



*UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MINERA, GEOLÓGICA Y  
CARTOGRÁFICA

TESIS DOCTORAL

**“APLICACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS NO  
DESTRUCTIVAS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA A  
PROBLEMAS RELACIONADOS CON CONTAMINACIÓN  
AMBIENTAL PRODUCIDA POR DIFERENTES  
ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN LA REGIÓN DE  
MURCIA”**

DIRECTORES:

**ÁNGEL FAZ CANO  
ENRIQUE ARACIL ÁVILA**

**PEDRO MARTÍNEZ PAGÁN**

**2006**

## **AGRADECIMIENTOS**

Durante la realización de esta Tesis Doctoral han sido muchas las personas que, en mayor o en menor medida, y de forma desinteresada me han ayudado, haciendo posible su realización. Por ello, a través de estas líneas, quiero agradecerles el tiempo que me han dedicado, especialmente a:

Mi director de tesis D. Ángel Faz Cano, Universidad Politécnica de Cartagena, por sus profesionales consejos, sus precisas correcciones y sus calurosos ánimos en las numerosas entrevistas mantenidas.

Mi director de tesis D. Enrique Aracil Ávila, Universidad de Burgos, por su rigor sobre las técnicas geofísicas, por su ayuda, su gran disponibilidad y su amistad.

Unai Maruri Brouard y Javier Vallés Iriso, Análisis y Gestión del Subsuelo, que han conseguido a través, de su profesionalidad y humor, que las campañas de medidas sean más llevaderas.

José Ángel Porres, Universidad de Burgos, por su asesoramiento sobre tomografía eléctrica 2D y el envío puntual de documentación técnica.

Alex Marcuello, Universidad de Barcelona, que ha aceptado a compartir sus conocimientos sobre el problema inverso.

Mr. François Marillier, Director del Institut de Geophysique de Lausanne (Suiza) y, Mme. Dominique Chapellier, ex-Directora del Institut de Geophysique de Lausanne (Suiza) que me permitieron llevar a cabo varias estancias en la Universidad de Lausanne ofreciéndome su experiencia con los métodos de prospección eléctrica y los métodos sísmicos.

Roger Guerin, Laboratoire de Geophysique Appliquée de la Université Paris 6, y Henry Robain, Institut pour la Recherche et le Developpement de Paris, que me han permitido

realizar una estancia en el Laboratoire de Geophysique Appliquée, donde he aprendido el manejo de programas de procesamiento para datos de tomografía eléctrica.

Juan Periago, por su ayuda en temas informáticos evitando importantes quebraderos de cabeza con los ordenadores, impresoras, etc.

Francisco Periago por las profundas conversaciones sobre métodos numéricos, integración, derivadas parciales, etc.

Mis compañeros del grupo de investigación: Gestión, Aprovechamiento y Recuperación de Suelos y Aguas: José Alberto Acosta, Silvia Martínez, Dora María, Andrea Zanuzzi, M<sup>a</sup> Ángeles Muñoz cuyos datos geoquímicos de los depósitos mineros han sido concluyentes para esta Tesis Doctoral.

Ana Cristina Rios Morata que ha trabajado duramente para que pudiera tener a tiempo los resultados de los análisis geoquímicos de las balsas de purines.

Mis compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica: Emilio Trigueros, Marisol Manzano, Eduardo Pérez, Andrés Perales, Antonio García, Marcos Martínez, Rafael Sánchez, Víctor Cánovas, Manuel Alcaraz, Manuel Rosique, Juan Martínez, Mercedes Martínez, etc., que a través de su calor, camaradería y buenos consejos, han hecho que esta Tesis Doctoral se desarrolle en un excelente ambiente de trabajo.

También quiero, especialmente, agradecer a mis padres, Salvador e Isabel, a mis hermanos, Juan, Amparo, Salvador e Isa, y a mi mujer Laly, el apoyo incondicional y el cariño que siempre he tenido de ellos.

Finalmente, a la Consejería de Industria y Medio Ambiente de la Región de Murcia, a través de la direcciones generales de Industria, Energía y Minas y Calidad Ambiental, por el apoyo financiero de los proyectos en el marco de los cuales se ha desarrollado esta Tesis Doctoral.

