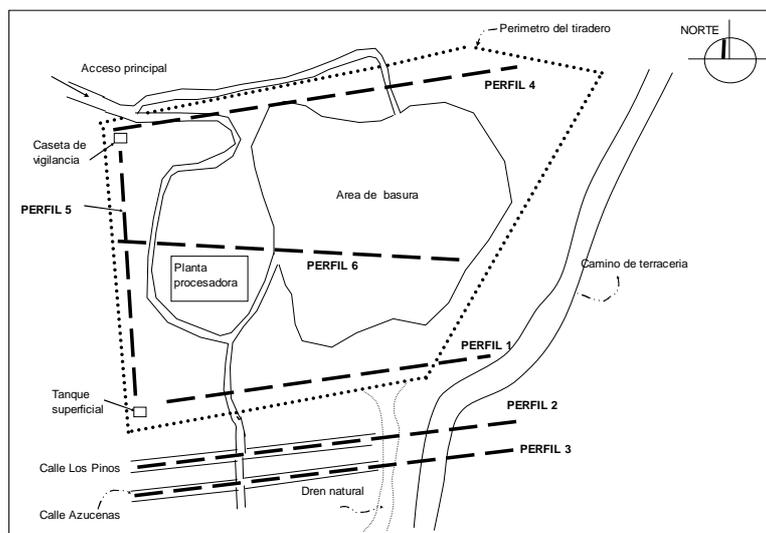
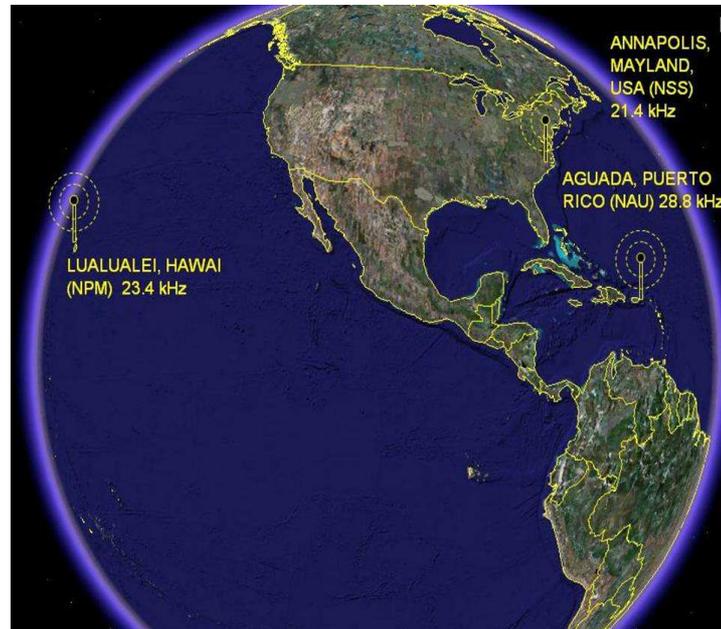


Figura 22.- Localización de los perfiles estudiados, se muestran en línea punteada

Para el levantamiento de los datos con VLF se utilizaron las señales de tres estaciones transmisoras: NAU ubicada en Aguada, Puerto Rico con una frecuencia de 28.5 kHz; NPM ubicada en Lualualei, Hawai con una frecuencia de 23.4 kHz y la NSS ubicada en Anápolis Maryland, USA con una frecuencia de 21.4 kHz, (figura 23).



Fuente: Imagen tomada de Google Earth

Figura 23.- Ubicación de las estaciones VLF utilizadas situadas respectivamente en Hawai, Annapolis (USA) y en Puerto Rico

4.2.7. Levantamiento geológico.

Se realizaron recorridos en el tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca y áreas aledañas que presentaban afloramientos de rocas, a fin de poder observar la estratigrafía del lugar y detectar el tipo de roca existente así como el grado de fracturamiento y su dirección preferencial. En estos recorridos se midió el rumbo y echado de las estructuras geológicas encontradas.

4.2.8. Posicionamiento de puntos con GPS postproceso.

Se realizó el levantamiento topográfico con equipo GPS post proceso para considerar el relieve que puede afectar a las mediciones geofísicas.

4.2.9. Instrumentación utilizada.

Utilizándose para el levantamiento de los datos un equipo electromagnético EM- 34 de Geonics, el cual consiste en una bobina transmisora y una bobina receptora, pudiéndose realizar mediciones con tres separaciones diferentes (10, 20 y 40 m) a diferentes frecuencias (6,400, 2600 y 600 Hz) respectivamente y en dos modalidades: bobinas horizontales coplanares (dipolos magnéticos verticales) y bobinas verticales coplanares (dipolos magnéticos horizontales) a diferentes frecuencias. También se utilizó un equipo electromagnético de muy baja frecuencia (Very Low Frequency), marca Scintrex, que utiliza los componentes magnéticos del campo electromagnético generado por transmisores a grandes distancias.

De igual manera se utilizó un equipo GPS postproceso marca Astech Promark. Para el levantamiento geológico se empleó una brújula Brunton graduada en cuadrantes Modelo DQL-8.

4.2.10. Descripción de análisis y procesamiento e interpretación de resultados.

Bobinas electromagnéticas EM-34.

Los datos obtenidos se interpretaron a partir de la inversión de datos a través del programa CICEM35 (2006), que tiene como propósito obtener una imagen en 2D de la conductividad del subsuelo heterogéneo por medio de la inversión de los datos electromagnéticos. La inversión de datos consiste en un promedio de las medidas para estimar la conductividad de un conglomerado de prismas en 2D que forman un espacio plano como podemos ver en la figura 24.

La ecuación principal usada tiene la forma:

$$\sigma_a(x_s, x_r) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_1}^{z_2} K_m(x_s, x_r, x, z) \sigma(x, z) dx dz \text{ ----- (28)}$$

Donde σ_a representa la conductividad aparente, que depende de la ubicación de la fuente y el receptor. Para las bobinas horizontales la conductividad aparente puede ser negativa cerca de un buen conductor superficial.

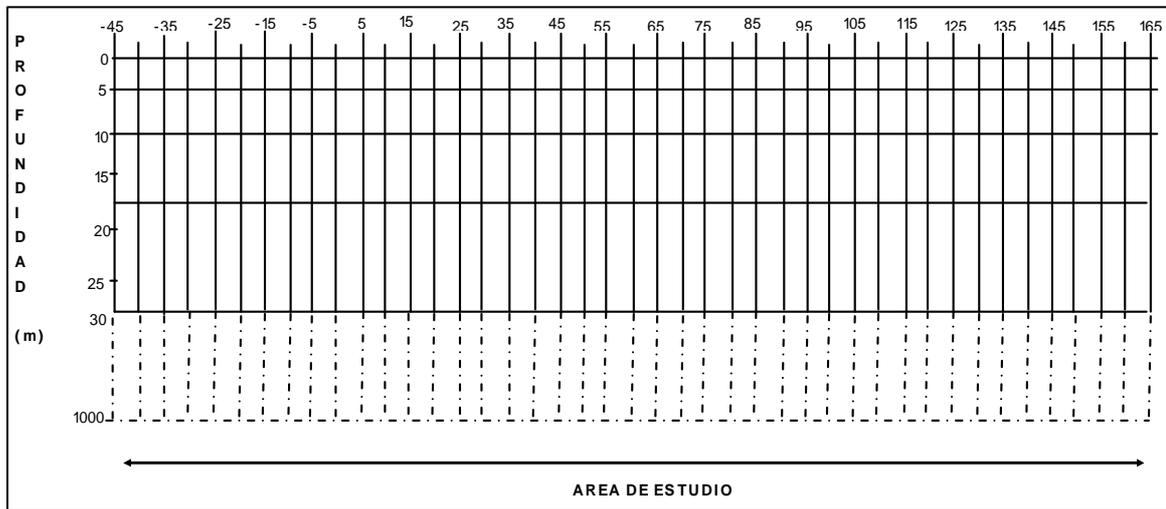


Figura 24.- Conglomerado de prismas en 2D.

En la ecuación (28) la función kernel (K_m) depende de los campos magnéticos de la fuente, del receptor y de la cuadrícula de subsuperficial de los prismas. $\sigma(x, z)$ es la conductividad del prisma que se estimará, el kernel no depende de éstos. Aquí también la integral del kernel debe ser la unidad. Para el proceso de la inversión se utiliza la programación cuadrática que permite que pongamos límites sobre las conductividades de los prismas. La función objetivo para los datos es:

$$F(o) = \|o_a - K_e o\|_{cy}^2 + \beta \|Do\| \quad \text{-----} \quad (29)$$

Donde o_a es una matriz columna que representa el logaritmo de la conductividad aparente, su dimensión corresponde al número de medidas, “o” es otra matriz columna que representa el logaritmo de la conductividad de los prismas, su tamaño es el número de prismas que forman la superficie inferior (lo desconocido). K_e es la matriz ponderada de la función, tiene tantas filas como número de medidas y de tantas columnas como el número de prismas. D es operador diferencial espacial, Do contiene las derivadas del logaritmo de

la conductividad con respecto a x y z. β (factor que suaviza) es un escalar que pretende igualar la importancia del segundo término de la ecuación con respecto al primer término.

El primer término obliga al proceso de la inversión al tamaño adecuado de los datos y el segundo término para encontrar el modelo más liso. Esto significa que la diferencia entre las conductividades de dos prismas en la dirección de x no debe ser mayor, o iguales que en la dirección de z. Esto es muy útil en el prisma posterior de la superficie donde los datos no tienen bastante resolución. El segundo término permite apenas los saltos de conductividad necesaria para adecuar los datos y para evitar aspereza innecesaria en el modelo. Cuando aumentamos el factor se consigue un modelo más liso de la conductividad y aumentamos las coincidencias. Cuando disminuimos el factor que alisa conseguimos un modelo de resistividad y decrece el error.

Very Low Frequency (VLF).

Para el caso de VLF, aunque la mayoría de las estaciones de radiodifusión de señales VLF trabajan con una frecuencia relativamente baja en comparación con la emisión normal de banda, los datos medidos todavía sufren de ruido geológico relativamente alto. Por lo que se empleó un filtro de promedios móviles a cuatro perfiles, permitiendo suavizar las fluctuaciones de los valores en los casos donde existía ruido, por materiales ferrosos en las cercanías como viviendas de lámina y desechos; es decir, cambios irregulares en las gráficas de los datos, con la finalidad de dar una interpretación más compacta. Los métodos de suavizamiento más usados consisten en aplicar un promedio móvil simple de orden 3, el cual se construye como:

$$St = (x_{t-1} + x_t + x_{t+1})/3 \text{-----} (30)$$

Por otro lado el análisis y procesamiento de datos VLF se han estudiado durante muchos años por numerosos investigadores en relación con las técnicas de transformación de datos y de modelado, y para la interpretación se procesaron los datos utilizando técnicas adecuadas con procedimientos de filtrado. Los filtrados de Fraser y de Karous-Hjelt, descritos en el inciso 2.2.3, son dos métodos ampliamente utilizados en el procesado de los datos de VLF-EM (Fraser, 1969; Karous y Hjelt, 1983) obteniendo datos de mejor calidad.

El filtro de Fraser transforma los puntos de cruce en picos que realzan las señales de las estructuras conductoras.

Para el procesado de los datos de VLF se utilizó el programa KHFFILT, Versión 1.1a (2006), elaborado por Markku Pirttijärvi del Departamento de Geofísica de la Universidad de Oulu, Finlandia; que realiza el filtrado de Karous – Hjelt y Fraser de datos de VLF, comúnmente de los componentes ortogonales del campo magnético real (en fase) y el imaginario (la cuadratura). Donde la función objetivo se presenta a continuación, la cual puede ser utilizada para la inversión de datos.

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{R_i^o - R_i^c}{\text{abs}(R_i^o) + C_R} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i^o - I_i^c}{\text{abs}(I_i^o) + C_I} \right)^2 \right] \text{-----} \quad (31)$$

Donde R_i^o y R_i^c son las anomalías reales observadas y calculadas, I_i^o y I_i^c son los datos imaginarios observados y calculados, respectivamente. N es el número de puntos observados. C_R y C_I son constantes, diferencias entre el máximo y el mínimo de cada respuesta individual. El objetivo de la inversión es obtener una distribución en el subsuelo de la conductividad eléctrica, que genera una respuesta ajustable a los datos de campo dentro de los límites de error. Los datos de entrada son los componentes del tipo real e imaginario, y se ha utilizado una suavidad constreñida con el método de mínimos cuadrados.

Capítulo 5. Resultados y discusión.

5.1. Introducción

Como se mencionó en el capítulo anterior se realizaron levantamientos geofísicos en dos épocas distintas, la primera se realizó en agosto de 2007, cuando se efectuó el levantamiento de 4 perfiles con rumbo aproximado de E-W, con bobinas electromagnéticas (EM-34) y VLF. El segundo levantamiento se realizó en febrero de 2008, obteniéndose datos en los 4 perfiles mencionados y dos adicionales (perfiles 5 y 6) únicamente usando el método de VLF. En este capítulo se presenta en congruencia con los datos obtenidos, el procesado y resultado de los mismos, así como su análisis y discusión.

5.2. Procesado inicial

El procesado inicial consistió en la elaboración de gráficas e imágenes de contorno para los datos obtenidos con cada método empleado y para cada perfil estudiado. Para el caso de las bobinas electromagnéticas las gráficas se presentan de la figura 25 a la 32 tanto para dipolo vertical (DV) como horizontal (DH), donde se representó en el eje de las abscisas la distancia en metros de cada perfil y en las ordenadas la conductividad aparente medida, para cada separación de las bobinas electromagnéticas; es decir, para 10 m, 20 m, y 40 m respectivamente. En las gráficas se pueden inferir zonas donde la conductividad aparente presenta variaciones importantes, las cuales constituyen en si zonas anómalas, que indican la presencia de un medio conductor y en este caso se relacionan con la presencia de lixiviados.

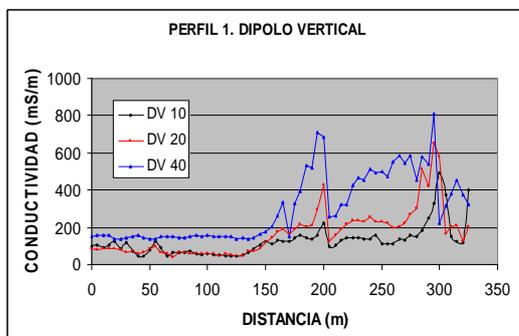


Figura 25.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 1, para la modalidad de dipolo vertical

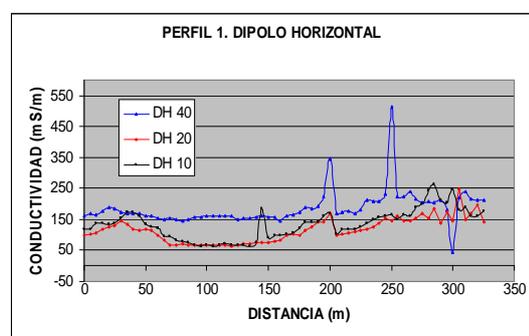


Figura 26.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 1, para la modalidad del dipolo horizontal

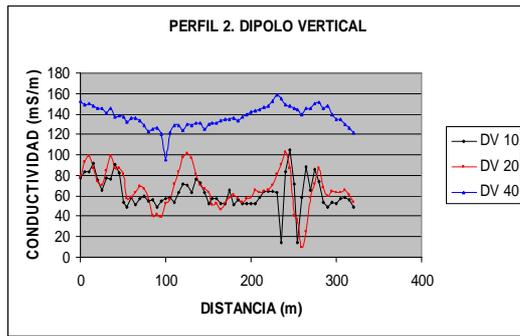


Figura 27.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 2, para la modalidad de dipolo vertical

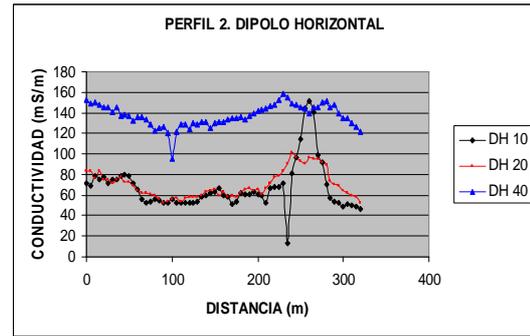


Figura 28.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 2, para la modalidad de dipolo horizontal

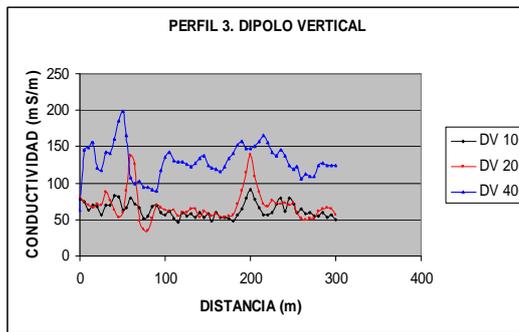


Figura 29.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 3, para la modalidad de dipolo vertical

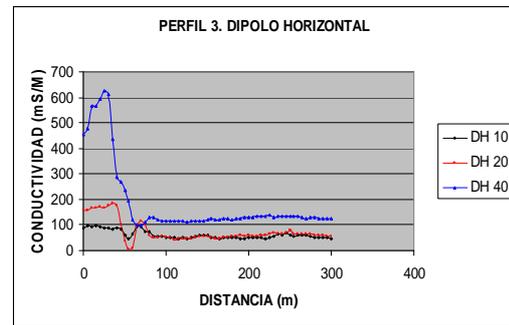


Figura 30.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 3, para la modalidad de dipolo horizontal.

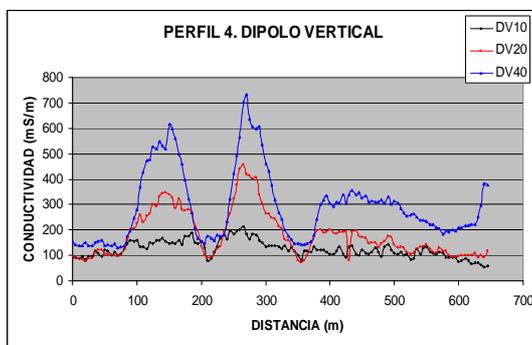


Figura 31.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 4 para la modalidad de dipolo vertical

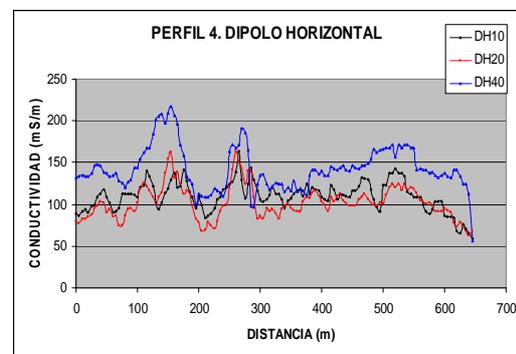


Figura 32.- Gráfica de los datos de campo de bobinas EM del perfil 4, para la modalidad de dipolo horizontal.

Las gráficas correspondientes a los datos de VLF del mes de agosto de 2007 se presentaron a partir de la figura 33 a la 36. En dichas gráficas se representaron los datos de las respuestas obtenidas, en el eje de las ordenadas el componente real y el imaginario (fase y cuadratura), representados como unidades de densidad de corriente equivalente (DCE) y en el eje de las abscisas la distancia en metros. Los cruce en cero de los puntos de las curvas

de fase y cuadratura, determinan la ubicación de los cuerpos conductores en el subsuelo, los cuales se asume que son debidos a la presencia de los lixiviados.

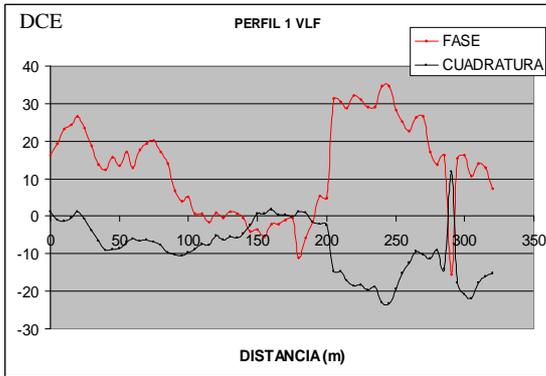


Figura 33 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 1 de agosto 2007

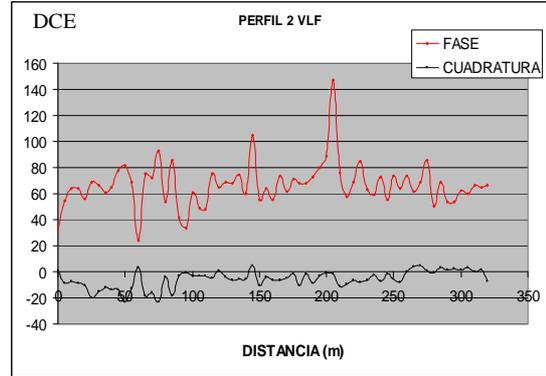


Figura 34 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 2 de agosto 2007

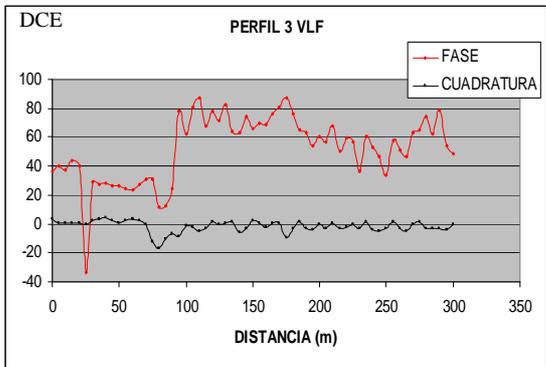


Figura 35 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 3 de agosto 2007.

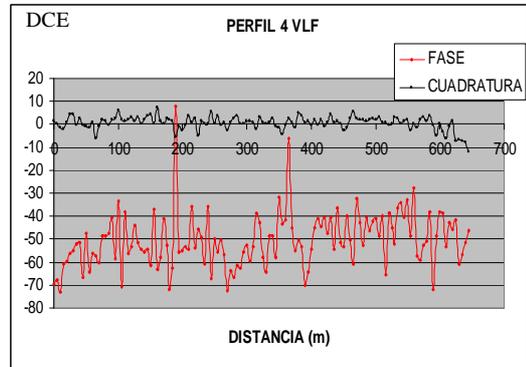


Figura 36 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 4 de agosto 2007.

Las gráficas correspondientes a los datos de VLF del mes de febrero de 2008 se presentan en las figuras 37 hasta la 42.

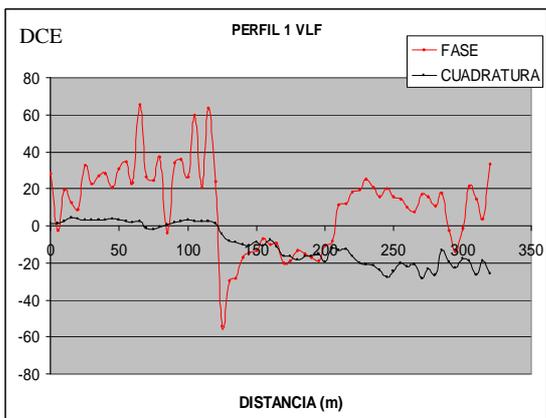


Figura 37 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 1 de febrero 2008

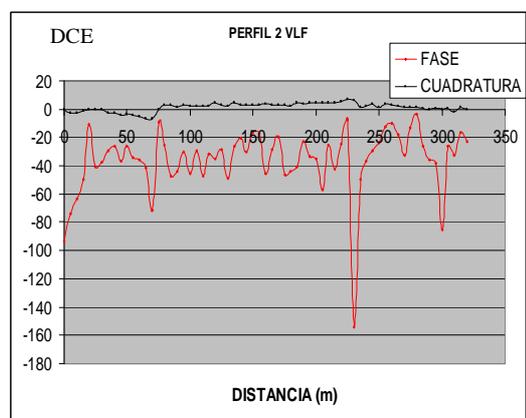


Figura 38 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 2 de febrero 2008

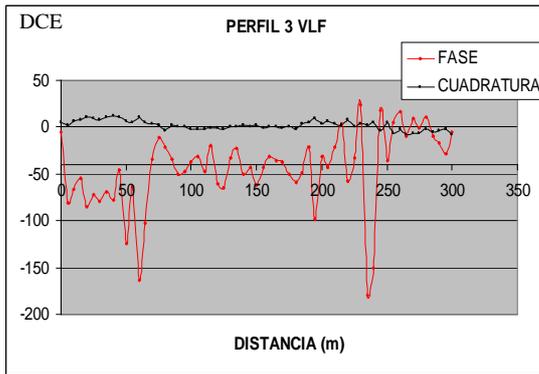


Figura 39 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 3 de febrero 2008

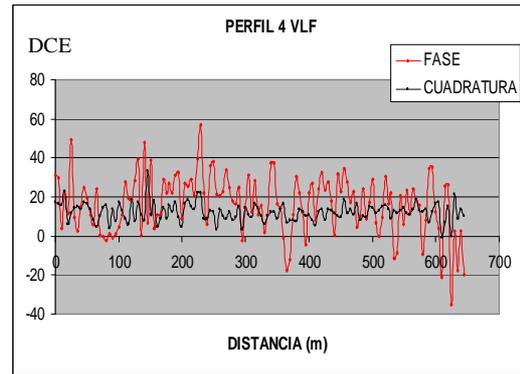


Figura 40 .- Gráfica de los datos VLF perfil 4 de febrero 2008

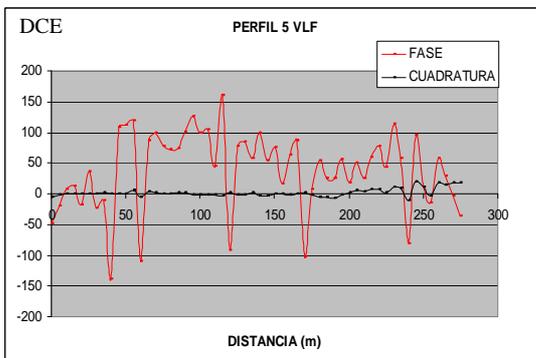


Figura 41 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 5 de febrero 2008

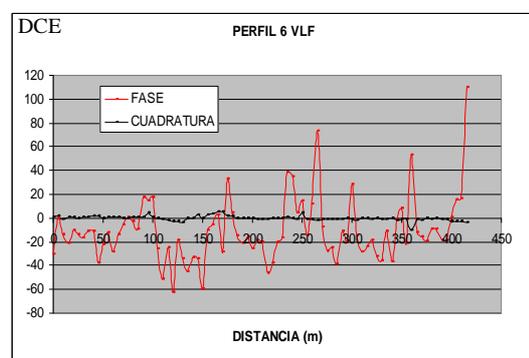


Figura 42 .- Gráfica de los datos VLF del perfil 6 de febrero 2008

Las imágenes de contorno que se realizaron para los datos de campo de bobinas electromagnéticas y muestran la distribución de la conductividad eléctrica en el subsuelo de los diferentes perfiles, tanto en dipolo vertical como horizontal (figuras 43, 44, 45 y 46). En estas, las curvas rojas representan conductividades altas que se asocian a zonas conductoras generadas por los lixiviados. También, para cada perfil se muestra su orientación geográfica correspondiente.

En la figura 43 se puede inferir la presencia de dos anomalías de forma amorfa que se asocian a la presencia de lixiviados, cuyo centro se encuentran alrededor de 190 m y 280 m respectivamente; dicha imagen corresponde al perfil 1. Para el perfil 2, la imagen correspondiente se presenta en la figura 44, en esta se observa que existe una zona anómala que se encuentra a lo largo de todo el perfil, a una profundidad promedio alrededor de los 15 m, si se consideran ambos dipolos.

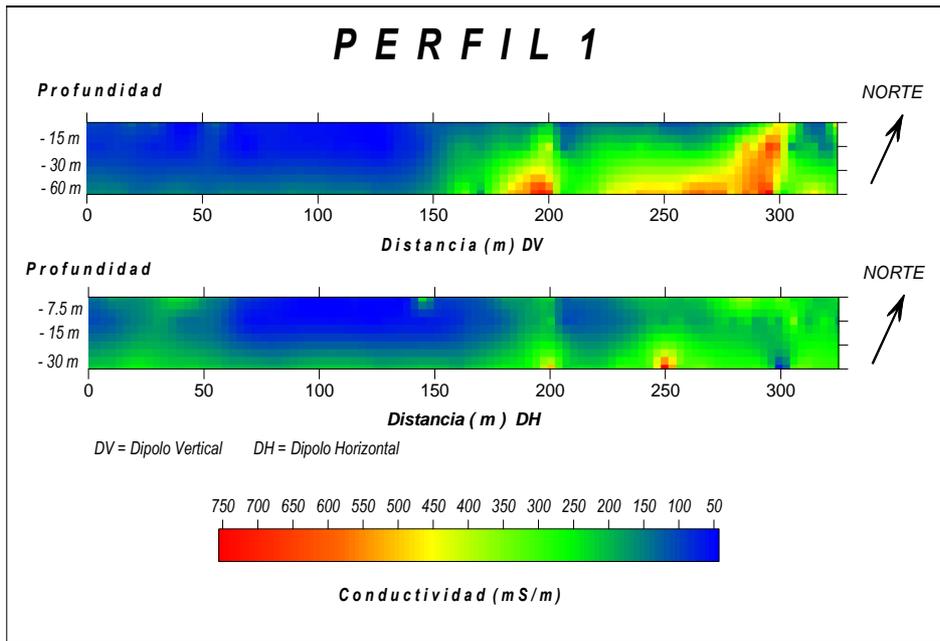


Figura 43.- Imagen del perfil 1 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal

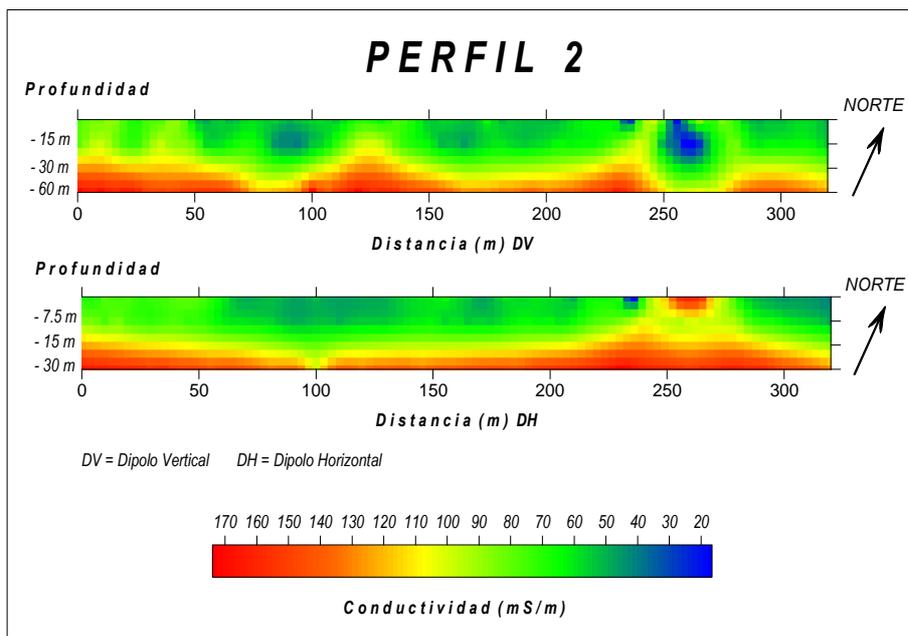


Figura 44.- Imagen del perfil 2 de bobinas EM, para las modalidad de dipolo vertical y horizontal

En la imagen correspondiente al perfil 3 (figura 45), se presentan dos anomalías, que se asocian con la presencia de lixiviados, cuyos centros se encuentran en 25 m y 200 m. En la figura 46, se observan 3 anomalías de forma irregular, cuyos centros corresponden a 150, 280 y 415 m respectivamente con profundidades variables.

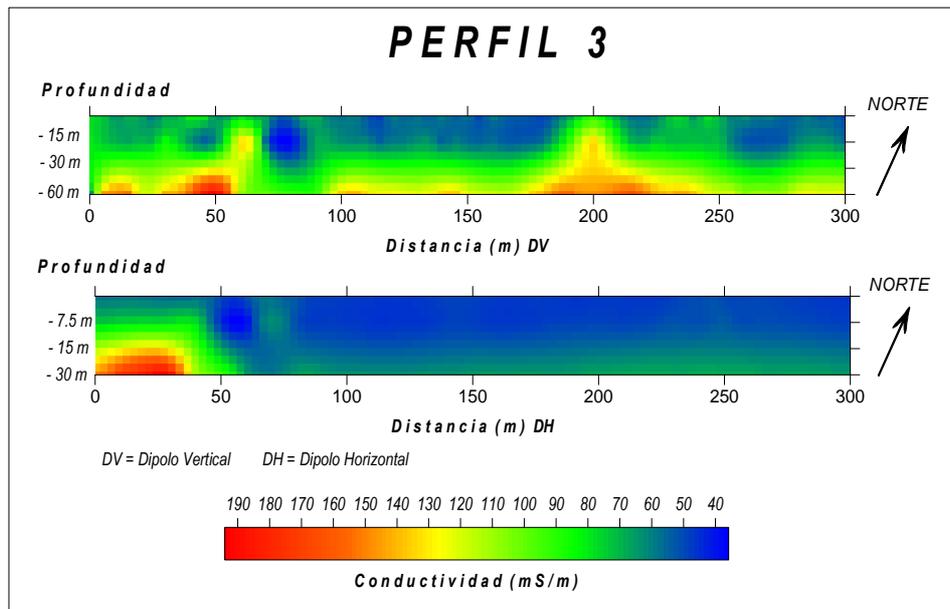


Figura 45.- Imagen del perfil 3 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal

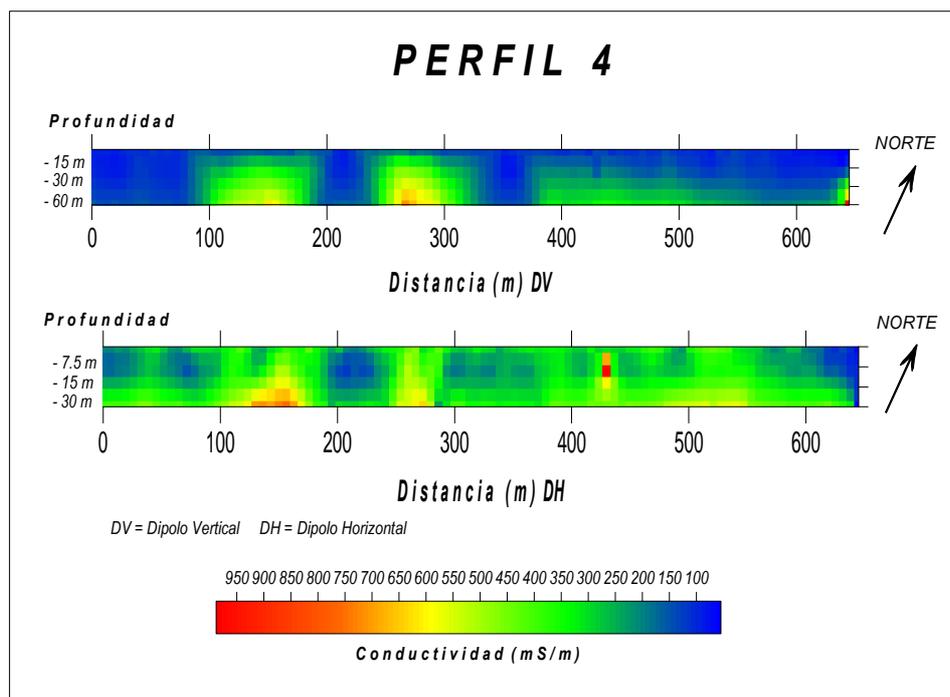


Figura 46.- Imagen del perfil 4 de bobinas EM, para la modalidad de dipolo vertical y horizontal

También se graficaron los perfiles topográficos, que se presentan en las figuras 47, 48, 49, 50, 51 y 52, donde en el eje de las abscisas representa la distancia en metros y en el eje de las ordenadas la elevación sobre el nivel medio del mar. Los cuales muestran las diferencias altitudinales de cada sitio donde se efectuaron los perfiles de los levantamientos geofísicos.

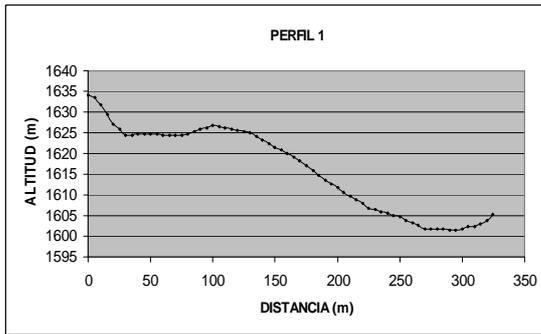


Figura 47.- Topografía del perfil 1.

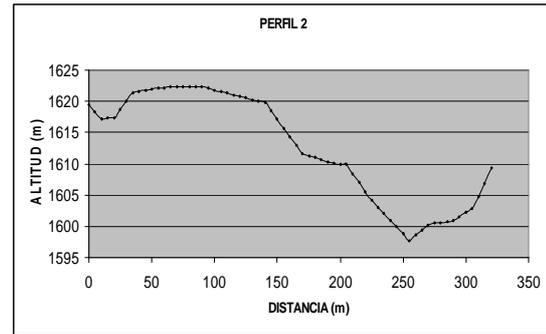


Figura 48.- Topografía del perfil 2.

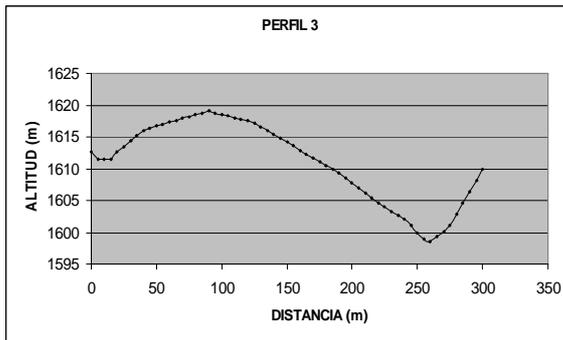


Figura 49.- Topografía del perfil 3.

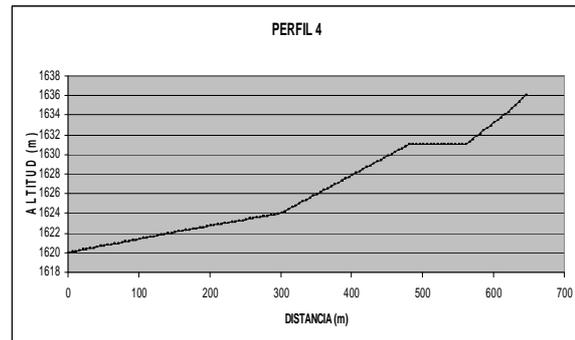


Figura 50.- Topografía del perfil 4.

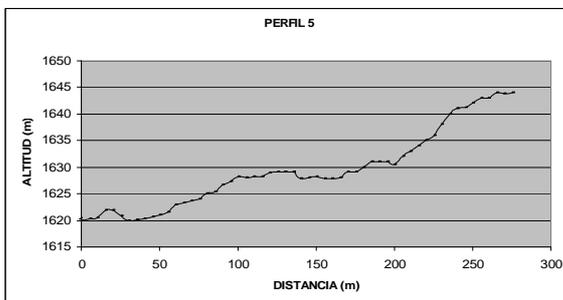


Figura 51.- Topografía del perfil 5.

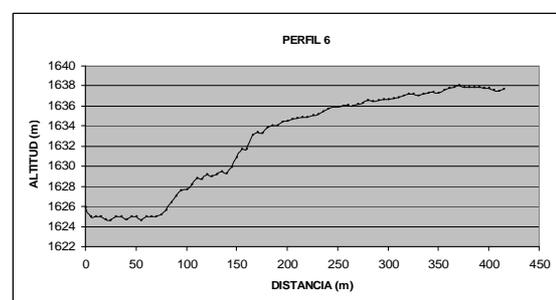


Figura 52.- Topografía del perfil 6.

5.3. Datos procesados y resultados.

De acuerdo a la metodología planteada se realizó el procesamiento de los datos para el método de bobinas electromagnéticas se efectuó a partir del programa CICEM35 (2006), este programa se basa en la teoría desarrollada por Gómez-Treviño (1987) para realizar la inversión de datos, la cual considera las mediciones obtenidas con el equipo EM-34 como un promedio ponderado de la distribución de la conductividad en la tierra. Las respectivas gráficas se presentan en las figuras 53 a la 60, tanto para dipolo vertical como el horizontal, donde se pueden inferir zonas donde la conductividad aparente presenta variaciones

importantes, las cuales se asocian a zonas anómalas, que indican la presencia de los lixiviados en el medio fracturado. En estas figuras se puede observar la suavización de las curvas en relación con las presentadas en las en las figuras 25 a la 32 con los datos de campo, definiéndose con mayor precisión la ubicación de las zonas anómalas, ya que los picos se definen y se puede tener una mejor apreciación visual.

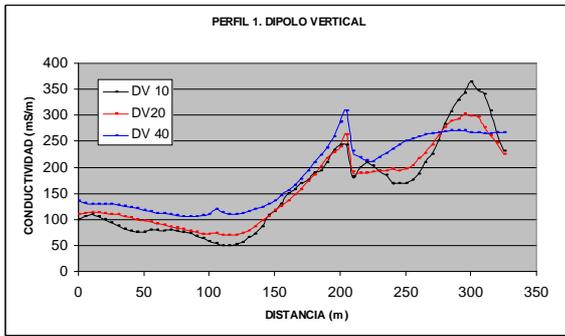


Figura 53.- Gráfica de los datos procesados del perfil 1 para la modalidad de dipolo vertical

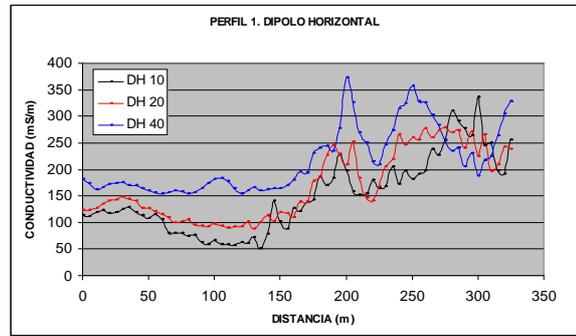


Figura 54.- Gráfica de los datos procesados del perfil 1 para la modalidad de dipolo horizontal.

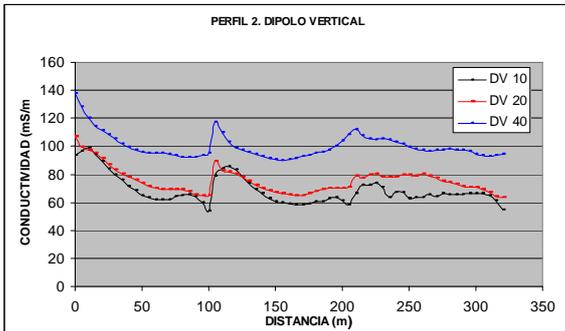


Figura 55.- Gráfica de los datos procesados del perfil 2 para la modalidad de dipolo vertical

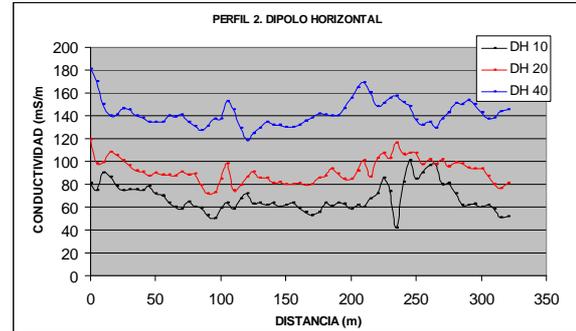


Figura 56.- Gráfica de los datos procesados del perfil 2 para la modalidad de dipolo horizontal

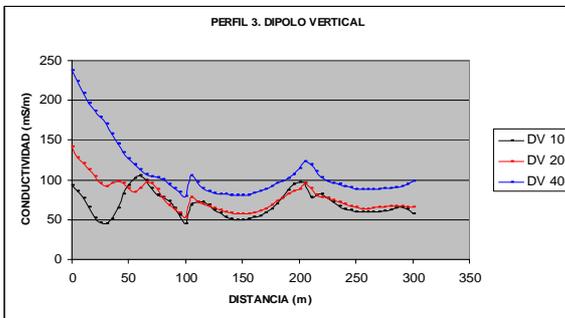


Figura 57.- Gráfica de los datos procesados del perfil 3 para la modalidad de dipolo vertical

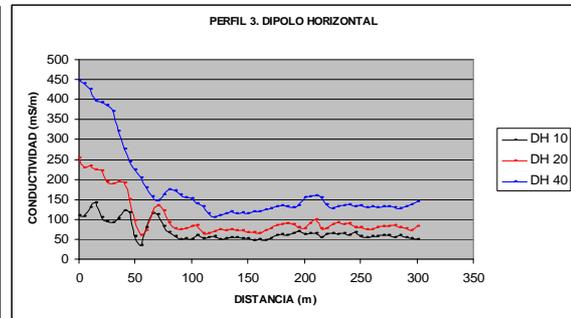


Figura 58.- Gráfica de los datos procesados del perfil 3 para la modalidad de dipolo horizontal.

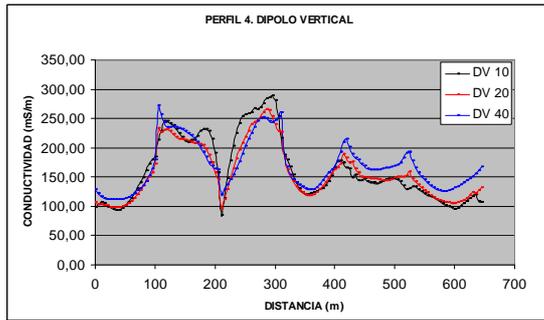


Figura 59.- Gráfica de los datos procesados del perfil 4 para la modalidad de dipolo vertical.

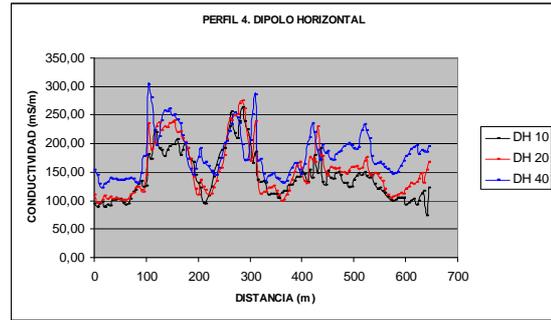


Figura 60.- Gráfica de los datos procesados del perfil 4 para la modalidad de dipolo horizontal.