## Índice General

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.2.	Problemática ambiental de las balsas mineras y ganaderas .....	7
1.3	Justificación de las técnicas empleadas.....	9
1.4	Objetivos .....	9
2	Metodología.....	11
2.1	Depósitos de estériles mineros .....	12
2.1.1	Depósito de estériles “El Lirio” .....	14
2.1.2	Depósito de estériles “Brunita” .....	18
2.1.3	Técnicas aplicadas.....	20
	Geofísica .....	21
	Sondeo mecánico con extracción de testigo .....	22
	Análisis geoquímicos.....	23
2.2	Balsas de purines.....	25
2.2.1	Balsas de purines de Fuente-Álamo.....	26
2.2.2	Balsas de purines de Lorca.....	27
2.2.3	Técnicas aplicadas.....	30
	Geofísica .....	31
	Sondeo mecánico con extracción de testigo .....	32
	Análisis geoquímicos.....	33
3	Fundamentos.....	35
3.1	Propiedades geofísicas para aplicaciones medioambientales en contaminación de suelos .....	36
3.1.1.	Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y resistividad ( $\rho$ ) .....	37
	Conductividad y porosidad .....	38
	Conductividad y contenido en arcilla .....	39
	Conductividad y permeabilidad .....	39

Conductividad y profundidad “ <i>skin</i> ” o efecto “ <i>skin</i> ” .....	39
Conductividad y atenuación radar .....	41
3.1.2. Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) y constante dieléctrica ( $K$ ).....	41
La constante dieléctrica $K$ y la velocidad de la radiación electromagnética .....	43
La constante dieléctrica $K$ y la reflectividad de las ondas electromagnéticas ....	43
La constante dieléctrica $K$ y el contenido de agua.....	44
3.1.3. Polarización inducida ( $IP$ ) y resistividad compleja ( $CR$ ).....	45
3.1.4. Susceptibilidad magnética ( $k$ ) .....	48
Susceptibilidad magnética y magnetita .....	50
La magnetización de suelos .....	51
3.1.5. Densidad ( $\rho$ ).....	51
3.1.6. Velocidades sísmicas ( $V_p$ , $V_s$ ) .....	52
Velocidad sísmica y porosidad .....	53
La velocidad sísmica y la reflectividad .....	54
Velocidades sísmicas y propiedades geomecánicas .....	54
3.1.7. Valores de las propiedades físicas para algunos materiales comunes.....	55
3.2 Técnicas geofísicas aplicadas en la superficie .....	57
3.2.1. Conductivímetros EM-31 y EM-34 .....	57
Principio.....	58
Penetración, resolución.....	59
Equipo.....	60
Presentación e interpretación.....	61
3.2.2. Método Slingram u “ <i>Horizontal Loop EM</i> ” (HLEM).....	61
Principio.....	62
Equipo.....	63
Penetración, resolución.....	63
Presentación, interpretación.....	64
3.2.3. Métodos Eléctricos de Corriente Continua .....	64
Principio.....	65
Equipo.....	67
Penetración, resolución.....	68
Presentación, interpretación.....	68
3.2.4. Método de la Resistividad Compleja ( $CR$ ).....	69
Principio.....	69
Equipo.....	70
Penetración, resolución.....	70
Presentación, interpretación.....	70
3.2.5. Método VLF-R (en inglés, “ <i>VLF Resistivity</i> ”).....	71
Principio.....	72
Equipo.....	73
Penetración, resolución.....	73
Presentación, interpretación.....	73
3.2.6. Método EM en el Dominio Temporal (en inglés, “ <i>TDEM</i> ”) .....	73
Principio.....	74
Penetración, resolución.....	75
Equipo.....	76
Presentación, interpretación.....	76
3.2.7. Método Magnético .....	77
Principio.....	77
Equipo.....	77