Las respectivas imágenes de contorno, de cada perfil levantado con este método, se presentan en las figuras 61, 62, 65 y 66. Dichas imágenes muestran la distribución de la conductividad eléctrica en el subsuelo a lo largo de los diferentes perfiles, tanto en dipolo vertical como horizontal y además se incluyen las imágenes de contorno donde se integran ambos dipolos (figuras 63, 64, 67 y 68); representando de color rojo una mayor conductividad en el medio, que se asocia con zonas anómalas donde se infiere la presencia de lixiviados y de acuerdo a su forma se puede observar la presencia de fracturas.

Al integrar ambos dipolos, las zonas conductoras se definen con mayor claridad. Para el caso del perfil 1 se pueden inferir con mayor exactitud la presencia de las dos anomalías de forma irregular que ya se habían observado (figura 43), pero ahora su centro se define en 200 m y 280 m respectivamente (figura 63). Para el perfil 2, figura 64, se define que la zona anómala no se encuentra a lo largo de todo el perfil, tal como se observaba anteriormente.

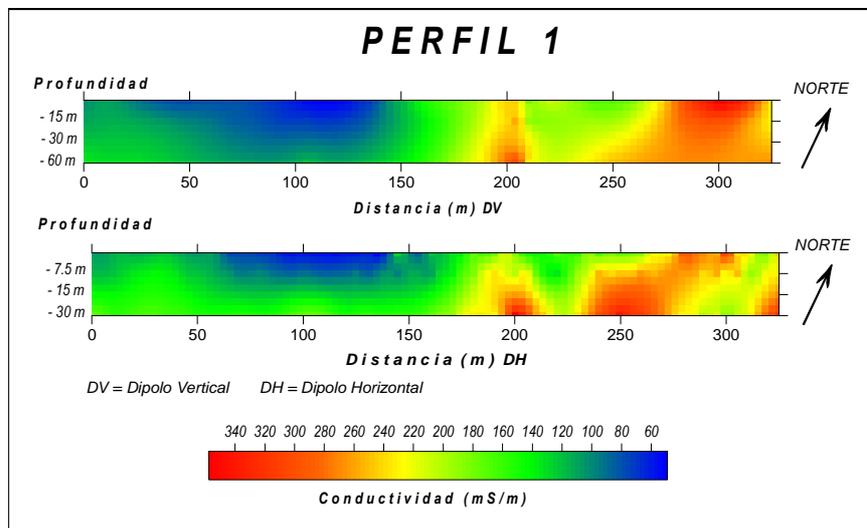


Figura 61.- Imagen con los datos procesados del perfil 1 de bobinas

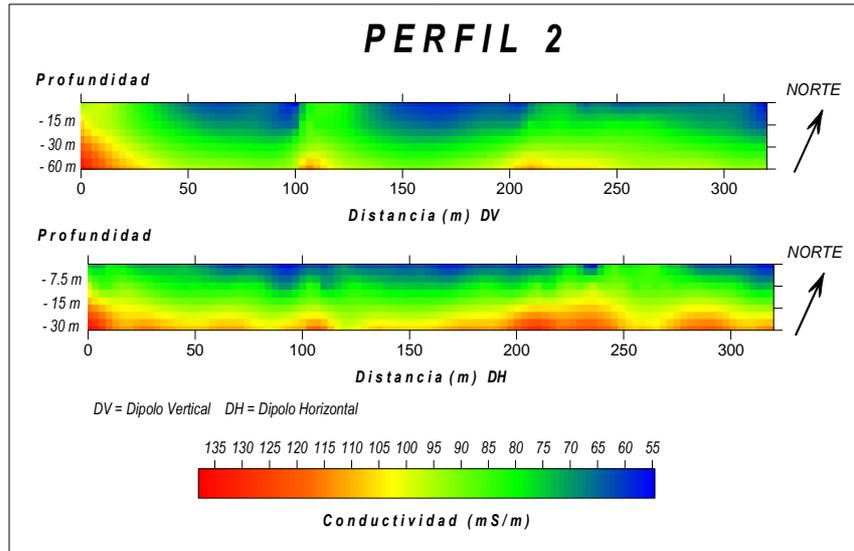


Figura 62.- Imagen con los datos procesados del perfil 2 de bobinas EM.

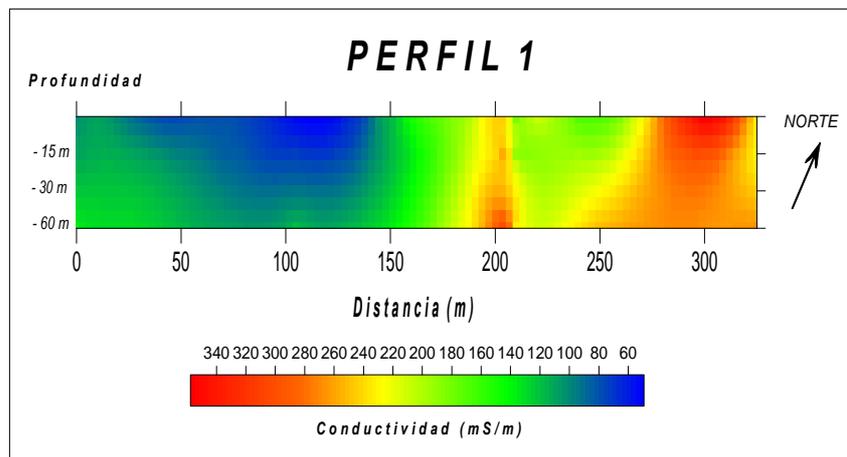


Figura 63.- Imagen con los datos procesados del perfil 1, integrando el dipolo vertical y el horizontal.

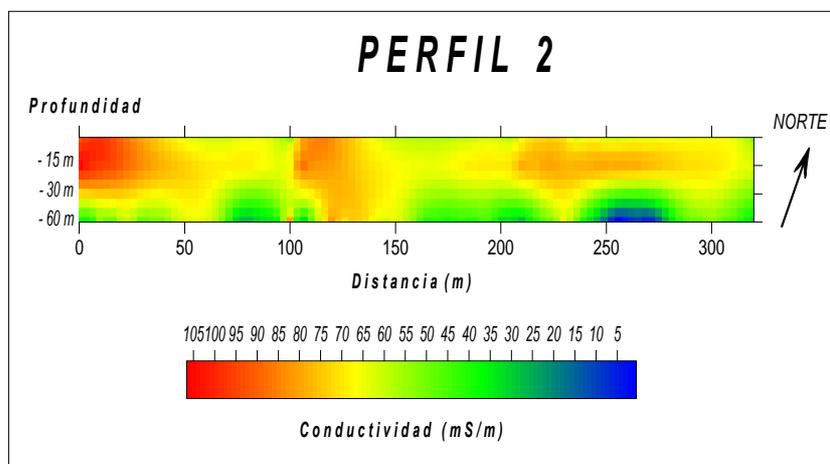


Figura 64.- Imagen con los datos procesados del perfil 2, integrando el dipolo vertical y el horizontal.

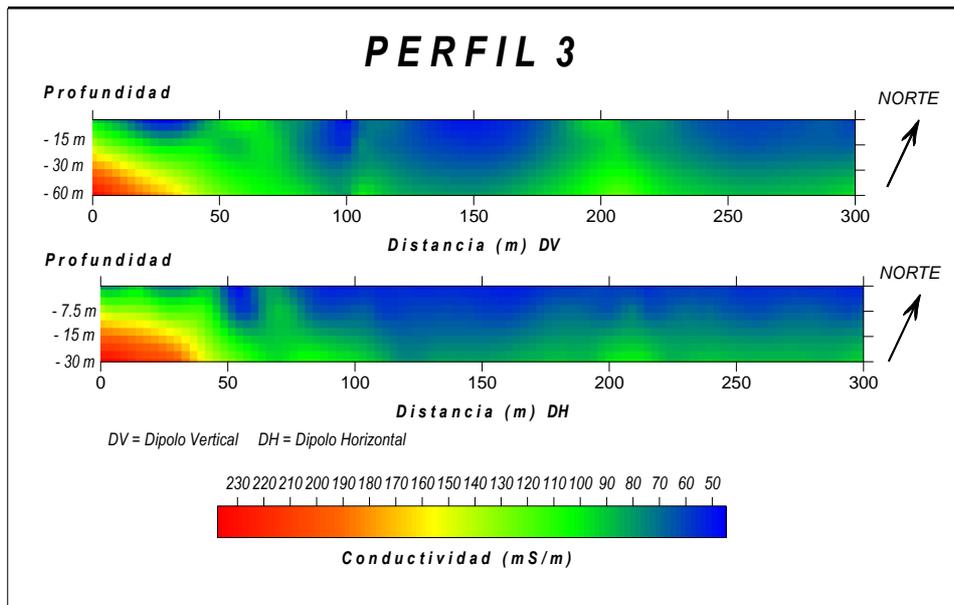


Figura 65.- Imagen con los datos procesados del perfil 3 de bobinas EM.

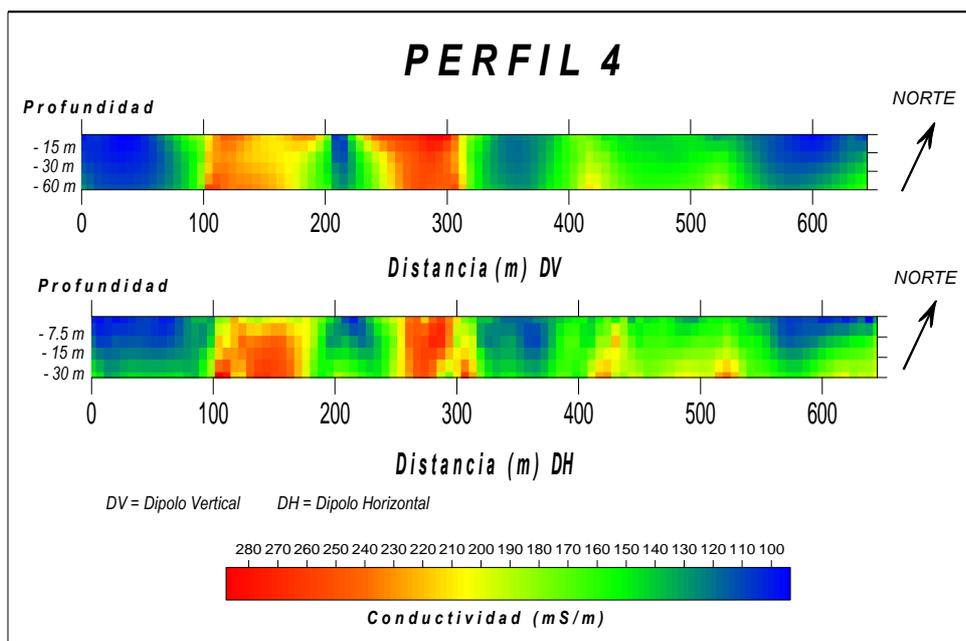


Figura 66.- Imagen con los datos procesados del perfil 4 de bobinas EM.

Al integrar ambos dipolos para el caso del perfil 3 (figura 67), se define claramente sólo una zona conductora con centro alrededor de los 15 m y no dos como se veía en el caso de las imágenes con datos sin procesar. Para el perfil 4, al integrar ambos dipolos se observan dos anomalías irregulares con centros alrededor de 120 m y 280 m, donde se presentan conductividades eléctricas entre 220 y 300 mS/m que se infieren con la presencia de los lixiviados que se están infiltrando en el subsuelo.

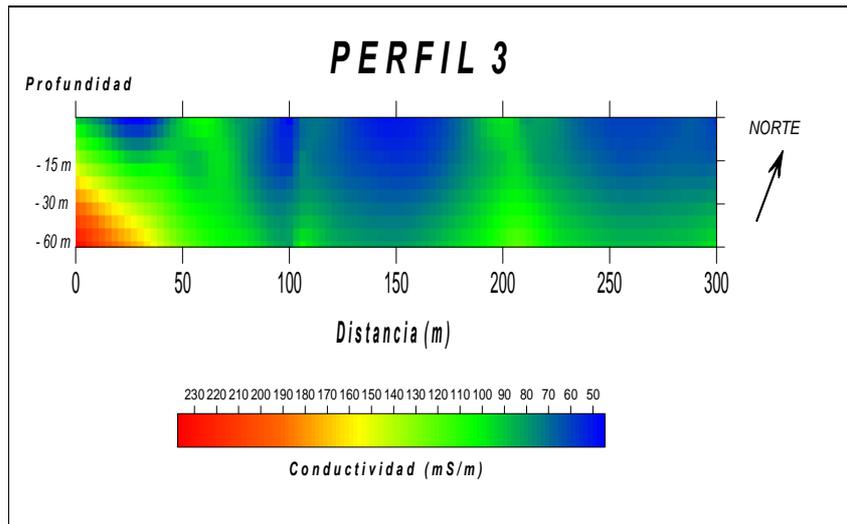


Figura 67.- Imagen con los datos procesados del perfil 3, integrando el dipolo vertical y el horizontal.

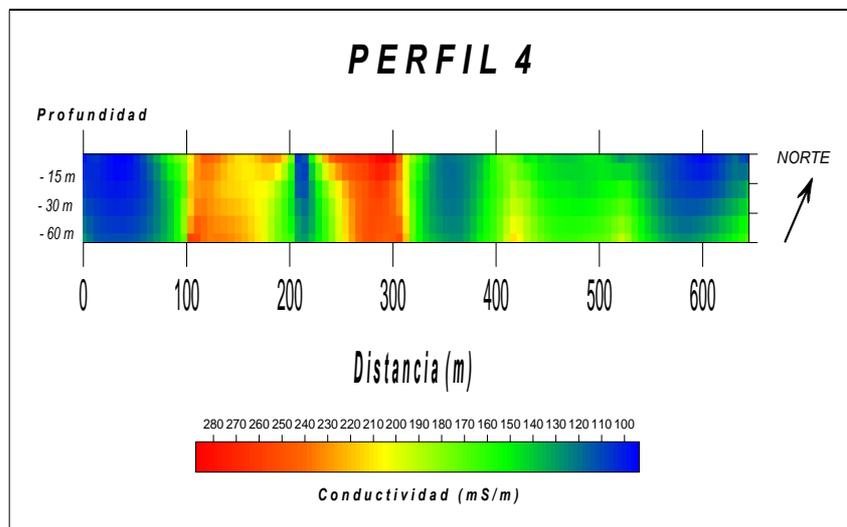


Figura 68.- Imagen con los datos procesados del perfil 4, integrando el dipolo vertical y el horizontal.

Para el método de VLF se empleó el programa KHFFILT versión 1.1.a (2006) elaborado por Markku Pirttijärvi del departamento de geofísica de la universidad de Oulu, Finlandia. El programa aplica los filtros propuestos por Karous – Hjelt (1983) y Fraser (1969) para datos obtenidos con VLF, utilizando los componentes real (fase) e imaginario (cuadratura). A continuación se presentan los perfiles 1 al 4 del levantamiento efectuado en agosto de 2007, presentándose en el siguiente orden para cada perfil:

- a) Las gráficas correspondientes al filtrado Fraser, donde después de la aplicación del filtrado, el valor máximo de las curvas se encuentra justo encima de la posición de la zona anómala, en donde es posible inferir la presencia de fracturas que conducen el flujo de

lixiviados. Las gráficas presentan en el eje de las abscisas la distancia de cada perfil en metros y en el eje de las ordenadas la respuesta obtenida para cada componente.

b) Las imágenes de contorno para cada perfil medido, muestran densidades de corriente equivalente, correspondiendo el color rojo la de mayor intensidad, donde se infieren estructuras conductoras en el subsuelo, asociadas con la presencia de lixiviados.

En las figuras 69 a la 72 se presentan las graficas e imágenes correspondientes al perfil 1, de la 73 a la 76 al perfil 2, de la 77 a la 80 al perfil 3 y de la 81 a la 84 al perfil 4 respectivamente.

PERFIL 1.

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario perfil 1.

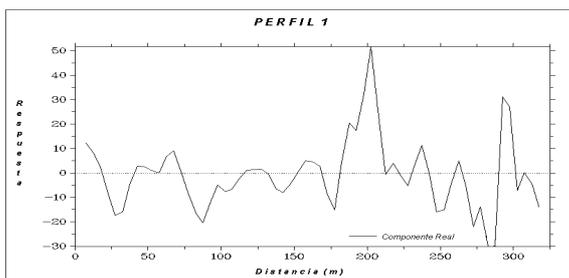


Figura 69.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente real, agosto de 2007.

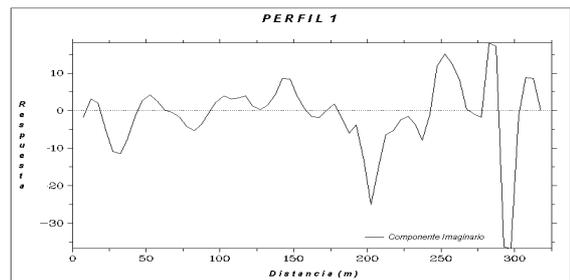


Figura 70.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario perfil 1.

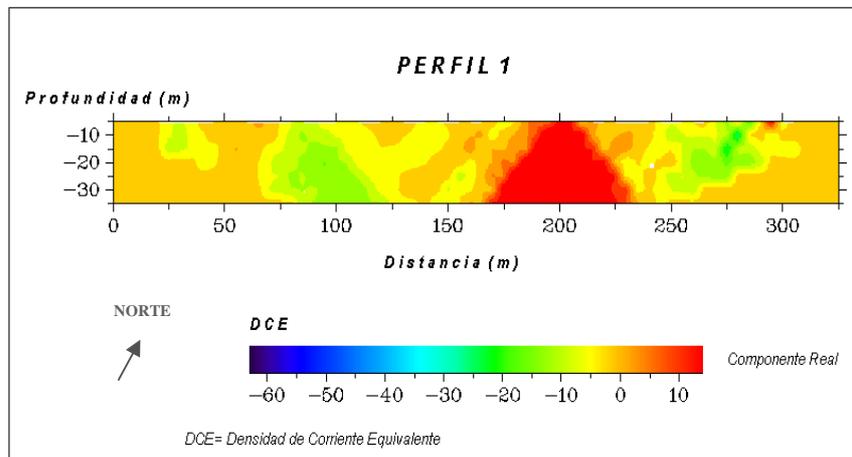


Figura 71.- Imagen del perfil 1, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.

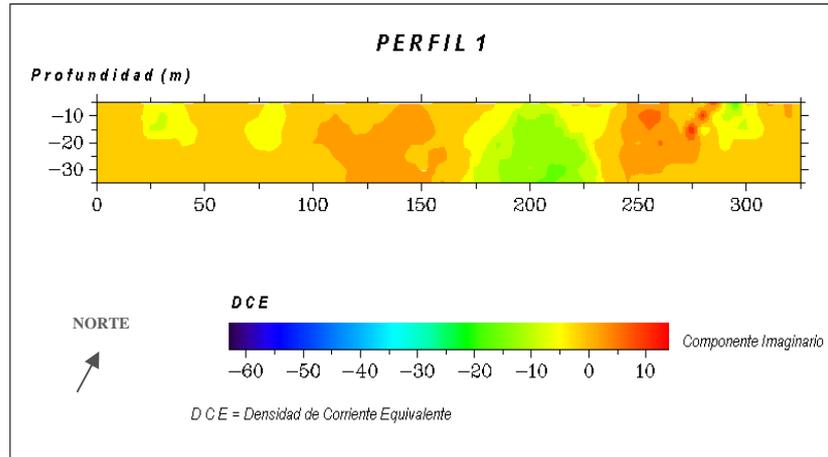


Figura 72.- Imagen del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.

Para el caso del perfil 1, la zona anómala se aprecia alrededor de los 200 m, la cual presenta una forma irregular, y que se puede observar con mayor resolución en la del componente real.

PERFIL 2

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 2.

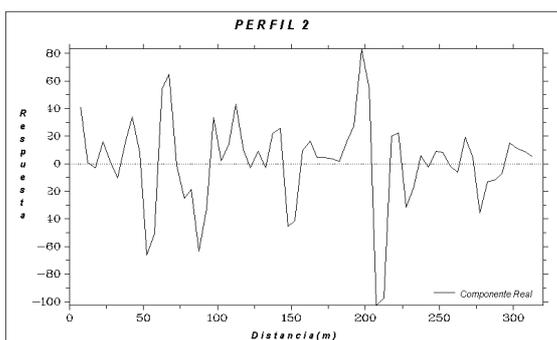


Figura 73.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2 correspondiente al componente real, agosto de 2007.

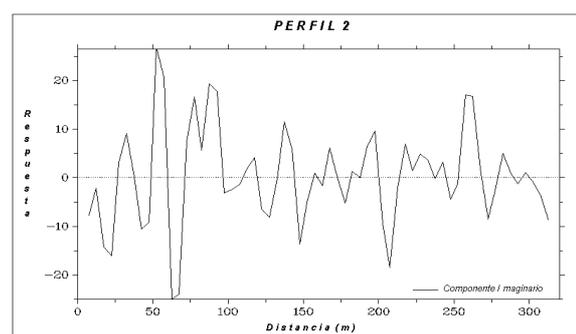


Figura 74.- Gráfica filtrado Fraser, perfil 2 correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 2.

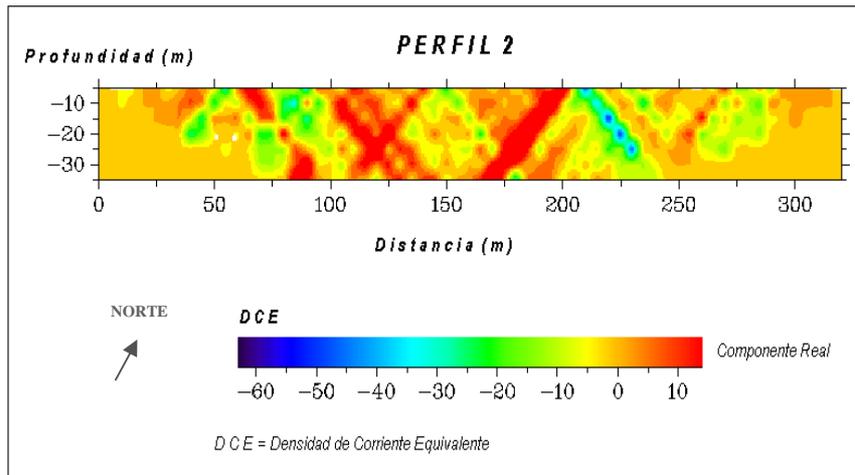


Figura 75.- Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007.

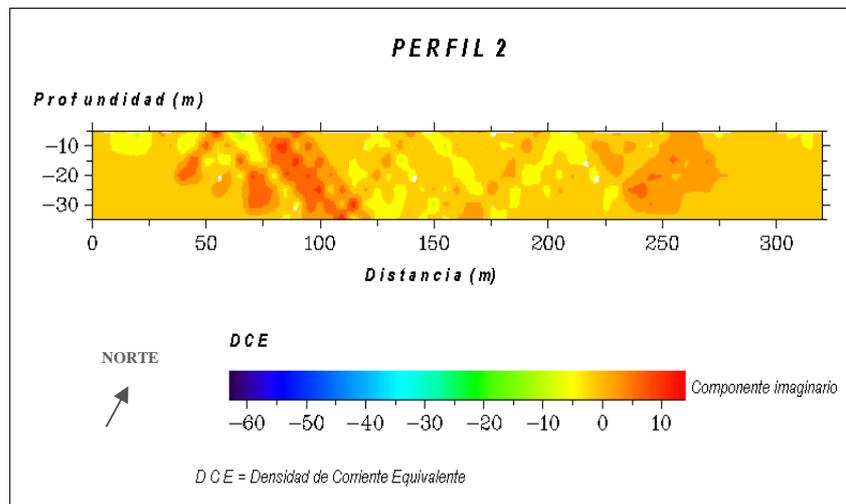


Figura 76.- Imagen del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007.

En las imágenes y gráficas correspondientes para el perfil 2, se observan anomalías de forma diagonal que sugieren la presencia de fracturas, que conducen a los lixiviados, con centros en 85, 125 y 175 m respectivamente. Sin embargo, dada la presencia de materiales ferrosos, la resolución se vio un tanto afectada, por lo que fue necesario aplicar la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados de este perfil, la imagen correspondiente se presenta en la figura 109.

PERFIL 3

- a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser, componentes real e imaginario para el perfil 3.

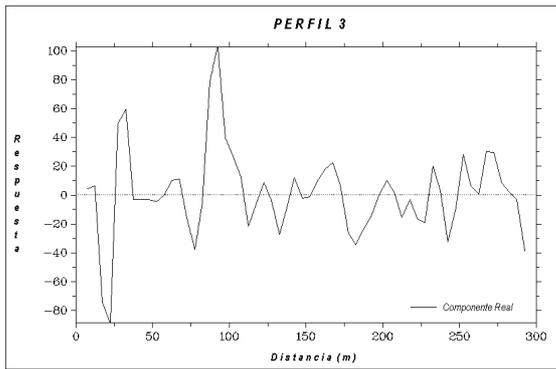


Figura 77.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3 correspondiente al componente real, agosto de 2007.

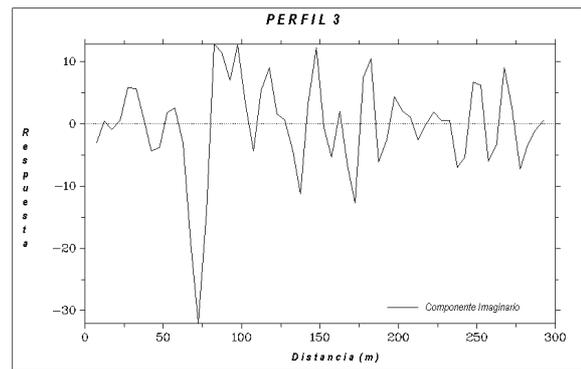


Figura 78.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3 correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 3.

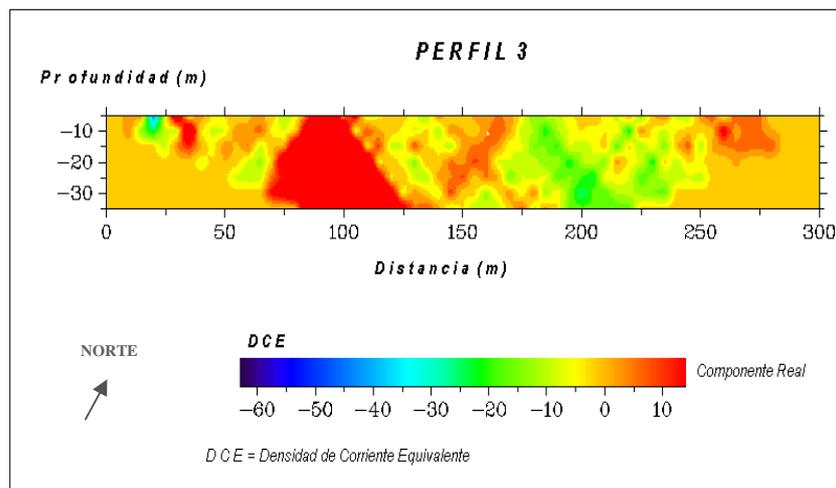


Figura 79.- Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007

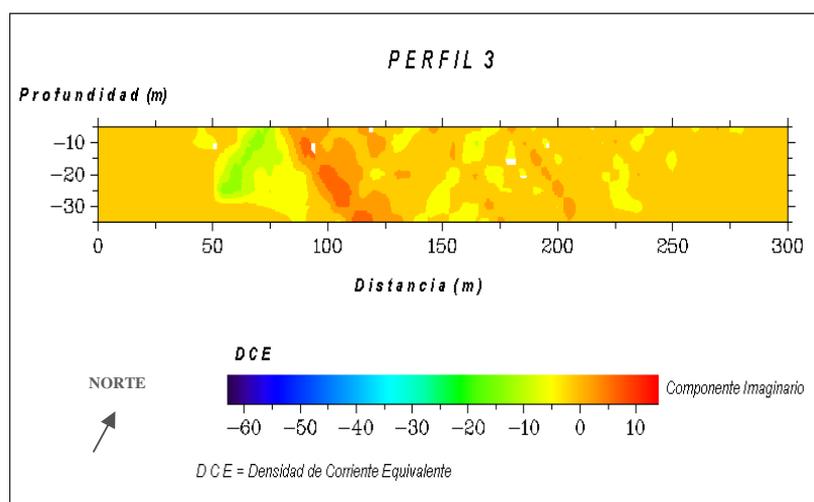


Figura 80.- Imagen del perfil 3, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007

Para el caso de las imágenes y graficas del perfil 3, presentan una zona conductora definida con centro alrededor de los 100 m.

PERFIL 4

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario del perfil 4.

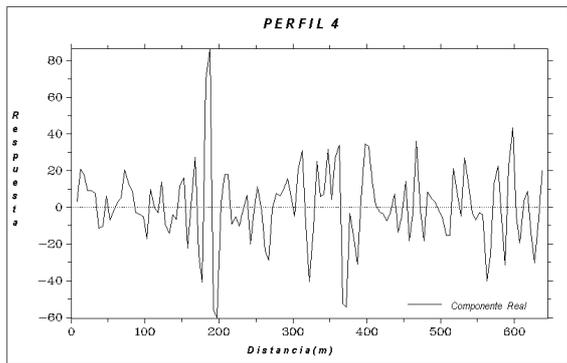


Figura 81.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4 correspondiente al componente real, agosto de 2007

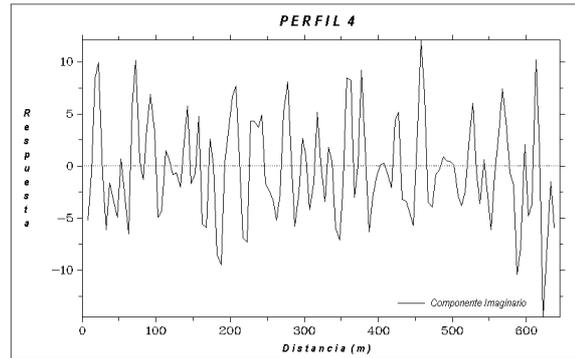


Figura 82.- Gráfica filtrado Fraser del perfil 4 correspondiente al componente imaginario, agosto de 2007

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 4.

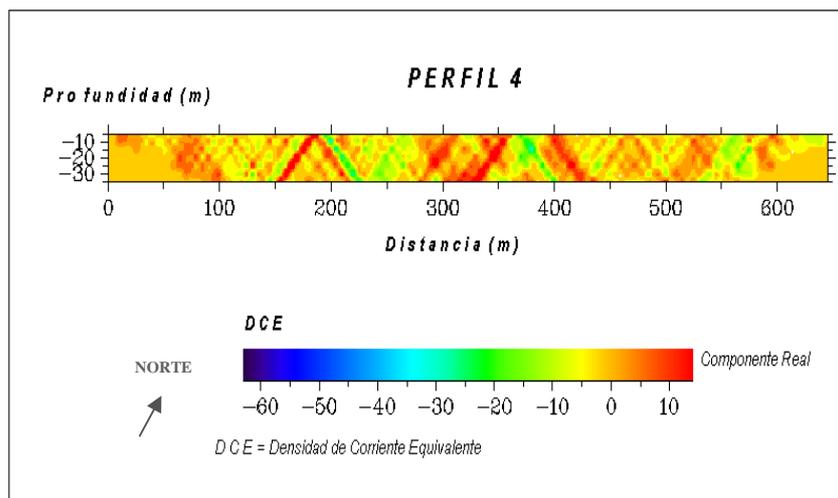


Figura 83.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007

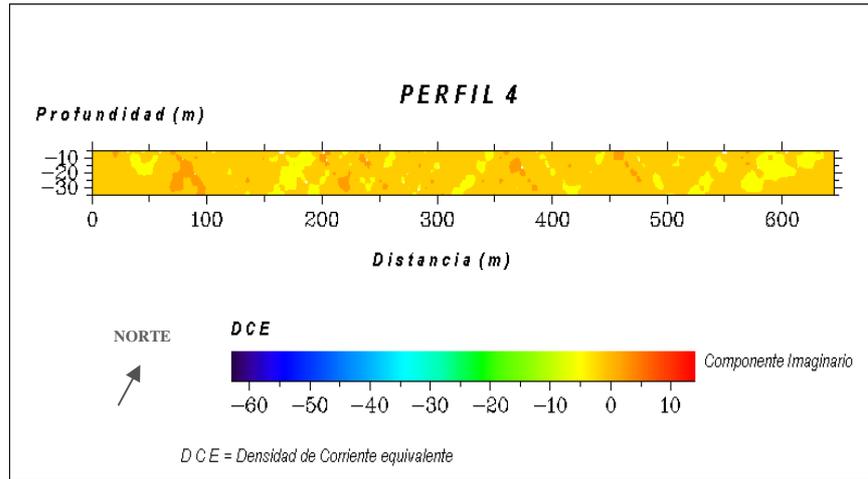


Figura 84.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de agosto de 2007

Para el perfil 4, las imágenes muestran anomalías en forma diagonal que sugieren la presencia de fracturas, que conducen a los lixiviados. Sin embargo, dada la presencia de materiales ferrosos en el seno del vertedero, la resolución se vio un tanto afectada, por lo que fue necesario aplicar la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados, la imagen correspondiente se presenta en la figura 113.

Para el caso de los datos obtenidos en febrero de 2008 de VLF a continuación se presentan los perfiles del 1 al 6, presentándose de igual forma que los anteriores, con el siguiente orden para cada perfil: a) las gráficas correspondientes al filtrado Fraser y b) las imágenes de contorno para cada perfil medido. En las figuras 85 a la 88 se presentan las correspondientes al perfil 1, de la 89 a la 92 al perfil 2, de la 93 a la 96 al perfil 3, de la 97 a la 100 al perfil 4, de la 101 a la 104 al perfil 5 y de la 105 a la 108 al perfil 6 respectivamente. Las gráficas corresponden al filtrado Fraser y las imágenes de contorno obtenidas. Este segundo levantamiento se realizó para corroborar y contrastar los resultados obtenidos, ya que a mayor cantidad de sondeos, se tiene mayor certeza de que los datos son confiables.

PERFIL 1

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 1.

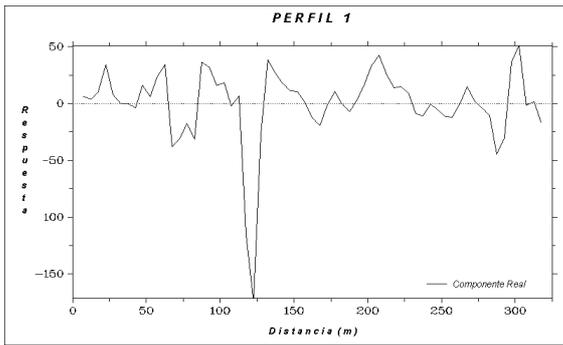


Figura 85.- Gráfica de filtrado Fraser, perfil 1 correspondiente al componente real, febrero de 2008

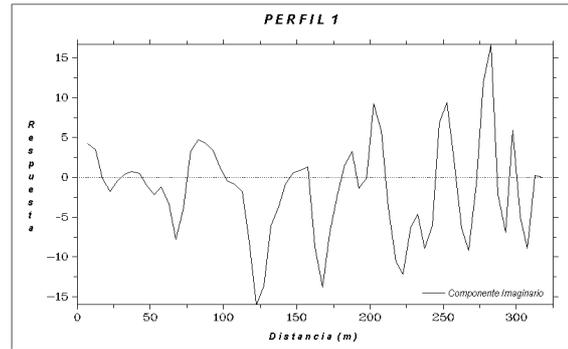


Figura 86.- Gráfica de filtrado Fraser, perfil 1 correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario perfil 1.

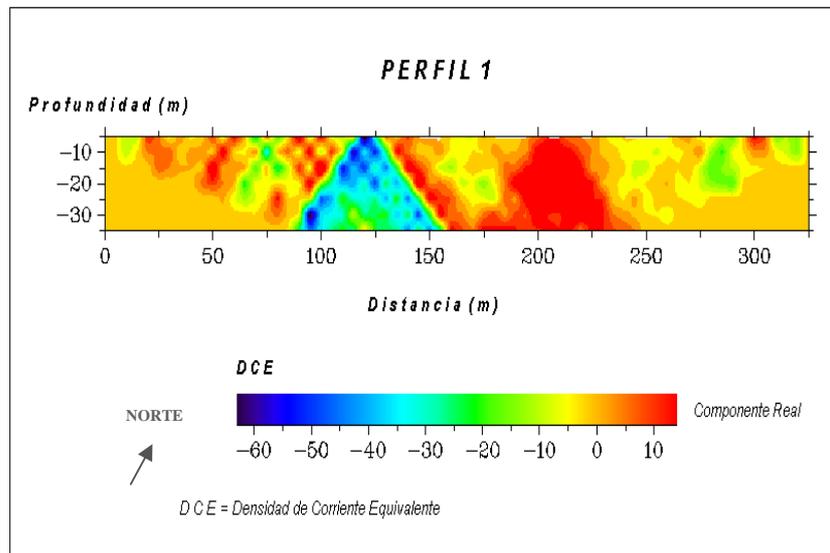


Figura 87.- Imagen del perfil 1, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.

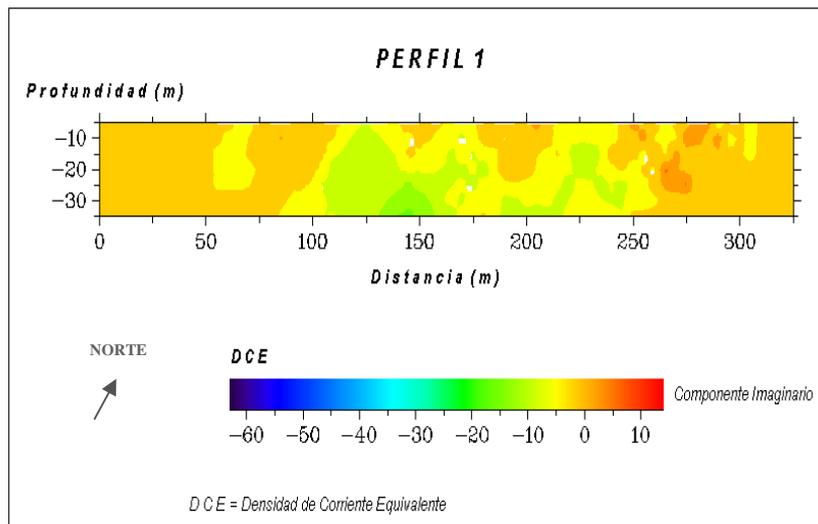


Figura 88.- Imagen del perfil 1, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008

Las imágenes anteriores que corresponden al perfil 1, presentan una anomalía con centro alrededor de 200 m y que se extiende mas allá de lo apreciado en los datos procesados de agosto de 2007, lo cual confirma que existe un flujo constante de lixiviados.

PERFIL 2

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 2.

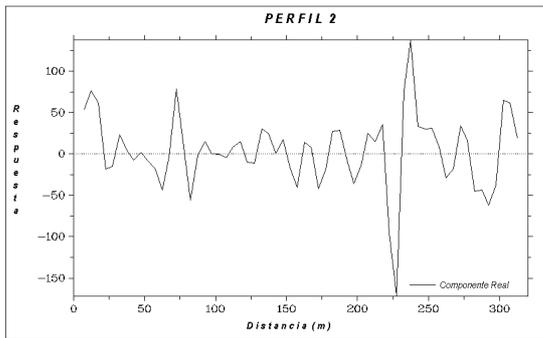


Figura 89.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2 correspondiente al componente real, febrero de 2008.

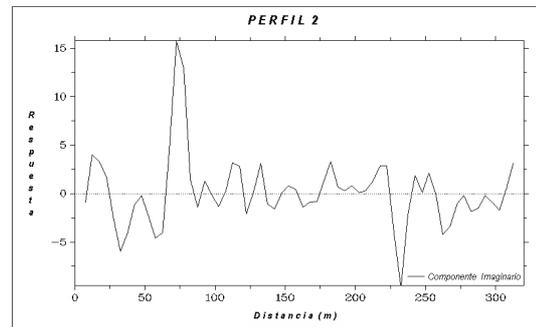


Figura 90.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 2 correspondiente al componente imaginario febrero de 2008.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 2.

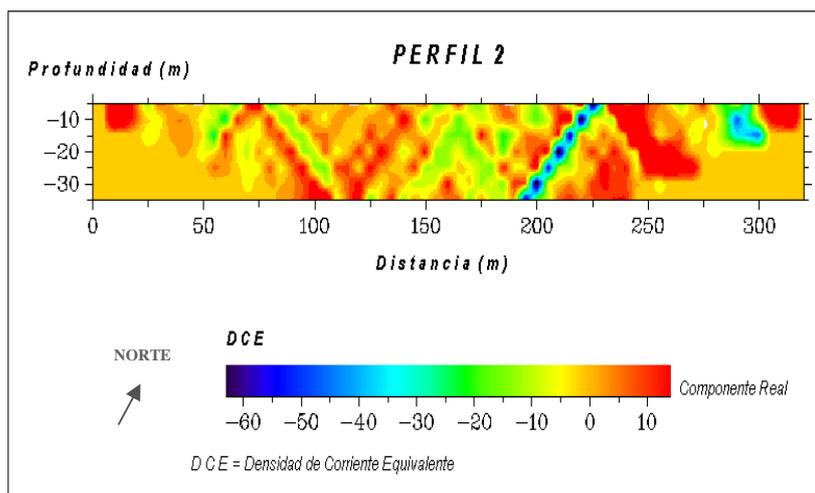


Figura 91.- Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008

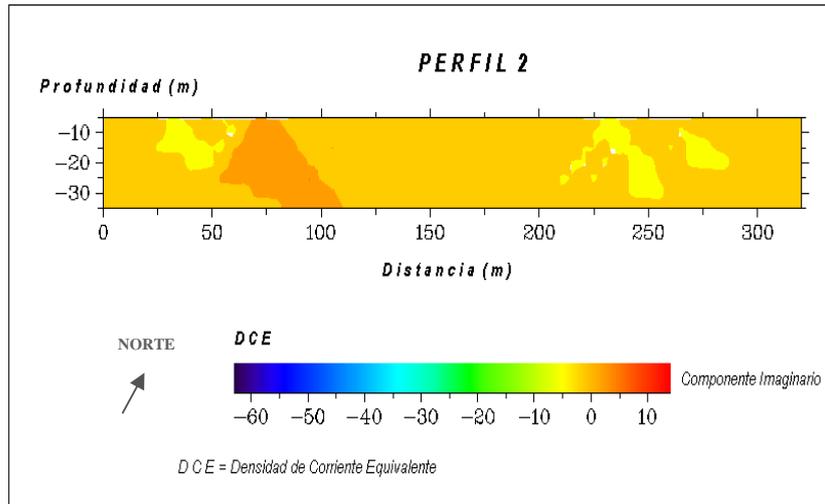


Figura 92.- Imagen del perfil 2, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.

En las imágenes y gráficas correspondientes para el perfil 2, se observan anomalías de forma diagonal con centros geométricos en 75, 125 y 175 m que sugieren la presencia de fracturas, que conducen el flujo de los lixiviados y que cubren una mayor superficie que lo observado con los datos de agosto de 2007. Empero, la presencia de materiales ferrosos afecto la resolución, por lo que fue necesario aplicar la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados de este perfil, la imagen correspondiente se presenta en la figura 110.

PERFIL 3.

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 3.

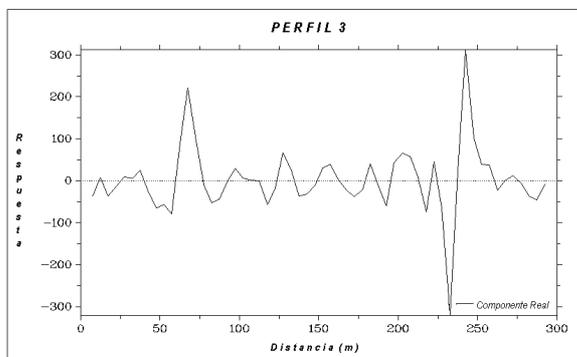


Figura 93.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 3 correspondiente al componente real, febrero de 2008.

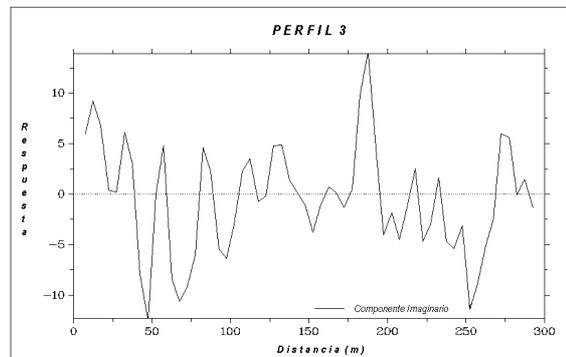


Figura 94.- Grafica de filtrado Fraser del perfil 3 correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 3.

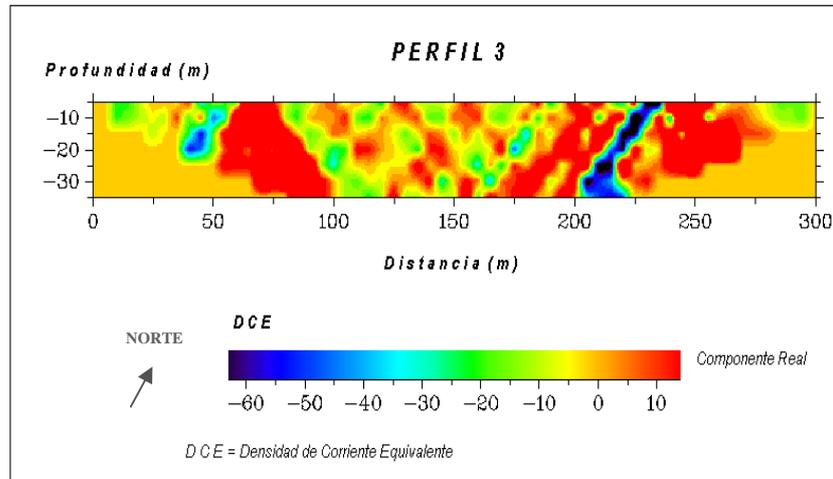


Figura 95.- Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.

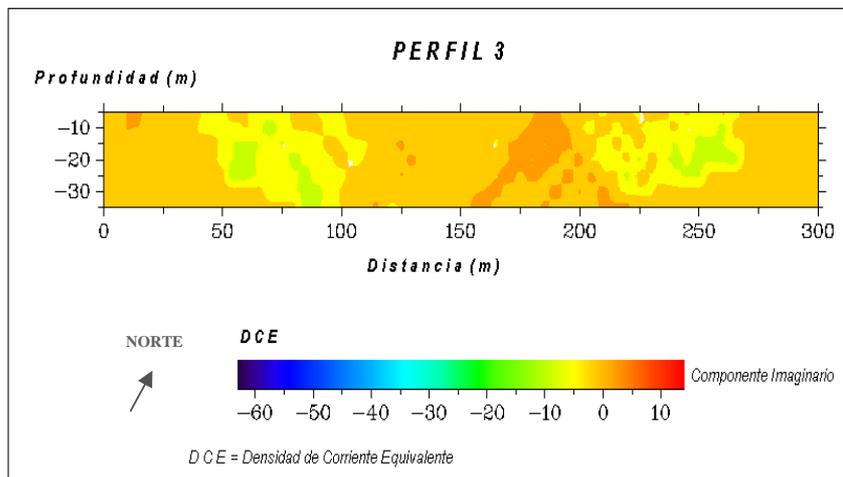


Figura 96.- Imagen del perfil 3, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.