Penetración, resolución.....	80
Presentación, interpretación.....	82
3.2.8. Método Gravimétrico .....	83
Principio.....	84
Equipo.....	84
Penetración, resolución.....	85
Presentación, interpretación.....	85
3.2.9. Georadar o <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR) .....	86
Principio.....	86
Equipo.....	87
Penetración, resolución.....	89
Presentación, interpretación.....	89
3.2.10. Método Sísmico de Refracción .....	90
Principio.....	91
Equipo.....	93
Penetración, resolución.....	94
Presentación, interpretación.....	94
3.2.11. Método Sísmico de Reflexión.....	95
Principio.....	95
Equipo.....	97
Penetración, resolución.....	98
Presentación, interpretación.....	98
3.2.12. Potencial Espontáneo .....	99
3.2.13. “ <i>Streaming Potential</i> ” .....	99
3.2.14. Método Electrostático .....	100
3.2.15. Método de Resonancia Magnética Nuclear o Protónica .....	102
Principio.....	103
Equipo.....	105
3.3 Técnicas geofísica en sondeos .....	105
Principio.....	106
Equipo.....	108
Penetración, resolución.....	109
Presentación, interpretación.....	109
3.4 Conclusiones .....	110
4 Tomografía Eléctrica 2D/3D .....	114
4.1 Tomografía eléctrica 2D .....	115
4.1.1. Introducción .....	115
4.1.2. Procedimiento de adquisición 2D .....	116
4.1.3. Representación de la tomografía en pseudosecciones .....	121
4.1.4. Ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos.....	124
Dispositivo Wenner .....	130
Dispositivo Dipolo-dipolo .....	131
Dispositivo Wenner-Schlumberger .....	132
Dispositivo Polo-polo .....	133
Dispositivo Polo-dipolo .....	133
4.1.5. Conclusiones para la tomografía eléctrica 2D .....	134
4.2 Tomografía eléctrica 3D .....	135
4.2.1. Introducción .....	135
4.2.2. Procedimiento de adquisición 3D .....	136
4.2.3. Ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos.....	139

Dispositivo Polo-polo .....	140
Dispositivo Polo-dipolo .....	143
Dispositivo Dipolo-Dipolo .....	144
Dispositivo Wenner-Schlumberger .....	144
4.2.4. Conclusiones para la tomografía eléctrica 3D .....	144
5 Descripción de las Zonas de Estudio .....	146
5.1 Localización geográfica .....	147
5.2 Depósitos de almacenamiento de estériles mineros .....	148
5.2.1 Sierra Minera Cartagena-La Unión .....	148
Geología.....	149
Relieve .....	159
Climatología .....	160
Vegetación .....	163
Hidrogeología .....	169
Breve revisión histórica de la minería de Cartagena-La Unión.....	171
Descripción de los depósitos de estériles mineros.....	177
5.2.2 Depósito de estériles “El Lirio” .....	182
Evolución histórica del depósito.....	188
5.2.3 Depósito de estériles “Brunita” .....	189
Evolución histórica del depósito.....	191
5.3 Balsas de almacenamiento de purines .....	193
5.3.1 Grupo de Fuente-Alamo.....	193
Geología.....	195
Hidrogeología .....	198
Relieve .....	203
Climatología y Vegetación .....	204
5.3.2 Grupo de Lorca .....	205
Geología.....	207
Hidrogeología .....	209
Relieve .....	209
Climatología y Vegetación .....	210
5.3.3 El purín de cerdo .....	212
6 Resultados y Discusión.....	216
6.1 Depósito de estériles “El Lirio” .....	216
6.1.1 Tomografía eléctrica 2D .....	216
Perfil nº 1 .....	218
Perfil nº 2 .....	221
Perfil nº 3 .....	224
Perfil nº 4 .....	226
Perfil nº 5 .....	229
Perfil nº 6 .....	230
Perfil nº 7 .....	233
Perfil nº 8 .....	235
Perfil nº 9 .....	237
Vista 3D de las pseudosecciones geoelectricas 2D .....	239
Modelo 3D del contacto sustrato-estéril .....	239
6.1.2 Tomografía eléctrica 3D .....	241
6.1.3 Sondeo mecánico .....	246
6.1.4 Análisis geoquímico.....	250
Propiedades físico-químicas de las muestras superficiales y sondeo .....	250