Para este perfil 3 se había detectado una zona anómala alrededor de los 100 m, sin embargo, para los datos correspondientes a febrero de 2008, se observa un incremento de las zonas conductoras que se extienden hacia la derecha del perfil y que presentan una forma alargada en diagonal que sugieren la presencia de fracturas. Dada la presencia de materiales ferrosos en el tiradero, la resolución se vio afectada, por lo que fue necesario aplicar la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados para este perfil, la imagen correspondiente se presenta en la figura 112.

PERFIL 4

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 4.

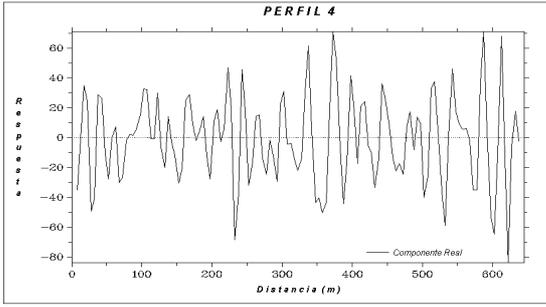


Figura 97.- Gráfica de filtrado fraser del perfil 4 correspondiente al componente real, febrero de 2008.

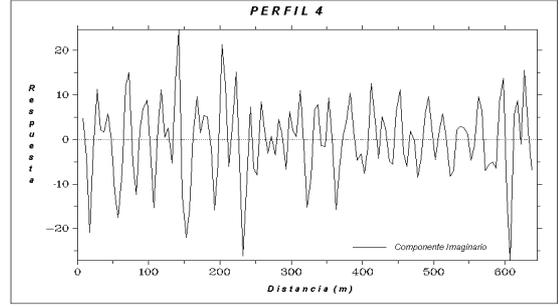


Figura 98.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 4 correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 4.

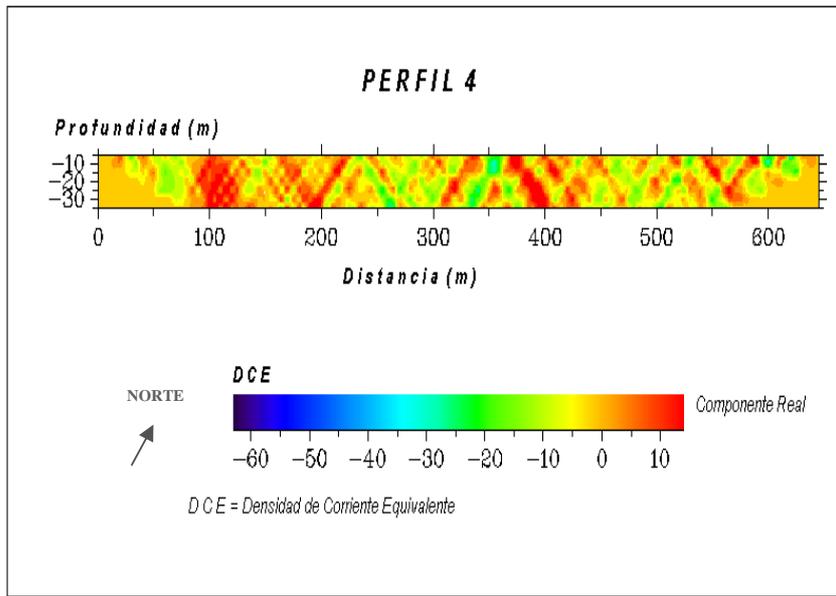


Figura 99.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.

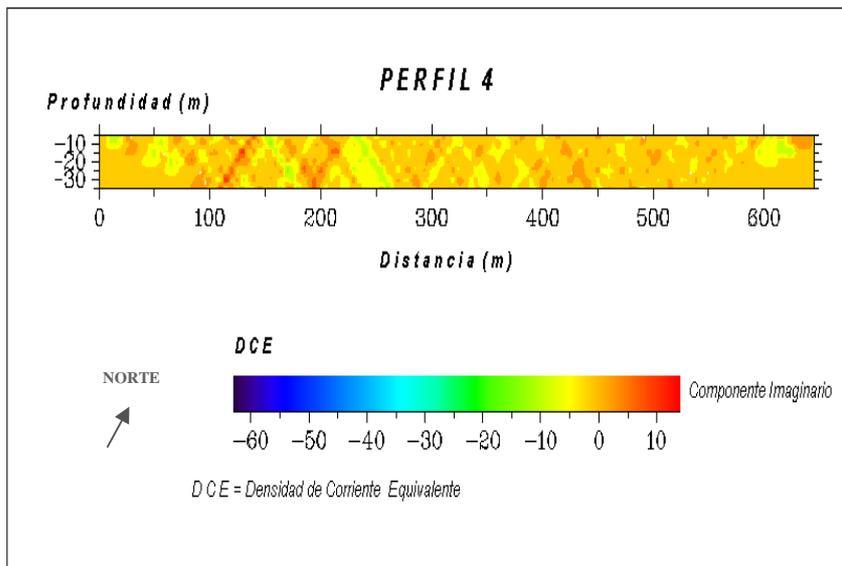


Figura 100.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.

Para este perfil, se confirma que la presencia de materiales ferrosos, afecta la resolución del equipo, ya que las graficas e imágenes presentan ruido en la señal, al igual que las de agosto de 2007, la imagen correspondiente se presenta en la figura 114.

PERFIL 5.

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser de los componentes real e imaginario para el perfil 5.

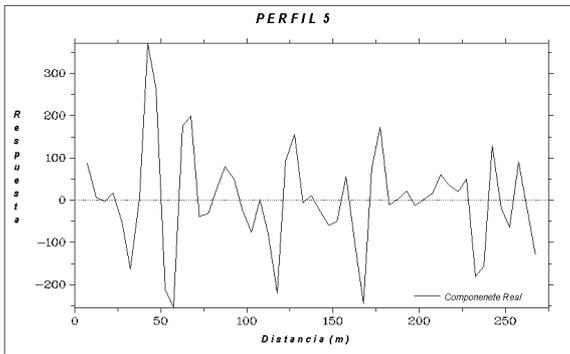


Figura 101.- Grafica de filtrado Fraser, perfil 5 correspondiente al componente real, febrero de 2008.

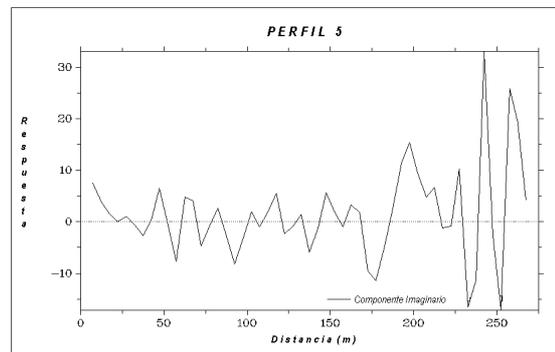


Figura 102.- Gráfica de filtrado Fraser, perfil 5 correspondiente al componente imaginario febrero de 2008.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 5.

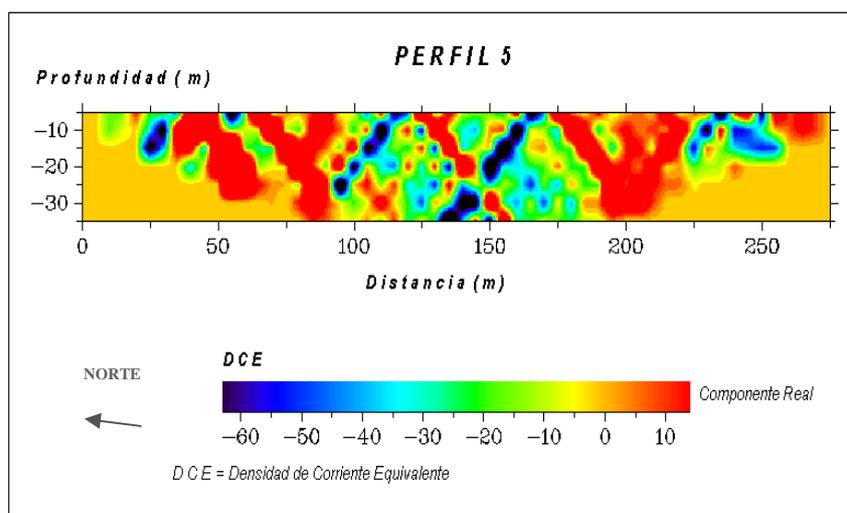


Figura 103.- Imagen del perfil 5, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.

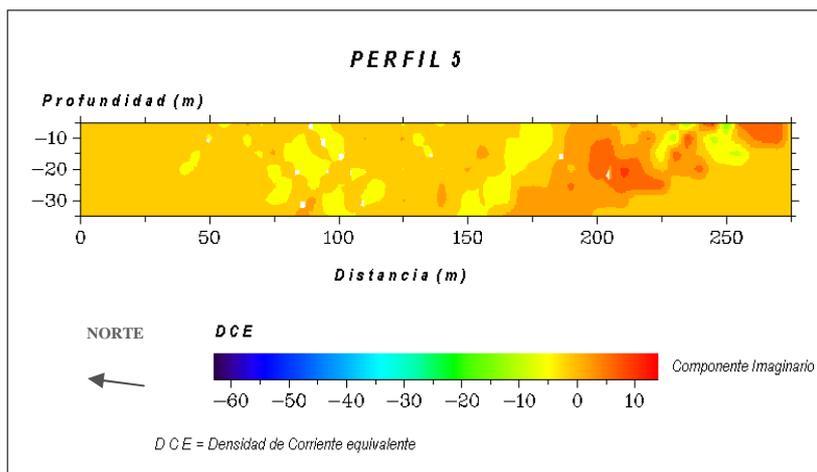


Figura 104.- Imagen del perfil 5, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.

Para el perfil 5 se observan zonas conductoras importantes con centros geométricos en 75 y 200 m, que se asocian con la presencia de facturas dadas la forma en la que se presentan. La presencia de materiales ferrosos afecto la resolución del equipo, por lo que se aplico la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados para este perfil, la imagen correspondiente se presenta en la figura 115.

PERFIL 6.

a) Gráficas correspondientes al filtrado Fraser, componentes real e imaginario para el perfil 6.

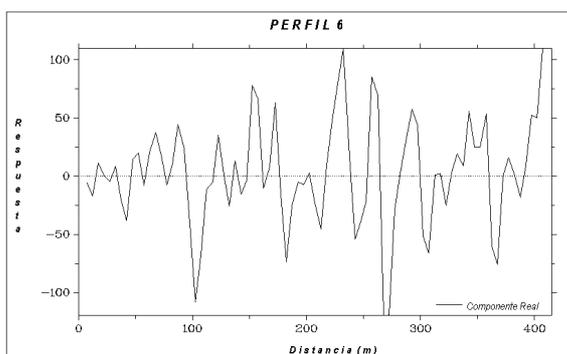


Figura 105.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 6 correspondiente al componente real, febrero de 2008.

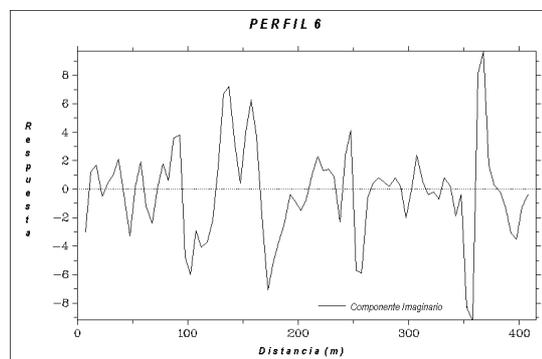


Figura 106.- Gráfica de filtrado Fraser del perfil 6 correspondiente al componente imaginario, febrero de 2008.

b) Imágenes de contorno de los componentes real e imaginario para el perfil 6.

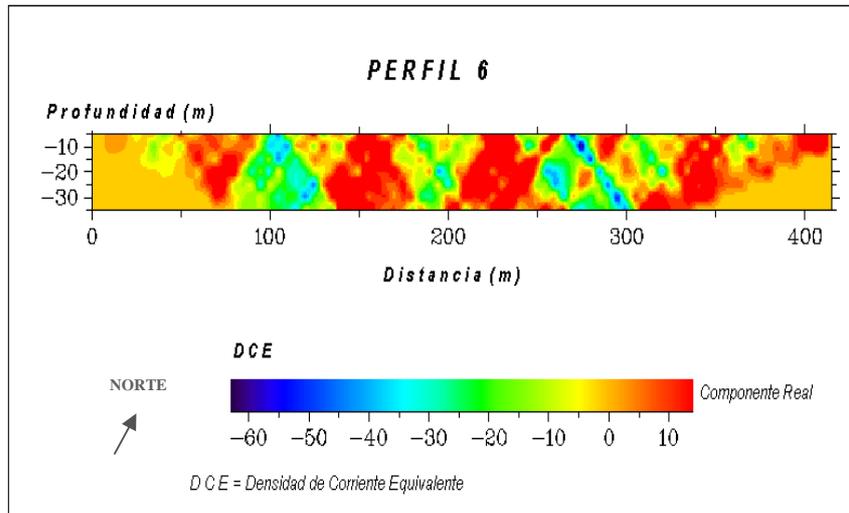


Figura 107.- Imagen del perfil 6, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008.

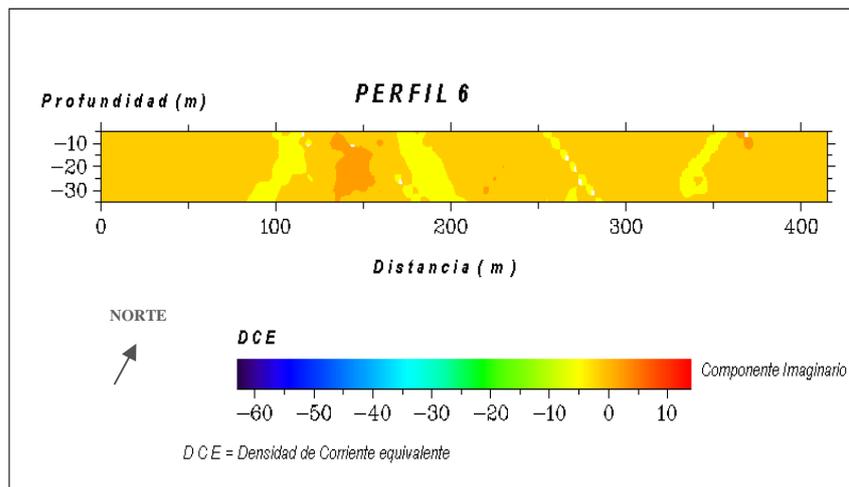


Figura 108.- Imagen del perfil 6, correspondiente al componente imaginario, con datos VLF de febrero de 2008.

Para este último perfil se observan 4 zonas conductoras, con centros alrededor de 75, 150, 225 y 325 m, las cuales se presentan de forma irregular pero con profundidades de hasta 35 m.

Para el caso de los perfiles 2, 3, 4 y 5 para los datos tomados en ambos periodos agosto 2007 y febrero 2008, los levantamientos presentaban ruido en la señal, por lo que se empleo la técnica de promedios móviles para suavizar los resultados. Aquí únicamente se

presentan las imágenes correspondientes a los datos en fase por ser los que presentan mejores resultados; obteniéndose las imágenes de contorno siguientes:

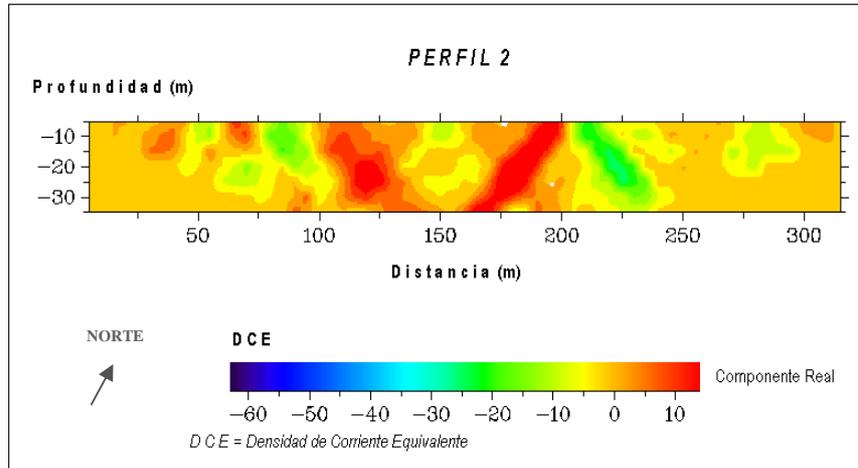


Figura 109.- Imagen del perfil 2 correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007 con promedios móviles.

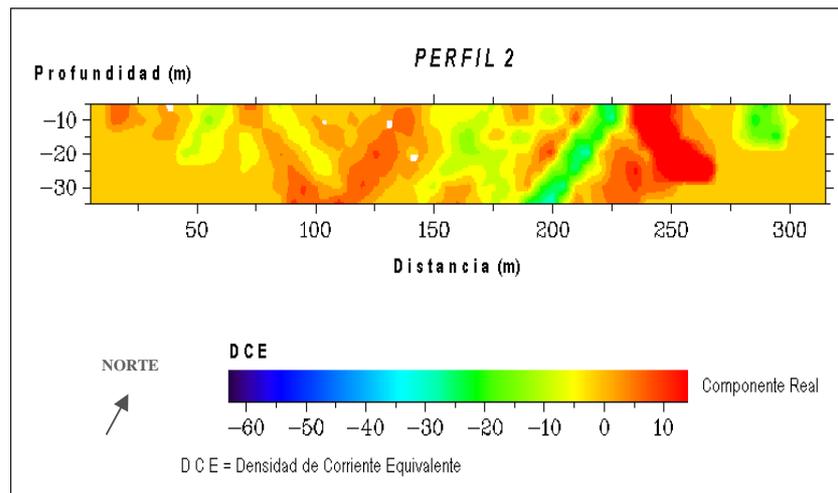


Figura 110.- Imagen del perfil 2, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.

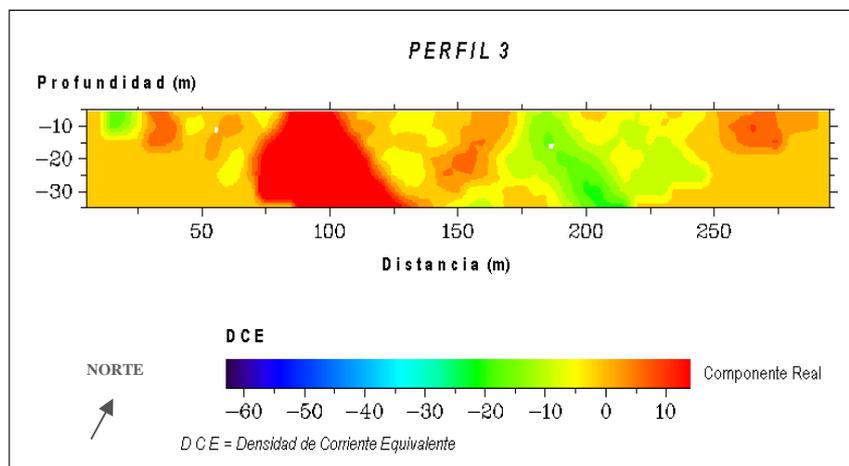


Figura 111.- Imagen del perfil 3 correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007 con promedios móviles.

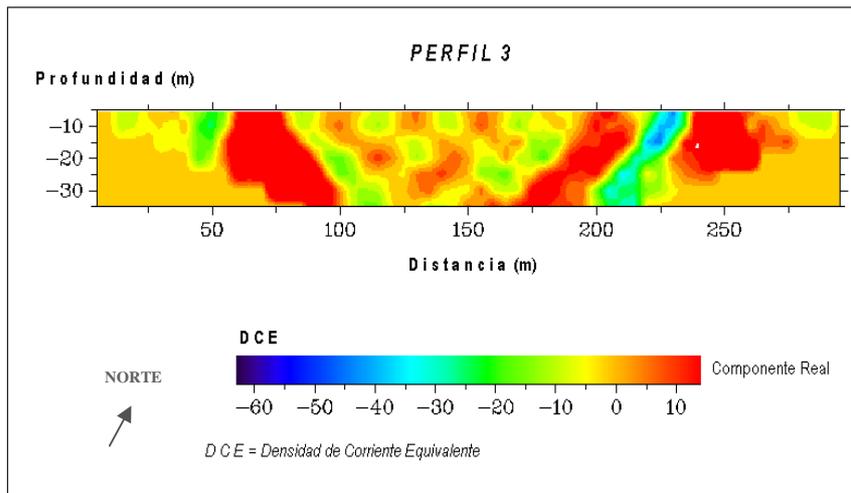


Figura 112.- Imagen del perfil 3, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.

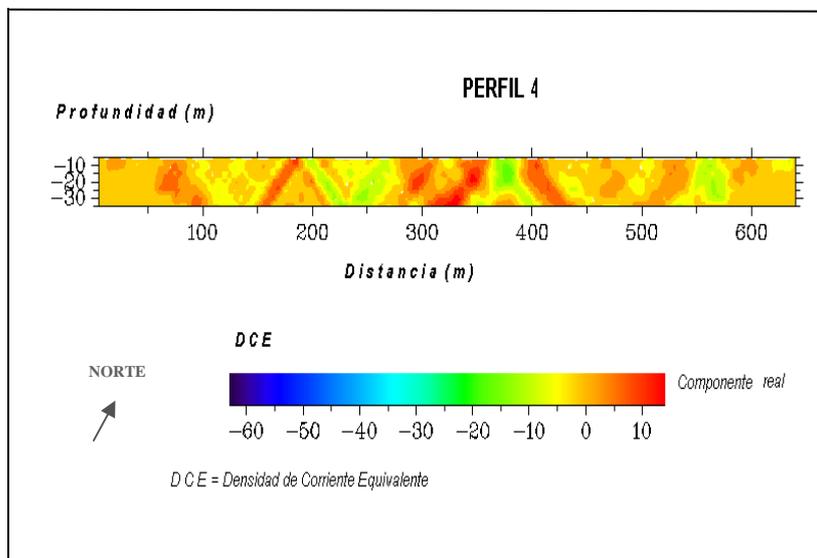


Figura 113.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de agosto de 2007 con promedios móviles.

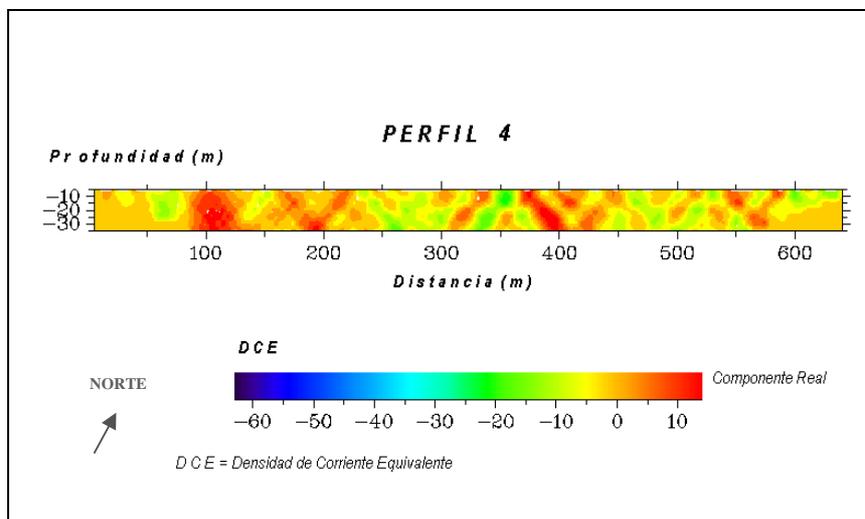


Figura 114.- Imagen del perfil 4, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles.