Metales totales en muestras superficiales y sondeo.....	257
6.1.5 Discusión de los resultados del depósito “El Lirio” .....	263
6.2 Depósito de estériles “Brunita” .....	265
6.2.1 Tomografía eléctrica 2D .....	265
Perfil A.....	266
Perfil B.....	271
Perfil C.....	274
Perfil D.....	277
Vista 3D de las pseudosecciones geoeléctricas 2D .....	280
Modelo 3D del contacto sustrato-estéril .....	281
6.2.2 Tomografía eléctrica 3D .....	283
6.2.3 Sondeo mecánico .....	289
6.2.4 Análisis geoquímico.....	293
Propiedades físico-químicas de las muestras superficiales y sondeo .....	293
Metales totales en muestras superficiales y sondeo.....	300
6.2.5 Discusión de los resultados del depósito “Brunita” .....	306
6.3 Balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).....	309
6.3.1 Tomografía eléctrica 2D .....	309
6.3.1.1 Campaña de septiembre de 2003 .....	310
Perfil 1 .....	312
Perfil 2 .....	316
Perfil 3 .....	318
Perfil 4.....	319
6.3.1.2 Campaña de abril de 2004 .....	321
Perfil 1 .....	323
Perfil 3 .....	325
Perfil 4.....	327
6.3.1.3 Campaña de octubre de 2004.....	329
Perfil 1 .....	330
Perfil 2 .....	332
Perfil 3 .....	332
Perfil 4 .....	334
6.3.1.4 Campaña de abril de 2005 .....	334
Perfil 1 .....	335
Perfil 3 .....	336
Perfil 4.....	337
6.3.2 Tomografía eléctrica 3D .....	338
6.3.3 Sondeos mecánicos .....	345
6.3.3.1 Sondeo nº 1 .....	346
6.3.3.2 Sondeo nº 2.....	348
6.3.4 Análisis geoquímico.....	352
Conductividad eléctrica de las muestras de los sondeos .....	352
6.3.5 Discusión de los resultados del grupo de Fuente-Álamo.....	355
6.4 Balsas de purines de Lorca (Murcia) .....	357
6.4.1 Tomografía eléctrica 2D – Lorca 1 .....	358
6.4.1.1 Campaña de octubre de 2004.....	358
Perfil 1 .....	360
Perfil 2 .....	362
6.4.1.2 Campaña de abril de 2005 .....	364
Perfil 1 .....	365



---

Perfil 2 .....	367
6.4.2 Tomografía eléctrica 2D – Lorca 2 .....	370
6.4.2.1 Campaña de octubre de 2004.....	370
Perfil 1 .....	371
6.4.2.2 Campaña de abril de 2005 .....	373
Perfil 1 .....	375
Perfil 2 .....	378
6.4.3 Tomografía eléctrica 3D – Lorca 1 .....	379
6.4.4 Tomografía eléctrica 3D – Lorca 2 .....	385
6.4.5 Sondeos mecánicos .....	391
6.4.5.1 Sondeo Lorca 1 .....	392
6.4.5.2 Sondeo Lorca 2 .....	395
6.4.6 Análisis geoquímico.....	398
6.4.6.1 Conductividad eléctrica del sondeo Lorca 1.....	398
6.4.6.2 Conductividad eléctrica del sondeo Lorca 2.....	400
6.4.7 Discusión de los resultados del grupo de Lorca.....	401
7 Discusión General .....	403
7.1 Discusión de los Depósitos de estériles mineros.....	403
7.1.1 Depósito de estériles “El Lirio” .....	403
7.1.2 Depósito de estériles “Brunita” .....	405
7.2 Discusión de las Balsas de Purines .....	407
7.2.1 Grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia).....	407
7.2.2 Grupo de balsas de Lorca (Murcia).....	409
8 Conclusiones.....	411
8.1 Conclusiones de los Depósitos de estériles mineros .....	411
8.2 Conclusiones de las Balsas de Purines.....	412
8.3 Perspectivas.....	413
9 Referencias .....	415
Anexo A.....	436
Anexo B.....	455
Anexo C.....	464
Anexo D.....	469
Anexo E.....	472

ÍNDICE DE FIGURAS	Página
Figura 2.1. Situación de las zonas de la Región de Murcia sobre las que se han realizado las investigaciones. Depósito de estériles “El Lirio” (a); depósito de estériles “Brunita” (b); balsas de purines de Fuente-Álamo (c); balsas de purines de Lorca (d).....	12
Figura 2. 2. Emplazamiento del depósito “El Lirio”.....	15
Figura 2. 3. Fotografía aérea del depósito de estériles mineros “El Lirio”.....	17
Figura 2. 4. Emplazamiento del depósito “Brunita”. .....	18
Figura 2. 5. Fotografía aérea del depósito de estériles mineros “Brunita”.....	19
Figura 2. 6. Grupo de balsas de Fuente-Álamo de Murcia. ....	26
Figura 2. 7. Grupo de balsas de Lorca.....	28
Figura 3. 1. Fragmento rocoso típico constituido por una matriz rocosa, poros y fluido (elaboración propia). .....	36
Figura 3. 2. Atenuación de un campo eléctrico $E$ hasta un 37 % de su amplitud superficial a la profundidad $d$ o profundidad “ <i>skin</i> ” (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997). .....	40
Figura 3. 3. Profundidad “ <i>Skin</i> ”, en metros, como función de la frecuencia y de la conductividad de los materiales (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997).....	41
Figura 3. 4. Representación esquemática del resultado obtenido sobre las cargas eléctricas al aplicar un campo eléctrico, $E$ , a una molécula (elaboración propia). .....	42
Figura 3. 5. Reflexión de una onda EM en una interfase con un significativo contraste de la constante dieléctrica, $K$ , entre los dos medios (elaboración propia). .....	44
Figura 3. 6. Variación de la constante dieléctrica de una roca saturada de agua en función de la porosidad (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997). .....	44
Figura 3. 7. Representación del desfase que se produce entre la señal del voltaje aplicado y la señal de la corriente resultante cuando tenemos una resistividad compleja (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997).....	46
Figura 3. 8. Esquema de la curva de descenso de la corriente resultante después de desconectar el voltaje ante la presencia de resistividad compleja (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997). .....	48
Figura 3. 9. Susceptibilidad magnética, $k$ , de una material como función de su contenido en magnetita (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997).....	51
Figura 3. 10. Velocidad de la onda P a través de un medio en función de la porosidad existente en dicho medio (modificado de Greenhouse <i>et al.</i> , 1997).....	54
Figura 3. 11. Rangos de valores típicos de la conductividad eléctrica para algunas sustancias comunes.....	55
Figura 3. 12. Rangos de valores típicos de la constante dieléctrica para algunas sustancias comunes.....	56
Figura 3. 13. Rangos de valores típicos de la susceptibilidad magnética para algunos materiales comunes. ....	56

<b>Figura 3. 14. Rangos de valores típicos de la velocidad de las ondas P para algunas sustancias comunes.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 3. 15. Representación esquemática del funcionamiento de un conductivímetro Geonics EM-31 basado en la inducción electromagnética EM (modificado de McNeill, 1980).....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3. 16. Respuesta de la conductividad del terreno, como una función de la profundidad con las bobinas en dipolo vertical y horizontal, para los equipos Geonics EM-31 y EM-34 (modificado de McNeill, 1980). ....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 3. 17. Principio de funcionamiento de un equipo Slingram (modificado de Reynolds, 1997).....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 3. 18. Principio de funcionamiento de un equipo tetraelectródico de prospección eléctrica (elaboración propia). ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 3. 19. Distribución de las líneas de corriente eléctrica y de equipotencial ante la presencia de un cuerpo conductor o un cuerpo resistivo (elaboración propia). ....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 3. 20. Convención establecida para representar un valor sobre una pseudosección 2D con dispositivo dipolo-dipolo (elaboración propia).....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 3. 21. Componentes del campo eléctrico y magnético para un emisor VLF (elaboración propia). ....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 3. 22. Respuesta de la señal EM en el dominio temporal, TDEM (modificado de McNeill, 1990). ....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 3. 23. Curva de caída para el campo magnético secundario inducido (modificado de McNeill, 1990).....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 3. 24. Anomalía magnética de un objeto magnetizado por el campo magnético terrestre (modificado de Reynolds, 1997). ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 3. 25. Representación esquemática de los principales elementos de un magnetómetro fluxgate (modificado de Reynolds, 1997). ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 3. 26. Respuestas características en el circuito primario y secundario de un fluxgate (modificado de Reynolds, 1997).....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 3. 27. Etapas seguidas por un magnetómetro de protones para realizar una medida (modificado de Reynolds, 1997).....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 3. 28. Representación esquemática sobre los elementos principales de un magnetómetro de vapor de cesio (modificado de Robinson y Çoruh, 1988).....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 3. 29. Gravímetro astático LaCoste-Romberg (modificado de Reynolds, 1997).....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 3. 30. Representación esquemática del tipo de reflexiones emitidas por un objeto anómalo y el basamento rocoso (modificado de Davis y Annan, 1989).....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 3. 31. Radargrama simplificado que se obtendría en el escenario de la Figura 3.30 (modificado de Davis y Annan, 1989).....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 3. 32. Principales ondas sísmicas generadas por una fuente sísmica y su representación gráfica, denominada dromocrona (elaboración propia). ....</b>	<b>92</b>