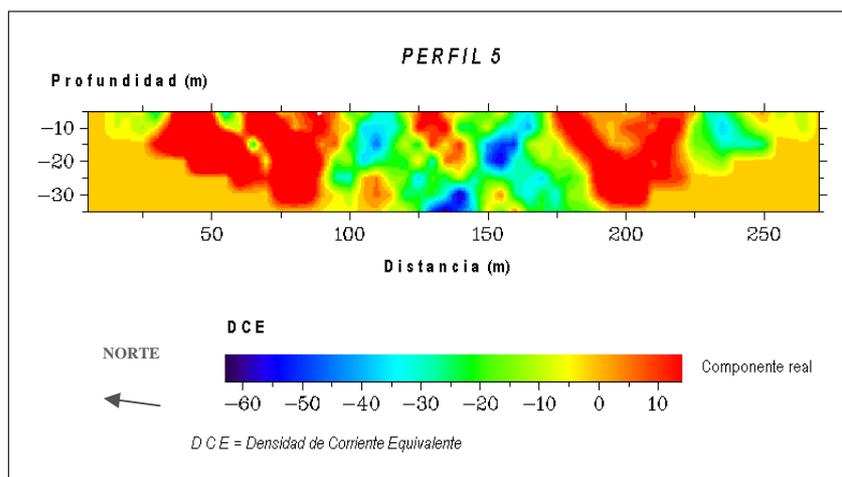


Figura 115.- Imagen del perfil 5, correspondiente al componente real, con datos VLF de febrero de 2008 con promedios móviles

En las figuras 109 y 115 se puede observar como se mejora la respuesta al aplicar los promedios móviles de tres puntos, en donde se definen zonas anómalas que presentan intensidad de corriente alta.

5.4. Análisis y discusión de resultados.

Los datos obtenidos a partir de las bobinas electromagnéticas y presentadas, en el inciso 5.2 en gráficas y finalmente por medio de imágenes de contorno de igual valor de conductividad aparente en miliSiemens por metro (mS/m), relacionan directamente la variación de la conductividad eléctrica con la profundidad, puesto que cada configuración y separación entre bobinas proporciona información para diferentes profundidades. Las imágenes obtenidas se interpretaron con base en que las conductividades aparentes se relacionan directamente con materiales conductores. Para el caso de los perfiles levantados con bobinas electromagnéticas se observa la suavización de la conductividad eléctrica aparente entre los datos observados (inciso 5.1) y los calculados (inciso 5.2).

Para el caso de los datos de VLF se procesaron los correspondientes a la fase y cuadratura ya que de acuerdo a la bibliografía revisada son las curvas que presentan mejores resultados. Se presentan los datos en forma gráfica e imágenes de contorno donde los valores más bajos de la densidad de corriente relativa corresponden a valores más altos de

resistividad. El cruce en ceros de los picos de las curvas de los perfiles (datos en fase y cuadratura) determinan la ubicación de los cuerpos conductores en el subsuelo.

La interpretación cualitativa de los datos de VLF se basó en procedimientos de filtrado, utilizándose los métodos de Fraser y Karous-Hjelt utilizados ampliamente en el procesado de los datos de VLF (Fraser, 1969; Karous y Hjelt, 1983); donde el filtro de Fraser transforma los puntos de cruce en picos que realzan las señales de las estructuras conductoras. Una vez aplicado el filtro Fraser el cruce en cero de los puntos se transformaron en picos mejorando la señal, donde la falla del subsuelo puede caer directamente bajo el pico del perfil filtrado. El filtrado de Karous-Hjelt se utilizó para obtener pseudo-secciones relativas de la densidad corriente.

Analizando detalladamente las imágenes de contorno obtenidas de los perfiles 1 al 6 con los datos relativos de agosto de 2007 y febrero de 2008, se pueden inferir que para el caso del perfil 1 (Figura 116) la conductividad eléctrica presenta una anomalía importante con centro alrededor de los 200 m aproximadamente, teniendo variaciones en cuanto a extensión y profundidad de acuerdo a cada método geofísico empleado (bobinas EM y VLF) y a la fecha de toma de los datos, otra anomalía detectada en este perfil se observa con centro alrededor de los 300 m y en cuyo caso la respuesta del VLF la detecta en forma puntual sin exceder a los 10 m de profundidad, sin embargo las bobinas detectan una zona conductora más amplia para este punto. La conductividad en general en este perfil varía de 60 a 350 mS/m. Ambas anomalías presentan congruencia con lo observado en campo en cuanto a manchas de lixiviados y escurrimientos superficiales.

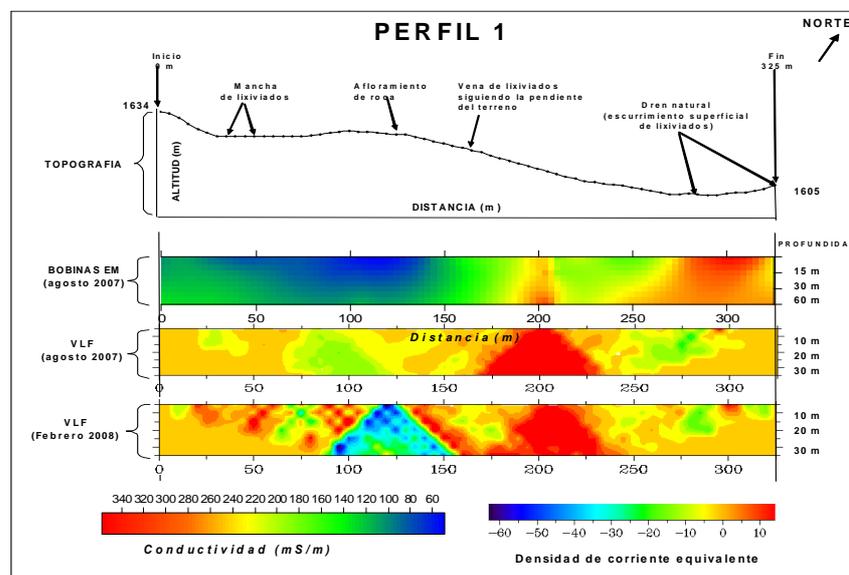


Figura 116.- Imagen para el perfil 1, en donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.

Para el perfil 2 (figura 117) se observan que la imagen obtenida con datos de bobinas electromagnéticas sugieren la presencia de 3 zonas conductoras que varían de 70 a 105 mS/m cuyos centros se encuentran en 25, 100 y 200 m respectivamente a profundidades mayores de 10 m. Para el caso de VLF presenta dos anomalías de forma irregular con centros en 125 m y 175 m en agosto de 2007 y que siguen presentes hasta febrero de 2008 desplazadas hacia la derecha del perfil.

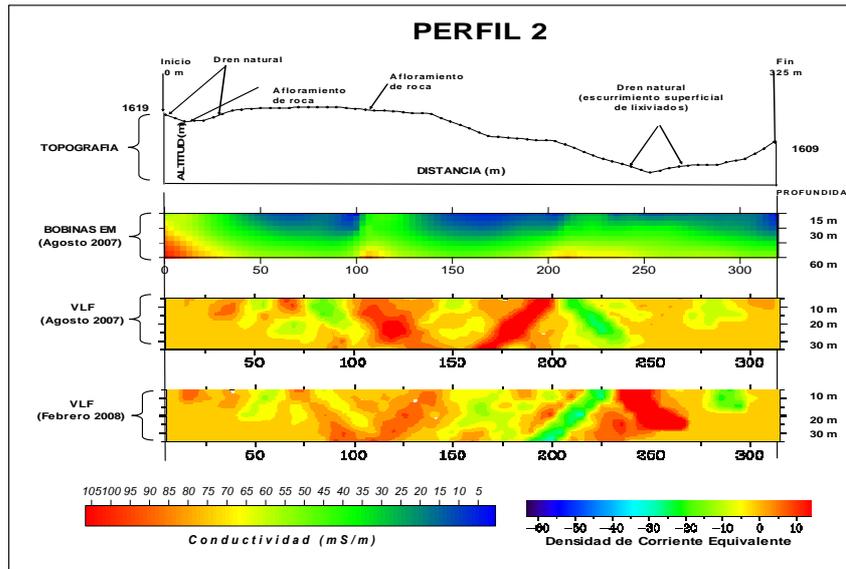


Figura 117.- Imagen para el perfil 2, donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.

Para el perfil 3 (figura 118), las bobinas electromagnéticas sugieren la presencia de una zona anómala al extremo del perfil con centro alrededor de 25 m a una profundidad de 20 a 60 m y la variación de la conductividad se encuentra entre 50 a 230 mS/m. Para el caso de VLF presenta una anomalía con centro alrededor de los 100 m en agosto de 2007 y que sigue presente hasta febrero de 2008 desplazada hacia la izquierda del perfil, lo cual confirma que los lixiviados han permanecido a través del tiempo; también se observa una anomalía de forma irregular con desplazamiento diagonal y cuyo centro se encuentra aproximadamente alrededor de los 180 m y que puede estar siendo generada directamente por el escurrimiento de lixiviados que circula por el dren existente y cuyo centro geométrico se encuentra alrededor de los 280 m.

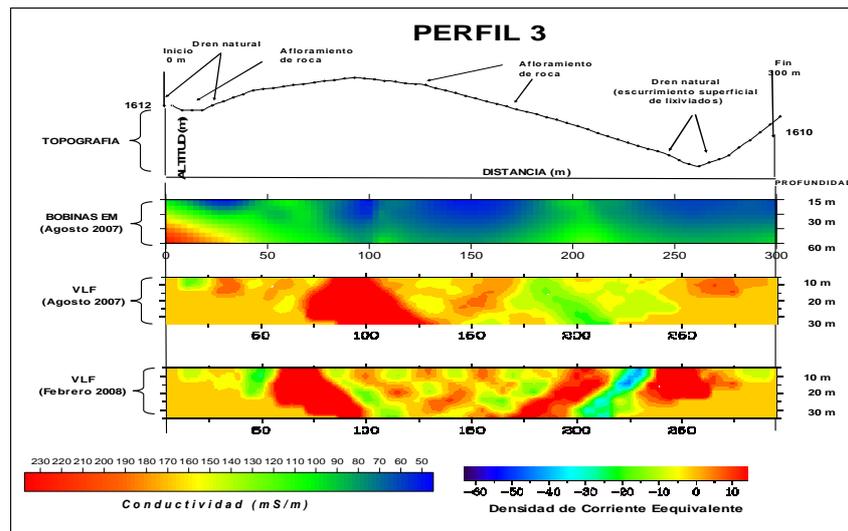


Figura 118.- Imagen para el perfil 3, donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.

Para el perfil 4 (Figura 119) los datos de bobinas presentan dos zonas anómalas, una con centro alrededor de 140 m y otra que inicia en 280 m aproximadamente, a una profundidad comprendida entre 0 a 60 m, la conductividad aparente para este perfil varía de 100 a 280 mS/m. Las zonas anómalas se asocian a la presencia de lixiviados. En los datos de VLF se observa que existen anomalías que presentan una forma irregular con desplazamiento en diagonal distinguiéndose sus centros en 100, 200, 300 y 400 m y se presentan tanto en agosto 2007 como en febrero de 2008. La forma de estas anomalías sugiere la presencia de fracturas con contenidos de lixiviados. Para este perfil se pueden inferir fracturas con dirección norte – sur y este –oeste, debido a la forma que se presentan las anomalías.

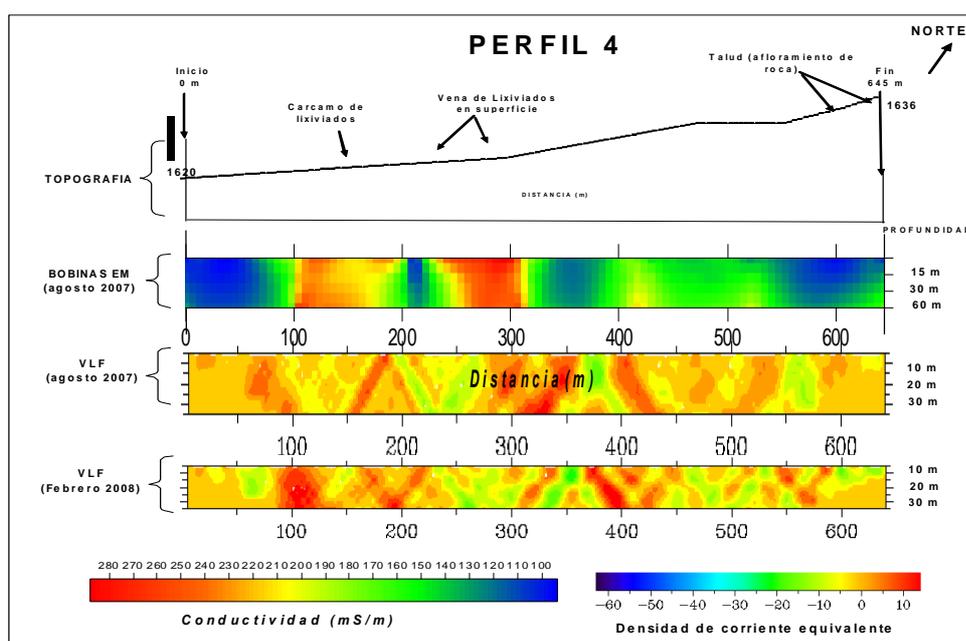


Figura 119.- Imagen para el perfil 4, donde se integran los datos de bobinas electromagnéticas y de VLF, para ambos periodos en los que se efectuaron los sondeos.

En el perfil 5 (Figura 120), que corresponde a una sección de VLF, se pueden observar dos zonas anómalas importantes en los costados laterales y una pequeña en la parte central con desplazamiento en diagonal. Para el caso del perfil 6 (figura 121) que también representa una sección de VLF, se observan 4 zonas anómalas a lo largo del perfil con centros en 75, 150, 230 y 325 m respectivamente con profundidades que abarcan los 35 m

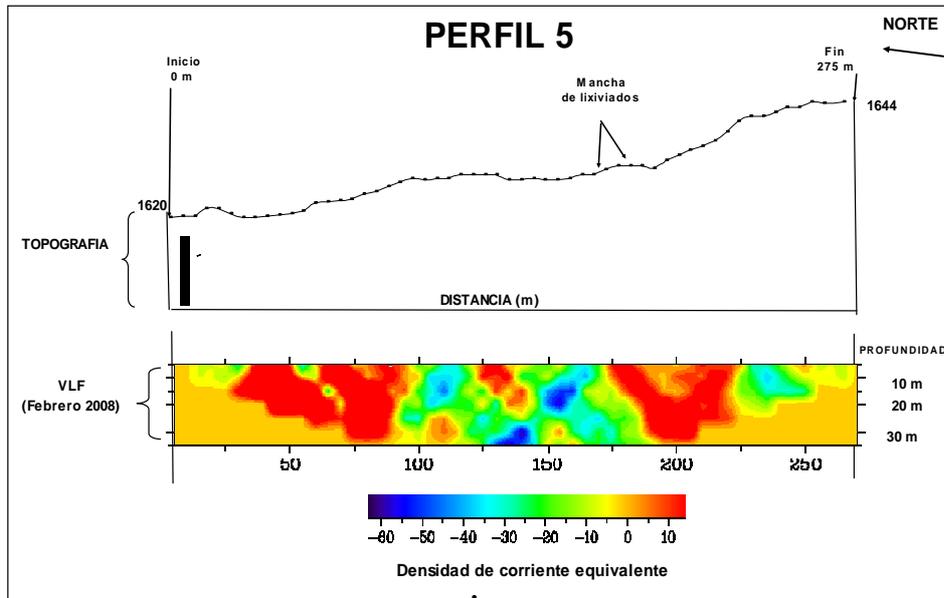


Figura 120.- Imagen del perfil 5, sólo para datos VLF de febrero de 2007

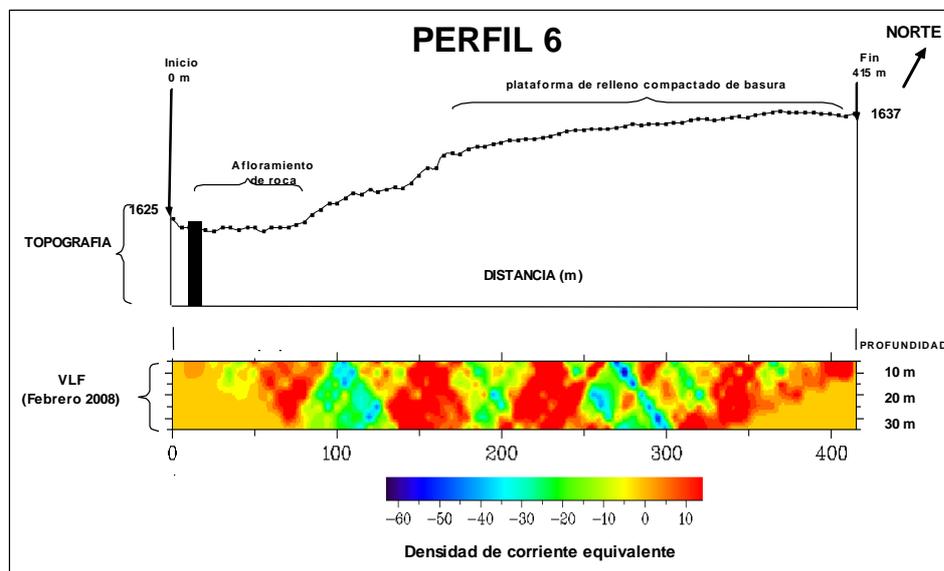


Figura 121.- Imagen del perfil 6, sólo para datos VLF de febrero de 2007

Cabe mencionar que las imágenes de las figuras 116 a la 121, fueron realizadas a partir los datos e imágenes presentados en el inciso 5.1 y 5.2 , y que en todos los casos la

profundidad de exploración corresponde a 35 y 60 m para el método VLF, y el de bobinas electromagnéticas respectivamente.

Se realizó una presentación en proyección de los datos obteniéndose de estas imágenes de contorno de toda el área del tiradero a distintas profundidades y en las cuales se pueden observar las diversas anomalías existentes en la zona de estudio. Estas imágenes se presentan en las figuras 122 y 123 para el caso de los datos obtenidos mediante las bobinas electromagnéticas con dipolo vertical y horizontal respectivamente, y en las figuras 124 y 125 para el caso de VLF para los periodos 2007 y 2008.

Las imágenes de contorno presentadas en las figuras 122 y 123 revelan una anomalía conductora principal en la parte sur-este del basurero que de acuerdo a su forma se incrementa hacia la parte central del mismo y que se puede apreciar hasta una profundidad teórica de 60 m, si se observan ambas figuras, coincidentemente esta anomalía coincide con la zona por donde se encuentra el dren natural a lo largo del cual fluyen los lixiviados; observándose también otra anomalía importante en la parte sur-oeste a una profundidad de 30 m, y que al parecer llega hasta los 60 m de profundidad.

Para el caso de VLF (figuras 124 y 125) se aprecia en la figura 124 las mismas anomalías detectadas con las bobinas electromagnéticas, a partir de los 15 m de profundidad, y de menor extensión, desplazándose hasta la profundidad de 35 m. En los datos de febrero de 2008 dichas anomalías se extienden en número y superficie, observándose anomalías irregulares que varían de tamaño de acuerdo con la profundidad.

Las imágenes de proyección para los datos de VLF (figura 124 y 125), se obtuvieron a partir de los datos procesados para cada uno de los perfiles de VLF estudiados, de tal forma que se agruparon para cada profundidad de exploración, obteniéndose imágenes de contorno para 5, 15, 25 y 35 m que presentan zonas conductoras. Con el propósito de integrar información geológica relevante para la investigación, se determinó la dirección de la fracturas, para ello se orientaron los perfiles dentro y en el perímetro del tiradero, respecto a su posición geográfica, tal y como se aprecia en la figura 126, de tal manera que se pudo inferir su orientación, la cual se plasmó posteriormente en los modelos geológicos – geofísicos.

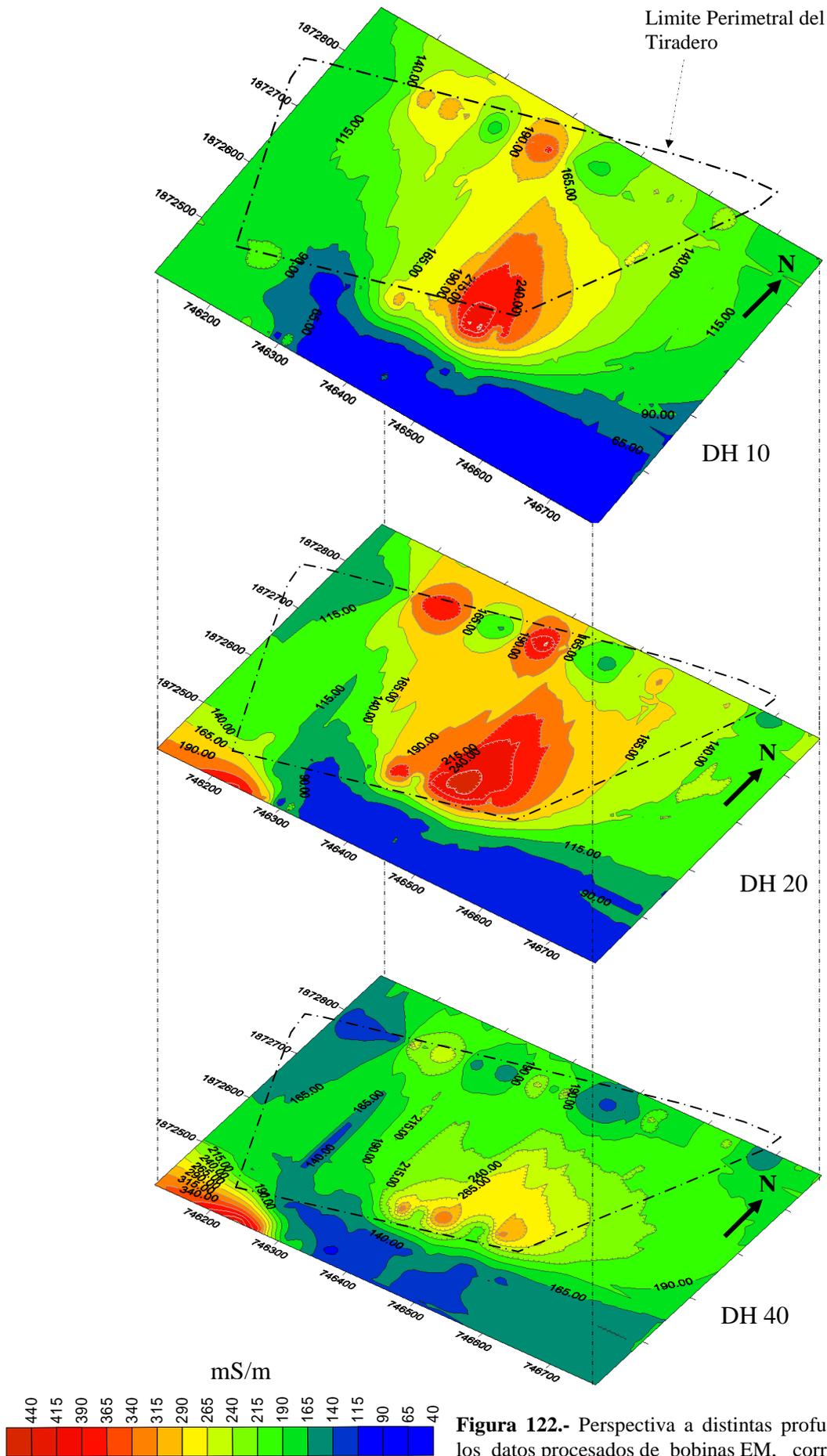


Figura 122.- Perspectiva a distintas profundidades para los datos procesados de bobinas EM, correspondientes a la modalidad de dipolo horizontal, agosto 2007. Donde DH10, DH20 y DH40 son separaciones entre las bobinas.