<b>Figura 3. 33. Dromocrona indicando la ventana óptima (“<i>optimum window</i>”) que se debe elegir (modificado de Pullan y Hunter, 1990).....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 3. 34. Principio del método sísmico CDP (elaboración propia).....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 3. 35. Detección de fugas en un embalse con agua a través de la técnica “<i>streaming potential</i>” (según Martínez-Pagán <i>et al.</i>, 2004). .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 3. 36. Representación del procedimiento de medición con el NMR (modificado de IRIS Instruments, 2004). .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 3. 37. Magnetización de un protón por un campo magnético dinámico generado por el bucle (modificado de IRIS Instruments, 2004).....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 3. 38. Representación temporal de la secuencia de emisión/recepción (modificado de IRIS Instruments, 2004). .....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 3. 39. Operación típica de testificación geofísica para estudios de contaminación de suelos (elaboración propia). .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 3. 40. Testificación con una sonda sónica (modificado de Chapellier, 1987).....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 3. 41. Aplicabilidad de las técnicas de testificación según el tipo de sondeo (Mwenifumbo, 1991). .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 3. 42. Aplicaciones típicas de las diagrafas (Glenn y Hohmann, 1981).....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 3. 43. Registro obtenido con una sonda de resistividad y su interpretación geológica (modificado de Chapellier, 1987).....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 4. 1. Los tres modelos diferentes empleados en la interpretación de medidas de resistividad (Loke, 2000). .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 4. 2. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el primer nivel de adquisición.....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 4. 3. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el tercer nivel de adquisición.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 4. 4. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el quinto nivel de adquisición.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 4. 5. Representación de lo que sería una pseudosección eléctrica 2D obtenida al interpolar los valores de resistividad aparente de los diferentes niveles de adquisición. ....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4. 6. Dispositivos tetraelectrónicos comúnmente utilizados.....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4. 7. Procedimiento para la situación de los puntos de medida con la configuración Dipolo-dipolo en una pseudosección de resistividades aparentes.....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 4. 8. Valores calculados de las resistividades aparentes provocadas por un modelo para tres dispositivos diferentes de medida (Marescot, 2003).....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 4. 9. Pseudosección obtenida a partir de un modelo 2D del subsuelo empleando el programa RES2DMOD (Loke, 2001).....</b>	<b>124</b>

Figura 4. 10. Función de sensibilidad para dispositivos Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-dipolo sobre un semi-espacio homogéneo (Roy y Apparao, 1971).....	126
Figura 4. 11. Tabla de coeficientes para determinar la profundidad media de investigación ( $z_e$ ) para los principales dispositivos (Edwards, 1977). .....	128
Figura 4. 12. Ejemplos de profundidades máximas de investigación obtenidas con un sistema multi-electrodo para un dispositivo Wenner o un dispositivo Dipolo-dipolo (Bernard, 2003). .....	129
Figura 4. 13. Distribución de los electrodos para una adquisición de tomografía eléctrica 3D (Loke, 2000). .....	137
Figura 4. 14. Empleo del sistema “roll-along” para una malla de 8 x 5 en la dirección x (Loke, 2000).....	138
Figura 4. 15. Investigación con las líneas orientadas según la dirección y (Loke, 2000).....	139
Figura 4. 16. Empleo de todos los electrodos en un dispositivo Polo-polo (Loke, 2000).....	141
Figura 4. 17. Dispositivo Polo-polo empleando el método “cross-diagonal survey” (Loke, 2000).....	142
Figura 4. 18. Tomografía eléctrica 3D a través de perfiles paralelos.....	143
Figura 4. 19. Modelo empleado para interpretar los conjuntos de datos con el RES3DINV (Loke, 2000).....	145
Figura 5. 1. Situación de las zonas de estudio: A, B, C y D (elaboración propia). .....	147
Figura 5. 2. Extensión de la Cordilleras Béticas. (Vera, 2004). .....	148
Figura 5. 3. Basamento de la Sierra Minera Cartagena-La Unión (Vera, 2004). .....	149
Figura 5. 4. Extensión de las Zonas Internas (Vera, 2004). .....	151
Figura 5. 5. Principales Complejos en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. (Vera, 2004).....	152
Figura 5. 6. Fenómenos de volcanismo reciente en la Región de Murcia (Vera, 2004).....	154
Figura 5. 7. Situación de la unidad hidrogeológica de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez-Estrella, 2006).....	171
Figura 5. 8. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento aguas arriba (elaboración propia).....	178
Figura 5. 9. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento aguas abajo (elaboración propia). .....	178
Figura 5. 10. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento central (elaboración propia). .....	179

<b>Figura 5. 11. Representación esquemática de los sistemas de vertido y evacuación empleados en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia). .....</b>	<b>180</b>
<b>Figura 5. 12. Sección central esquemática y, en perspectiva, de los sistemas de vertido y evacuación empleados en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia). .....</b>	<b>181</b>
<b>Figura 5. 13. Representación esquemática del sistema alternativo de evacuación del agua embalsada empleado en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia). .....</b>	<b>182</b>
<b>Figura 5. 14. Emplazamiento del depósito de estériles mineros “El Lirio”. .....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 5. 15. Perfil geológico con dirección E-O sobre el pantano “El Lirio” (Faz <i>et al.</i>, 2003a). .....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 5. 16. Formaciones y contactos geológicos de la zona donde se ubica el depósito de estériles “El Lirio” (I.T.G.E., 1993a). .....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 5. 17. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a). .....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 5. 18. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a). .....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 5. 19. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a). .....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 5. 20. Emplazamiento del depósito de estériles mineros “Brunita”. .....</b>	<b>190</b>
<b>Figura 5. 21. Perfil geológico con dirección E-O sobre el depósito de estériles “Brunita” (Faz <i>et al.</i>, 2003b). .....</b>	<b>191</b>
<b>Figura 5. 22. Mapa geológico de los alrededores del depósito de estériles “Brunita” (I.T.G.E., 1993b). .....</b>	<b>193</b>
<b>Figura 5. 23. Grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia). .....</b>	<b>194</b>
<b>Figura 5. 24. Zona de estudio de las balsas de purines de Fuente-Álamo (Vera, 2004). .....</b>	<b>196</b>
<b>Figura 5. 25. Geología del entorno de las balsas de purines de Fuente-Álamo (I.T.G.E., 1993c). .....</b>	<b>198</b>
<b>Figura 5. 26. Sección geológica de la zona de estudio (I.T.G.E., 1993c). .....</b>	<b>199</b>
<b>Figura 5. 27. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.25 (I.T.G.E., 1993c). .....</b>	<b>200</b>
<b>Figura 5. 28. Grupo de balsas de purines de Lorca. ....</b>	<b>206</b>
<b>Figura 5. 29. Zona de estudio de las balsas de purines de Lorca (Vera, 2004). .....</b>	<b>207</b>
<b>Figura 5. 30. Geología del entorno de las balsas de purines de Lorca (I.T.G.E., 1993d). .....</b>	<b>208</b>
<b>Figura 5. 31. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.30 (I.T.G.E., 1993d). .....</b>	<b>209</b>