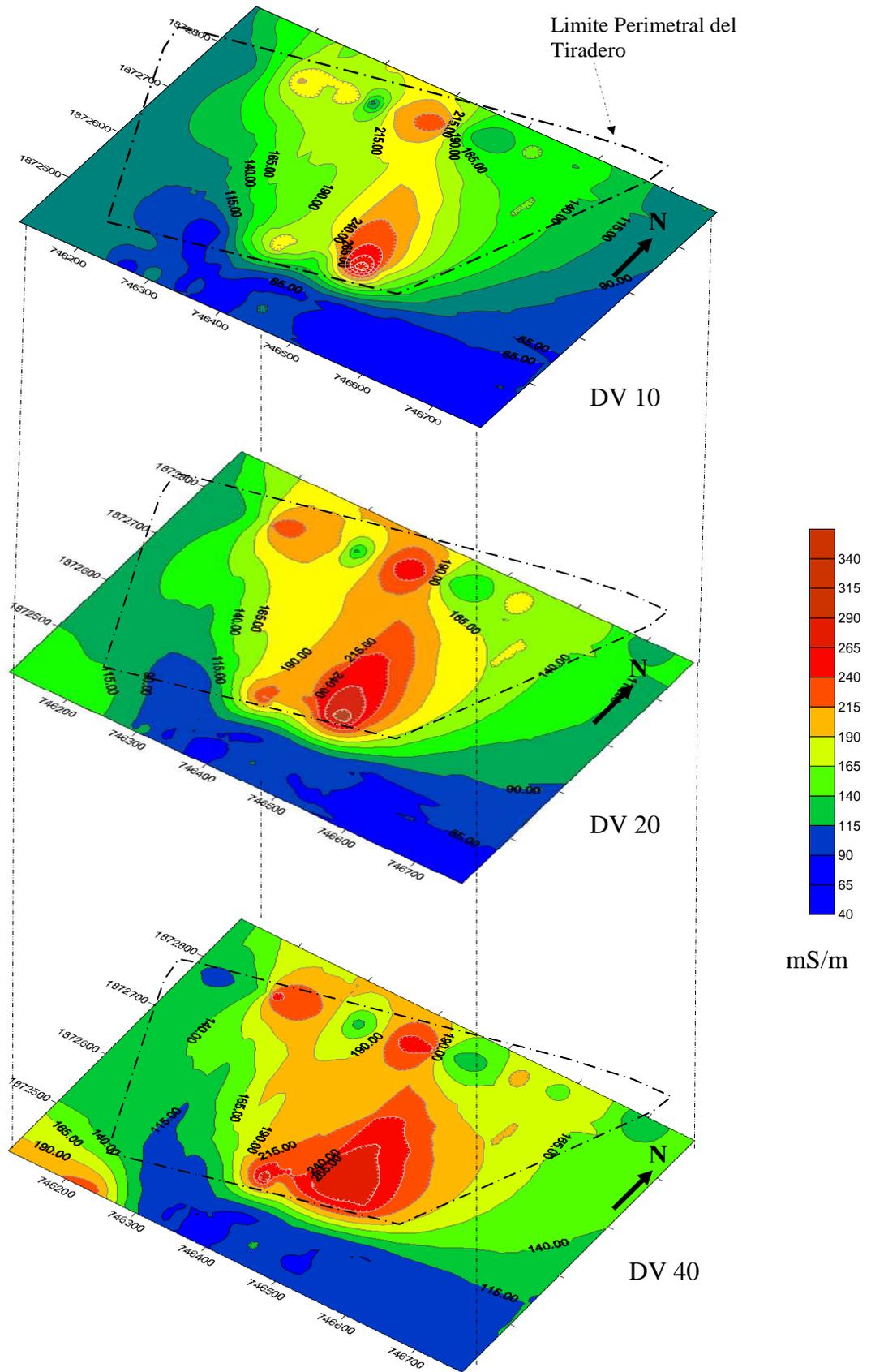


Figura 123.-Perspectiva a distintas profundidades para los datos procesados de bobinas EM, correspondientes a la modalidad de dipolo vertical, agosto 2007. Donde DV10, DV20 y DV40 son separaciones entre las bobinas.

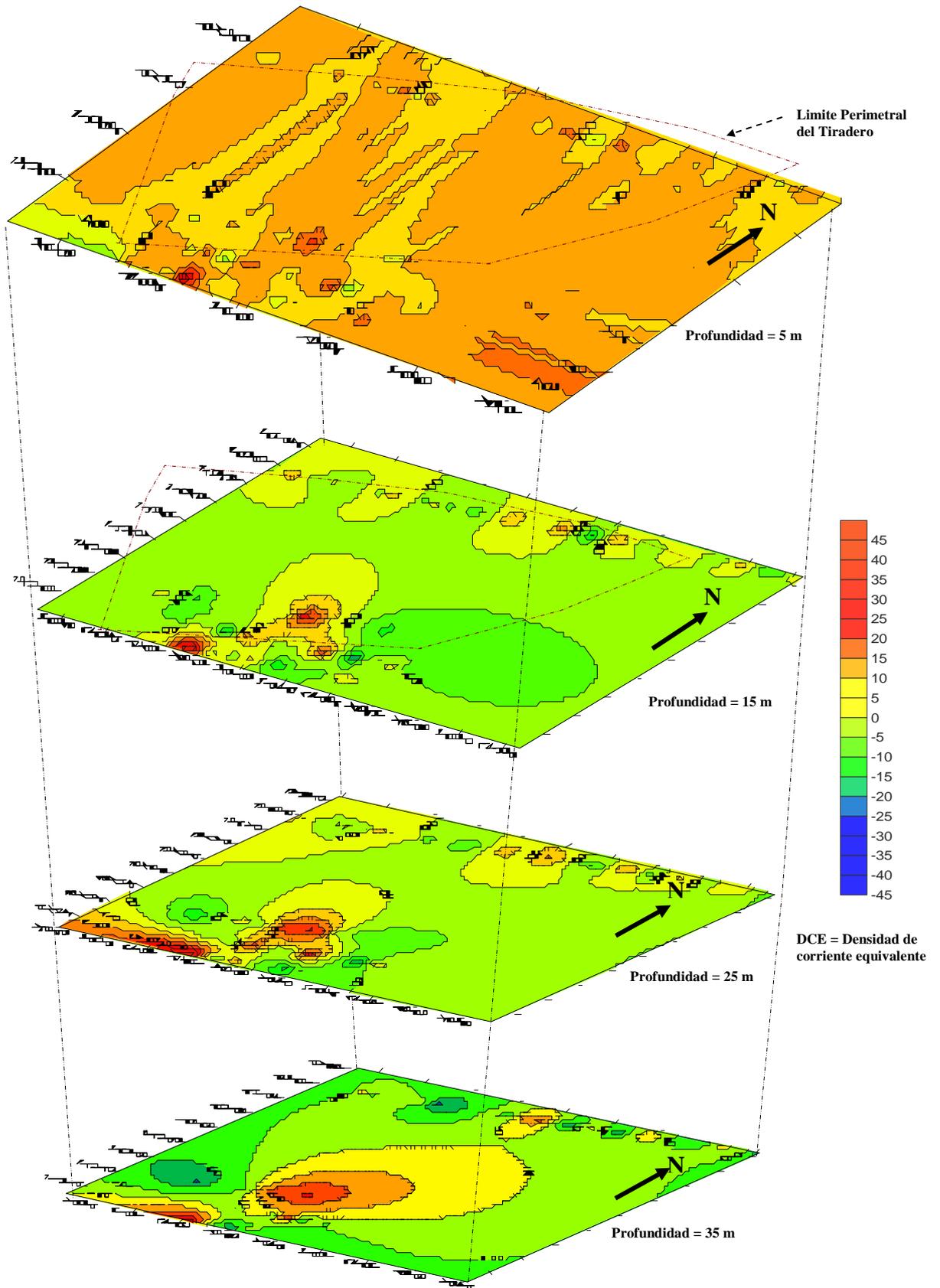


Figura 124.-Perspectiva a distintas profundidades, con los datos procesados de VLF correspondientes al periodo de agosto 2007.

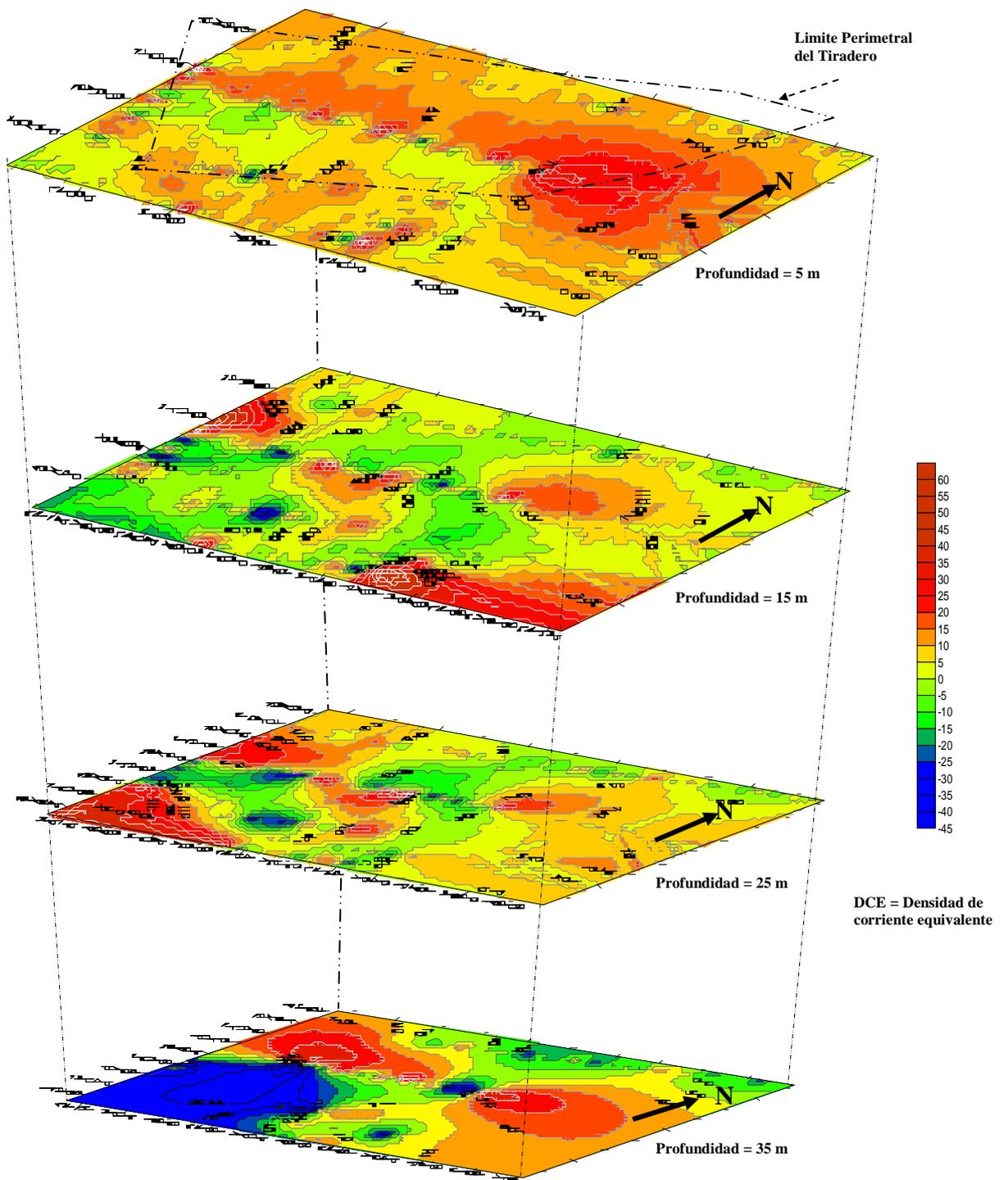


Figura 125.-Perspectiva a distintas profundidades, con los datos procesados de VLF correspondientes al periodo de febrero de 2008.

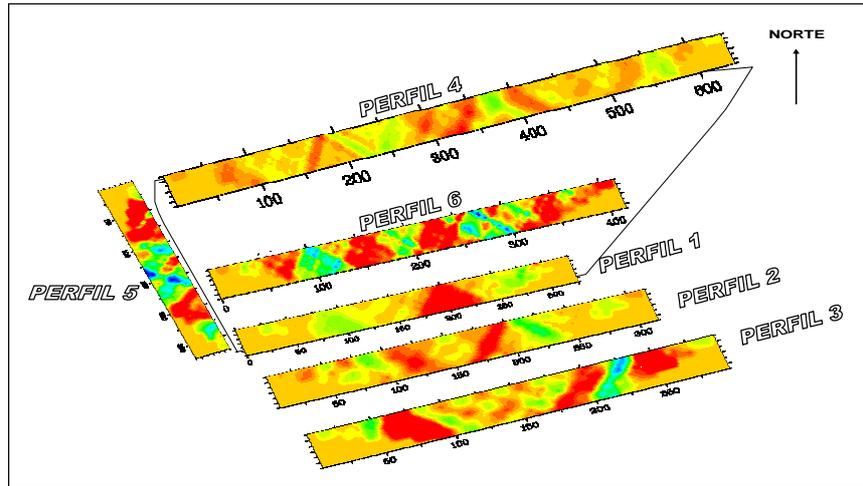


Figura 126.- Orientación de los perfiles estudiados dentro y en el perímetro del tiradero de la ciudad de Oaxaca.

Para la realización de los modelos geológicos-geofísicos se tomaron en cuenta las imágenes donde se integran los datos de campo, de bobinas electromagnéticas y de VLF, así como los datos geológicos observados donde la división estratigráfica del subsuelo de los diferentes perfiles estudiados, así como la distribución espacial de los lixiviados. Además se consideró que la estructura en la zona que está compuesta por plegamientos que tienen una dirección preferencial NW–SE (figura 127), tanto que el buzamiento como el rumbo suelen cambiar bruscamente en espacios cortos y además que se encuentran intensamente fracturados. La dirección preferencial de estas fracturas es de NE-SW (figura 128).

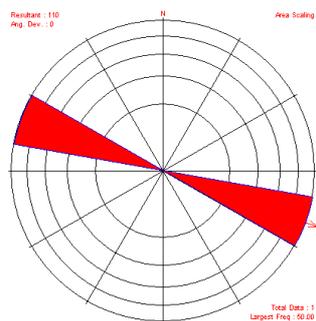


Figura 127.- Dirección preferencial de los buzamientos

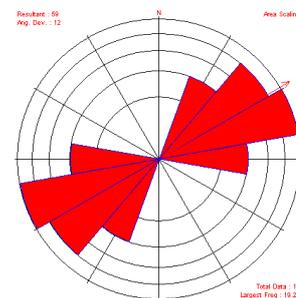


Figura 128. Dirección preferencial de las fracturas.

Los modelos geológicos geofísicos se presentan en las figuras 129 a la 134, en los cuales se incluyó información correspondiente a la topografía de los perfiles geofísicos; a la geología, por medio de la cual se determinó el rumbo y echado de las diferentes capas y/o

estratos, así como el tipo de material existente y los diferentes aspectos geológicos que caracterizan al medio donde se desarrollo el presente trabajo; y a la geofísica por medio de la cual se determinó la forma, extensión y profundidad a la que los lixiviados que se están infiltrando. Indirectamente se infiere la dirección de las fracturas involucradas. Dichos modelos reflejan una propuesta del comportamiento de las fracturas y los lixiviados en el subsuelo. En la medida que exista mayor información el modelo geológico geofísico puede ser complementado. No son modelos únicos, pero son una contribución a la comprensión de la relación entre un contaminante y un medio fracturado de geología compleja, como la que presenta el sitio donde se desarrolló esta investigación.

En la figura 129, se presenta el modelo geológico-geofísico obtenido del perfil 1, en el cual se infirió la presencia de 2 zonas anómalas importantes en la parte central del mismo. Se relacionan con zonas fracturadas debido a la forma que presentan. Dos zonas conductoras más se aprecian en este perfil en los extremos de este perfil, y ambas coinciden con drenes naturales existentes. El extremo NW no presenta flujo superficial aparente, como él del lado SE, en el cual es evidente el escurrimiento de los lixiviados. La topografía es un tanto accidentada y la geología está representada por alternancias de arenisca – lutita fracturada. Este perfil se ubica cerca del perímetro sur del tiradero.

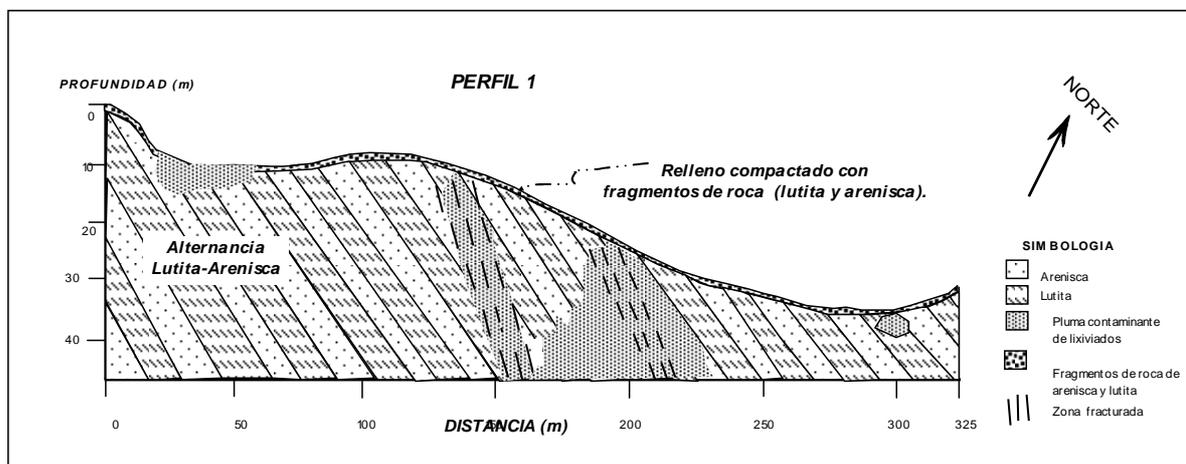


Figura 129.- Modelo geológico – geofísico del perfil 1

El modelo geológico-geofísico asociado al perfil 2 se muestra en la figura 130, el cual se ubica en el lado sur, en el exterior del tiradero. Presenta 4 zonas conductoras importantes. Por la forma de 3 de ellas, estas se asocian a la presencia de fracturas con dirección N-S y en menor cantidad de E-W, por donde se están infiltrando los lixiviados. Las del extremo

(NW) presenta poca profundidad de penetración en comparación con todas las demás. El perfil es accidentado y la geología presenta alternancia de lutita-arenisca con una capa superficial compuesta de fragmentos de roca de lutita y arenisca.

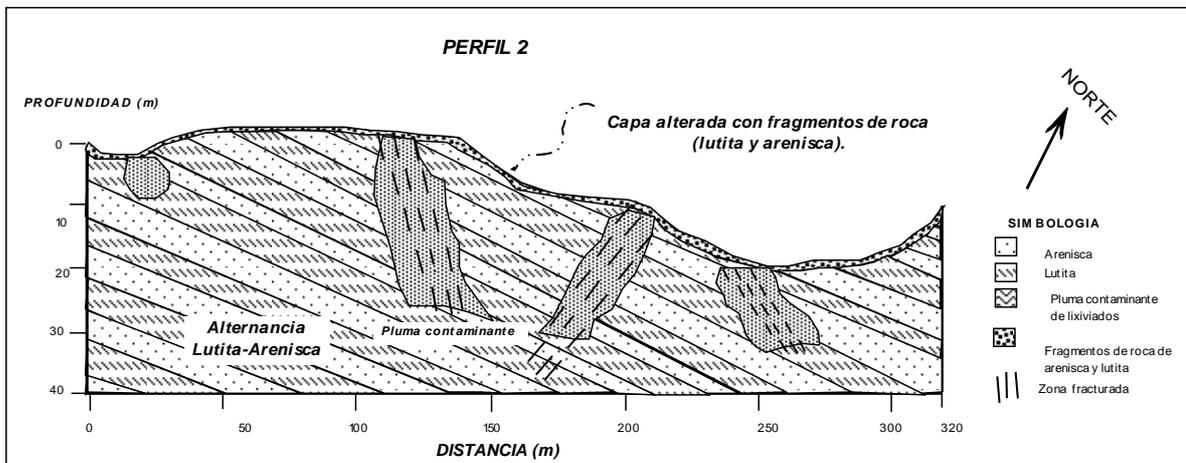


Figura 130.- Modelo geológico – geofísico del perfil 2

Para el perfil 3, se obtuvo el modelo geológico–geofísico que se presenta en la figura 131, donde se muestran tres zonas anómalas, dos de ellas del lado SE del perfil y una del lado NW, donde se infiere la distribución de la pluma contaminante de los lixiviados que están siendo infiltrados en el subsuelo a través de las fracturas existentes. Cabe mencionar que para este perfil no era tan evidente la presencia de los lixiviados, ya que no se encontró evidencia en la parte superficial del terreno, sólo en el extremo SE por donde se observó claramente que fluyen los lixiviados y que siguen la topografía del lugar. La geología que presenta este perfil es de una capa delgada de fragmentos de roca arenisca-lutita y posteriormente alternancias de lutita-arenisca.

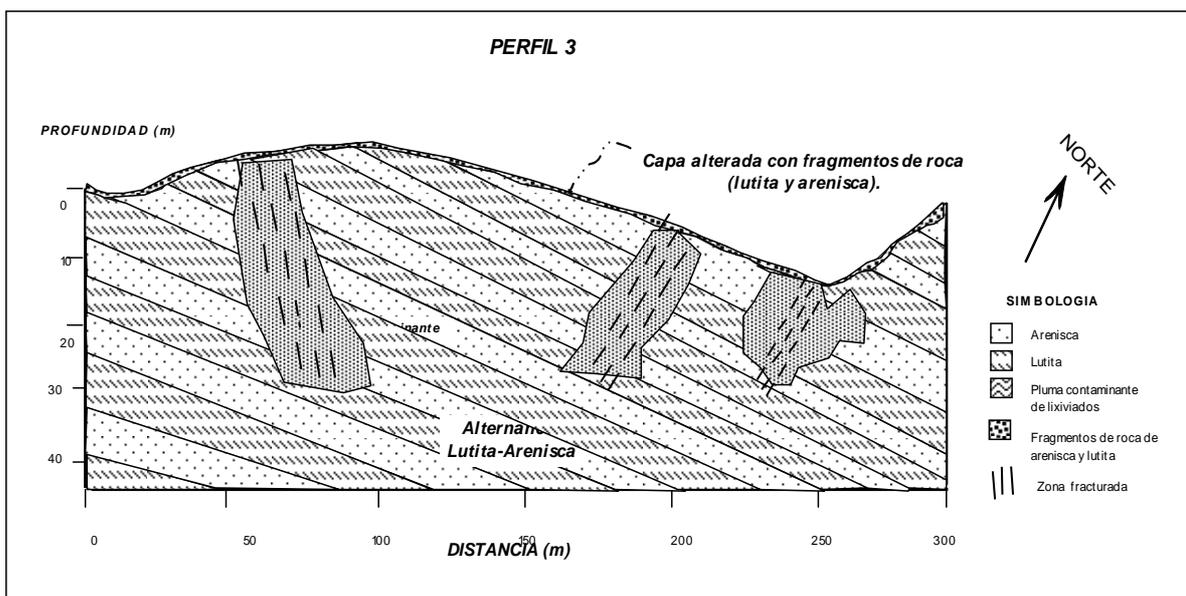


Figura 131.- Modelo geológico – geofísico del perfil 3

La figura 132, muestra el modelo geológico-geofísico obtenido para el perfil 4, donde se infirieron 4 zonas conductoras que transportan los lixiviados a través de las fracturas existentes, dos de ellas se ubican al centro del perfil, y dos más al inicio.

La conformación de este perfil sugiere una capa de basura con relleno arcilloso que no sobrepasa los 5 m de profundidad, a la cual le subyace la alternancia de lutita-arenisca. Este perfil fue el más largo que se realizó, cerca del perímetro norte del tiradero, donde existen construcciones de lámina, que son utilizadas por los pepenadores, lo cual afectó la señal causando ruido a los datos obtenidos. Los datos fueron filtrados para obtener imágenes de calidad, donde fue posible apreciar con claridad las zonas conductoras.

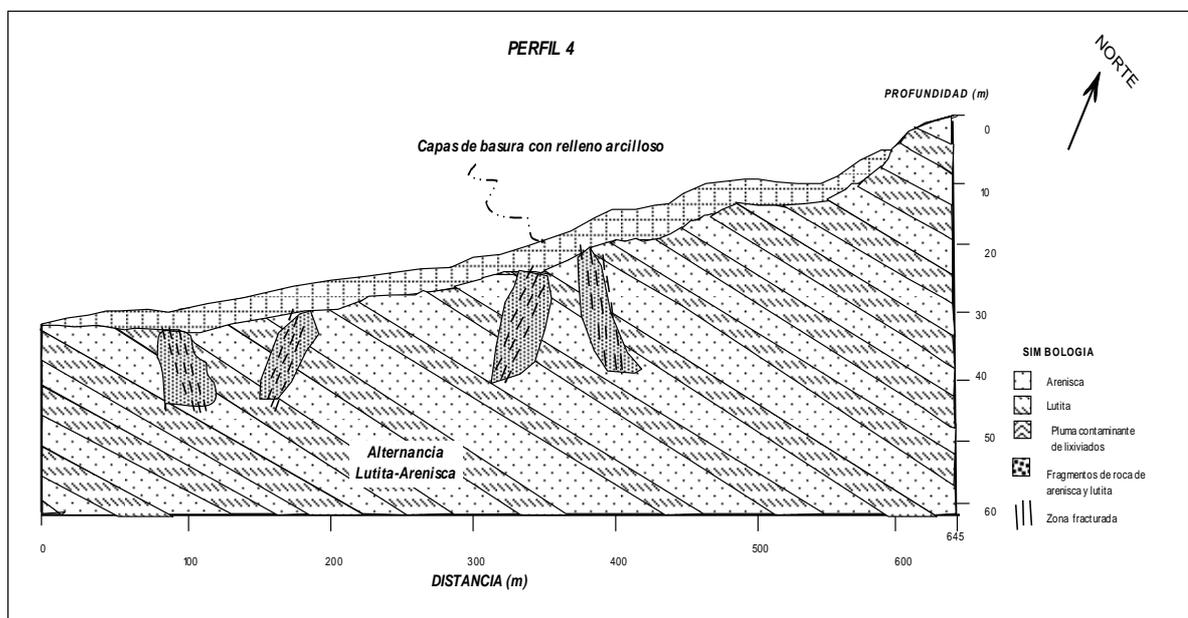


Figura 132.- Modelo geológico-geofísico del perfil 4

El modelo geológico-geofísico para el perfil 5 se presenta en la figura 133, el cual muestra 2 zonas conductoras principales, las cuales se asociaron con la presencia de fracturas debido a la forma que presentaron. Este perfil presenta una capa de basura con relleno arcilloso en la parte central del mismo, en cuyo lugar se apreció una mancha de lixiviados, cuya extensión y profundidad fue posible determinar a través del método electromagnético de VLF su extensión y profundidad. La geología que presenta es de alternancia de lutita-arenisca. Este perfil se ubica en la parte oeste del basurero.

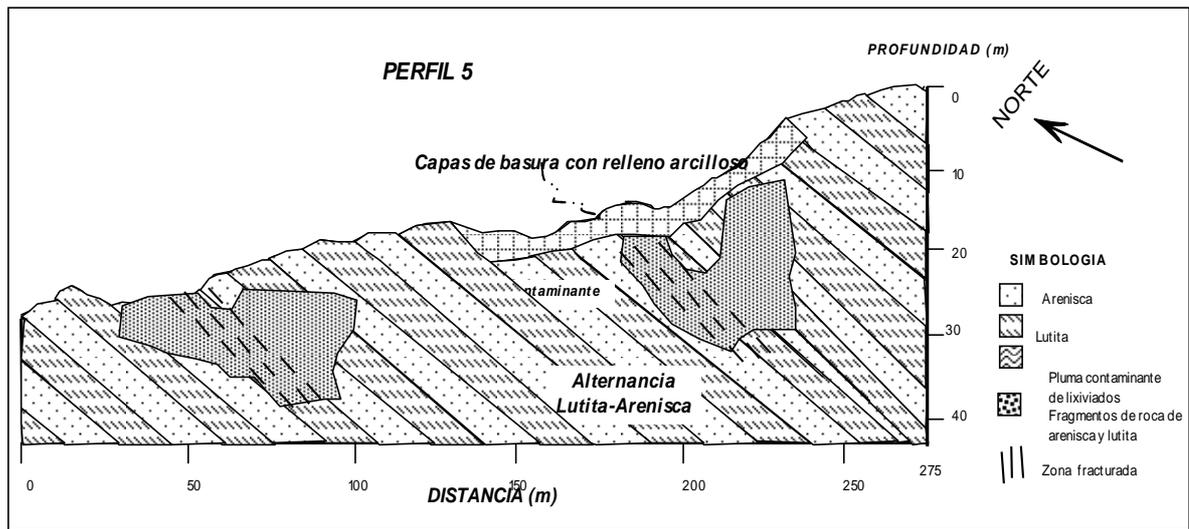


Figura 133.- Modelo geológico–geofísico del perfil 5

Finalmente, en la figura 134 se presenta el modelo geológico–geofísico para el perfil 6, el cual presenta 4 zonas conductoras que se asocian a la presencia de lixiviados y zonas de fractura, dada la forma que presentan. Este perfil se efectuó en la parte central del tiradero, por lo que casi la mitad de este se encuentra sobre una capa de basura con un espesor de más de 10 m de profundidad. La geología está representada por una alternancia de lutita-arenisca.

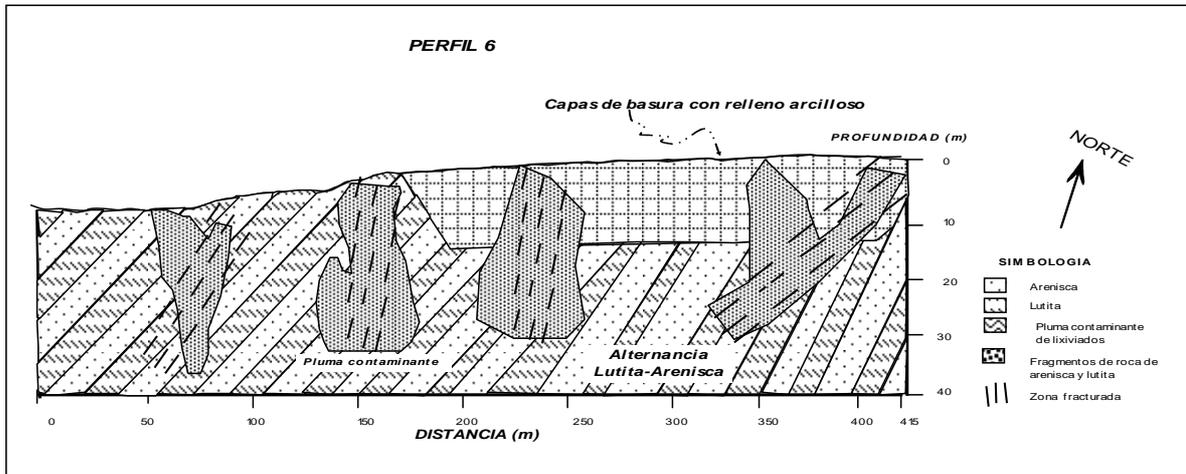


Figura 134.- Modelo geológico–geofísico del perfil 6.

El análisis de todos los modelos presentados revelan que las zonas conductoras, están relacionadas con la presencia de los lixiviados y se puede sugerir un continuo flujo de lixiviados en el tiradero de la ciudad de Oaxaca, así como que los estratos del subsuelo están siendo impregnados con este contaminante, que están circulando a través de las fracturas existentes en la zona, que llegan a profundidades teóricas de 60 m para el caso de los datos de bobinas electromagnéticas y a 35 m para el caso de VLF.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Considerando las imágenes analizadas y los modelos geológicos-geofísicos elaborados, se puede concluir que de los datos obtenidos con las bobinas electromagnéticas EM-34, muestran zonas con conductividades altas, que sugieren la presencia de los lixiviados a profundidades someras lo que indica la vulnerabilidad del medio ante la presencia de esta carga contaminante. Por otro lado, con los datos obtenidos con el método de VLF se infirieron 18 zonas fracturadas a lo largo de los perfiles estudiados, correspondiéndole dos al perfil 1, tres al perfil 2, tres al perfil 3, cuatro al perfil 4, dos al perfil 5 y cuatro al perfil 6; que favorecen el transporte de los lixiviados, con lo cual se da respuesta a la primer hipótesis planteada. Por lo que se determinó que la presencia de las capas de tierra y basura no afectó la respuesta de los métodos empleados, debido a que los estratos encontrados son de poco espesor, respondiendo así a la segunda hipótesis planteada en esta investigación.

De acuerdo a la geología del lugar el sitio donde se ubica el tiradero de basura de la ciudad de Oaxaca, se localiza en un medio fracturado en donde por medio de los métodos geofísicos empleados (VLF y de bobinas EM) y evidencia de campo, se pudo inferir que la dirección preferencial de las fracturas es NW-SE, definiendo también su distribución espacial.

Por lo que de acuerdo a esta evidencia es muy probable que se esté contaminando el acuífero, que para esta zona se considera como confinado; pero sin embargo, las fracturas favorecen el flujo de los lixiviados, sirviendo como medio de transporte, permitiéndoles infiltrarse a mayores profundidades. Esto se concluye considerando que existen zonas anómalas que presentan profundidades de 60 y 35 m en el caso del método de bobinas EM y VLF respectivamente.

Finalmente se considera que el empleo de estos dos métodos (VLF y de bobinas EM) para la detección de lixiviados en el subsuelo es adecuada, ya que de manera integrada permiten evaluar zonas contaminadas. Ambos métodos son complementarios y se recomienda utilizarlos en otras zonas similares para la detección de contaminantes.

Recomendaciones.

Como recomendaciones de esta investigación se proponen las siguientes:

- 1.- Es necesario continuar la exploración geofísica de la zona del tiradero de basura, ya que el determinar la ubicación y profundidad de los lixiviados, tiene relevancia social dado el crecimiento poblacional que viene presentándose en sus periferias. La determinación de la situación espacial de los lixiviados puede servir para tomar decisiones en cuanto a dirigir el crecimiento urbano y no exponer a las personas a la contaminación ambiental y el riesgo que representa.
- 2.- Se sugiere ampliar esta investigación realizando estudios de análisis de suelo y agua en los pozos aledaños al tiradero para detectar el grado de contaminación que presentan, así como realizar la caracterización de los lixiviados.
- 3.- Es necesario establecer y perforar algunos pozos de monitoreo a fin de determinar la correlación de los resultados obtenidos, principalmente en la parte sur-este del basurero en la zona por donde se encuentra el dren natural por donde fluyen los lixiviados; ya que en este sitio se infirió la presencia de una anomalía importante.

Bibliografía

- Adepelumi, A., Yi, M., Kim, J., Ako, B., Son, J. (2006). Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, Vol. 7, Pp 1284-1306.
- Adepelumi, A., Ako, B., Afolabi, O., Arubayi. (2005). Delineation of contamination pluma around oxidation sewage-ponds in Southwestern Nigeria. *Environ Geol*, Vol. 48, Pp 1137-1146.
- Aragón, M., Belmonte, S., Navarro, S., (2006). Vulnerabilidad del acuífero del tiradero municipal de la ciudad de Oaxaca a la contaminación subterránea. XV Congreso Nacional de ingeniería sanitaria y ciencias ambientales. Pp 1-8.
- Belmonte, A. (2004). Resultados de la primera etapa del proyecto Evaluación de la contaminación subterránea generada por el tiradero de basura. SEMARNAT2001C010097. Oaxaca.
- Belmonte, S., Campos, O., Alatorre, M. (2005). Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica internacional*. Vol. 44, Pp 283-300.
- Belmonte, S., Aragón, M., Navarro, S. (2006). Monitoreo de fierro en la zona no saturada, proveniente de lixiviados del tiradero municipal de Oaxaca, a partir de métodos geofísicos. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, pp. 1-7.
- Busquets, E., Casas, A. (1995). Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos. *Física de la tierra*, Vol. 7, Pp 207-226.
- Calvo, C. (2005). Manejo integral de los residuos sólidos en la región centro de Oaxaca. Oaxaca, México: ed. Carteles editores. p73.
- Cossu, R., Di Maio, R., Fais, S., Fraghí, A., Ligas, P., Menghini, A. (2005). Physical and structural characterisation of an old landfill site by a multimethodological geophysical approach. Institute of geology environmental and engineering, Pp1-7.
- Custodio, E., Llamas, R. (1983). Hidrología subterránea. (Tomo I y II) Barcelona, España.: Oñega, S.A.
- Drahor, M. (2006). Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of applied geophysics*, Vol 50, Pp 205-223.

- Dutta, S., Krishnamurthy, N., Arora, T., Rao, V., Ahmed, S., Baltassat, J. (2006). Localization of water bearing fractured zones in a hard rock area using integrated geophysical techniques in Andhra Pradesh, India. *Hydrogeology Journal*, Vol.14. Pp 760-766.
- Eze, C., Mamah, L., Cookey, I. (2004). Very low frequency electromagnetic (VLF-EM) response from a lead sulphide lode in the Abakaliki lead/zinc field, Nigeria. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol. 5, Pp 159-163.
- Fraser, D. (1969). Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, vol.34. Pp 69-78.
- Ganerod, G., Ronning, J., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmoy, K., Nilsen, B., Braathen, A. (2006). Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bull Eng Geol Env*, Vol 65. Pp 231-243.
- Garrido, P., Sánchez, J., Ramírez, S. (2006). Saneamiento del tiradero de la ciudad de Oaxaca de Juárez. *AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y practica*, Vol. 1, Pp 1- 12.
- Gómez-Treviño, E., 1987. Nonlinear integral equations for electromagnetic inverse problems. *Geophysics*, vol. 52. pp. 1297–1302
- Himi, M., Navarro, J. V., Sabadía, J. A. , Casas, A. (2000). Delimitación de la intrusión salina en el delta del río Tordera por métodos electromagnéticos. Pp 353-359.
- Hutchinson, P., y Barta, L. (2002). VLF surveying to delineate longwall mine-induced fractures. *The Leading Edge*, Pp 491-493.
- INEGI, (2005). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, www.inegi.gob.mx.
- Jeng, Y., Lin, M., Chen, Ch. (2004). A very low frequency electromagnetic study of the geo environmental hazardous areas in Taiwan. *Enviromental Geology*, Vol. 46, Pp 784-795.
- Karous, M., Hjelt, S.E. (1983). Linear filtering of VLF dip-angle measurement. *Geophys Prospection*. Vol. 32, Pp 782-794.
- Karlik, G. (2001). Investigation of grounwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey. *Enviromental Geology*, Vol. 40, Pp 725-731.

- Kaya, M., Özürlan, G., Sengül, E. (2007). Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Çanakkale, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, Vol. 135. Pp 441-446.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente y Leyes complementarias. (2005).
- Liu, H., Liu, J., Yu, Ch., Ye, J., Zeng, Q. (2006). Integrated geological and geophysical exploration for concealed ores beneath cover in the Chaihulanzi goldfield, northern China. *Geophysical Prospecting*, Vol. 54, Pp 605–621.
- Mondelli, G., Giacheti, H., Gimenez, M., Elis, V., Hamada, J. (2007). Geoenviromental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. *Environ Geol*, Vol. 52, Pp 871-887.
- Navarro, S., Belmonte, A., Alonso, M. (2006). Investigación de la contaminación de suelo, en un área de disposición de residuos sólidos, empleando métodos indirectos: estudio de caso en el distrito de Zaachila, Oaxaca. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Pp. 1-7.
- NOM-083-SEMARNAT-2003, especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción y operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- Oskooit, B., Pedersen, L. (2005). Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. *Applied Geophysics*, Vol. 57, Pp 227– 241
- Pellerin , L., Philip, E., Wannamaker. (2005).Multi-dimensional electromagnetic modeling and inversion with application to near-surface earth investigations. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 46, Pp 71–102.
- Rozycki, A. (1995). Prospección geoelectrica de vertederos de residuos sólidos con el dispositivo de Wenner. *Física de la tierra* No. 7, Pp 227-241.
- Santos, F., Mateus, A., Figueiras, J., Goncalves, M. (2006). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method — A case study. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 60, Pp 115–125.
- Samsudin, A., Elwali, B., Zurairi, W., Hamzah, U. (2006). Mapping of contamination plumes at municipal solid waste disposal sites using geoelectric imaging technique: case studies in Malaysia. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 6, Pp 13-22.

- Sharma, S., Baranwal, V. (2005). Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating Very Low Frequency Electromagnetic and resistivity data. *Applied Geophysics*, Vol. 57, Pp. 155-166.
- Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T. (2007). Application of integrated methods in mapping waste disposal areas. *Environ Geol*, Vol. 53, Pp. 661-675.
- Telford, W. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University. United States of America.
- Young, Ch. (2002). Tabletop models for electrical and electromagnetic geophysics. *Geoscience Education*, Vol. 50, Pp. 594-601.
- Zlotnicki, J., Vargemezi, G., Mille, A., Bruere, F., Hammouya, G. (2006) State of the hydrothermal activity of Soufriere of Guadeloupe volcano inferred by VLF surveys. *Journal of applied geophysics*, Vol. 58, Pp 265-279.

Glosario

Acuífero.- Formación geológica que es capaz de almacenar y transmitir agua en cantidades significativas.

Afloramiento.- Parte de un suelo o roca visible en la superficie de la tierra.

Agua subterránea.- Agua existente debajo de la superficie terrestre en una zona de saturación, donde los espacios vacíos del suelo están llenos de agua.

Arenisca.- Roca sedimentaria compuesta por partículas de tamaño arena, cementadas o consolidadas.

Basura.- Todo residuo sólido que carece de valor para su inmediato poseedor. Están comprendidos en la definición los desperdicios, desechos, cenizas, elementos de barrido de calles, residuos industriales, de establecimientos hospitalarios y de plazas de mercado, entre otros.

Buzamiento.- Ángulo que forma la superficie de un estrato con la horizontal, medido en el plano que contiene la línea de máxima pendiente.

Campo electromagnético.- Zona del espacio donde una forma de energía se propaga a la velocidad de la luz, donde existen cambios periódicos entre la energía de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre si y compenetrados al modo de eslabones de una cadena.

Contaminación ambiental.- El agregado de materiales y energías residuales al entorno que provocan directa o indirectamente una pérdida reversible o irreversible de la condición normal de los ecosistemas y de sus componentes en general, traducida en consecuencias sanitarias, estéticas, recreacionales, económicas y ecológicas negativas e indeseables.

Cuenca hidrológica.- Área de alimentación de una red natural de drenaje, cuyas aguas son recogidas por un colector común. Desde el punto de vista topográfico las cuencas se

pueden clasificar en altas medias y bajas; por su tamaño en grandes y pequeñas. Dependiendo de su geomorfología pueden ser endorreicas y exorreicas.

Desecho.- Cualquier materia líquida, sólida, gaseosa o radioactiva que es descargada, emitida, depositada, enterrada o diluida en volúmenes tales que puedan, tarde o temprano, producir alteraciones en el ambiente.

Disposición final.- Es la última actividad operacional del servicio de aseo urbano, mediante la cual la basura es descargada en forma definitiva.

Estratigrafía.- Parte de la Geología, que estudia aquellos estratos constituidos de cuerpos rocosos, reconociendo en ellos formas, composiciones litológicas, propiedades geofísicas y geoquímicas, sucesiones originarias, relaciones de edad, distribución y contenido fosilífero. Todas estas características sirven para reconocer y reconstruir secuencialmente eventos geológicos tales como el avance o retiro del mar, plegamientos o las extinciones ocurridas a determinados organismos en el transcurso del tiempo geológico.

Estrato.- Cada una de las capas en que se presentan divididos los sedimentos, las rocas sedimentarias y las rocas metamórficas que derivan de ellas, cuando esas capas se deben al proceso de sedimentación.

Falla.- Discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la Tierra (hasta unos 200 km de profundidad) por fractura, cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. Una falla indica un desplazamiento, pudiendo haber fallas normales, inversa y de transformación.

Fractura.- Separación bajo presión en dos o más piezas de un cuerpo sólido. Grieta del terreno producida por fuerzas tectónicas. Muchas fracturas se deben a que el terreno carecía de la necesaria flexibilidad para plegarse al ser sometido a empujes laterales.

Impacto ambiental.- Efecto que una determinada actuación produce en los elementos del medio o en las unidades ambientales y que puede ser beneficioso, es decir positivo, o perjudicial o negativo.

Lixiviados.- Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos orgánicos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

Lutita.- Roca sedimentaria de grano muy fino compuesta de minerales de arcilla y otros materiales muy finamente divididos. Estas rocas están caracterizadas por un plano de estratificación muy marcada.

Monitoreo.- Proceso de observación y seguimiento del desarrollo y variaciones de un fenómeno, ya sea instrumental o visualmente.

Nivel freático.- Plano que forma la superficie superior de la zona de saturación del agua subterránea. Por encima del nivel freático, las rocas no están saturadas. Cuando el nivel freático asciende puede llegar a alcanzar la superficie, originando entonces un manantial. El nivel freático está parcialmente controlado por la topografía, por la naturaleza de las rocas próximas a la superficie y por las condiciones climáticas locales.

Pluma contaminante.- Descarga visible o medible de un contaminante originada en un punto de origen.

Prospección geofísica.- Conjunto de técnicas y métodos físico matemáticos, aplicados a la exploración del subsuelo por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la tierra.

Residuos.- Material o subproducto industrial que ya no tiene valor económico y debe ser desechado. Se le considera un contaminante cuando por su cantidad, composición o particular naturaleza sea de difícil integración a los ciclos, flujos y procesos ecológicos normales.

Saneamiento.- Conjunto de acciones con el objetivo de restaurar las condiciones ambientales que habían sido modificadas o degradadas.

Tiradero a cielo abierto.- Área no adecuada, ni preparada para la disposición de residuos sólidos municipales, que repercute en impactos graves al ambiente.