<b>Figura 5. 32. Serie estratigráfica en la zona de Lorca (Vera, 2004).</b> .....	<b>212</b>
<b>Figura 5. 33. Representación esquemática de una balsa de purín típica (elaboración propia).</b> .....	<b>213</b>
<b>Figura 6. 1. Situación de los perfiles de tomografía eléctrica 2D y el sondeo mecánico sobre el depósito “El Lirio”.</b> .....	<b>218</b>
<b>Figura 6. 2. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 1.</b> .....	<b>219</b>
<b>Figura 6. 3. Regleta de valores de resistividad empleada en el depósito “El Lirio”.</b> .....	<b>221</b>
<b>Figura 6. 4. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 2.</b> .....	<b>222</b>
<b>Figura 6. 5. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 3.</b> .....	<b>224</b>
<b>Figura 6. 6. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 4.</b> .....	<b>227</b>
<b>Figura 6. 7. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 5.</b> .....	<b>229</b>
<b>Figura 6. 8. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 6.</b> .....	<b>231</b>
<b>Figura 6. 9. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 7.</b> .....	<b>233</b>
<b>Figura 6. 10. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 8.</b> .....	<b>236</b>
<b>Figura 6. 11. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 9.</b> .....	<b>237</b>
<b>Figura 6. 12. Posición espacial de las diferentes pseudosecciones geoelectricas 2D.</b> .....	<b>239</b>
<b>Figura 6. 13. Modelo 3D del zócalo rocoso.</b> .....	<b>240</b>
<b>Figura 6. 14. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico sobre el depósito “El Lirio”.</b> .....	<b>243</b>
<b>Figura 6. 15. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.</b> .....	<b>244</b>
<b>Figura 6. 16. Volumen del depósito del área cubierta por la tomografía eléctrica 3D correspondiente al estéril con valores de resistividad inferior a 12 ohm·m.</b> .....	<b>244</b>
<b>Figura 6. 17. Volumen del material del depósito con características mas resistivas (&gt; 8 ohm·m).</b> .....	<b>245</b>
<b>Figura 6. 18. Vista 3D sobre la tendencia del estéril más conductor dentro del depósito.</b> .....	<b>245</b>
<b>Figura 6. 19. Vista 3D sobre la tendencia del estéril más conductor dentro del depósito.</b> .....	<b>246</b>
<b>Figura 6. 20. Situación de las zonas de muestreo superficial C1, C2 y C3 en “El Lirio”.</b> .....	<b>251</b>
<b>Figura 6. 21. Valores medios de pH medido en agua de las muestras superficiales C1, C2 y C3.</b> .....	<b>252</b>
<b>Figura 6. 22. Valores medios de pH medido en KCl de las muestras superficiales C1, C2 y C3.</b> .....	<b>253</b>

<b>Figura 6. 23. Valores medios de conductividad eléctrica de las muestras superficiales C1, C2 y C3. ....</b>	<b>254</b>
<b>Figura 6. 24. Valores de pH de las muestras del sondeo. ....</b>	<b>254</b>
<b>Figura 6. 25. Valores de conductividad eléctrica y de resistividad eléctrica de las muestras del sondeo.....</b>	<b>256</b>
<b>Figura 6. 26. Concentración media de Zn total y Pb total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “El Lirio”.....</b>	<b>257</b>
<b>Figura 6. 27. Concentración media de Cu total y Cd total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “El Lirio”.....</b>	<b>259</b>
<b>Figura 6. 28. Concentración de Pb total y Zn total en los puntos de muestreo del sondeo.....</b>	<b>261</b>
<b>Figura 6. 29. Concentración de Cu total y Cd total en los puntos de muestreo del sondeo.....</b>	<b>262</b>
<b>Figura 6. 30. Situación de los perfiles de tomografía eléctrica 2D y el sondeo mecánico sobre el depósito “Brunita”. ....</b>	<b>266</b>
<b>Figura 6. 31. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil A y situación del sondeo mecánico. ....</b>	<b>267</b>
<b>Figura 6. 32. Regleta de valores de resistividad empleada en el depósito “Brunita”.....</b>	<b>269</b>
<b>Figura 6. 33. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil B. ....</b>	<b>271</b>
<b>Figura 6. 34. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil C. ....</b>	<b>275</b>
<b>Figura 6. 35. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil D. ....</b>	<b>277</b>
<b>Figura 6. 36. Posición espacial de las diferentes seudosecciones geoelectricas 2D. ....</b>	<b>280</b>
<b>Figura 6. 37. Modelo 3D del zócalo rocoso. ....</b>	<b>282</b>
<b>Figura 6. 38. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico sobre el depósito “Brunita”. ....</b>	<b>285</b>
<b>Figura 6. 39. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.....</b>	<b>286</b>
<b>Figura 6. 40. Vista 3D orientada hacia el Oeste de la zonificación del depósito “Brunita” en función de los valores de resistividad eléctrica. ....</b>	<b>286</b>
<b>Figura 6. 41. Vista 3D orientada hacia el Este de la zonificación del depósito “Brunita” en función de los valores de resistividad eléctrica. ....</b>	<b>287</b>
<b>Figura 6. 42. Sección del bloque 3D donde se aprecia el espesor del material depositado. ....</b>	<b>287</b>
<b>Figura 6. 43. Volumen del depósito correspondiente al estéril con valores de resistividad eléctrica inferiores a 12 ohm·m.....</b>	<b>288</b>
<b>Figura 6. 44. Volumen correspondiente al zócalo y a materiales de estéril con valores de resistividad eléctrica superiores a 12 ohm·m. ....</b>	<b>288</b>



<b>Figura 6. 45. Volumen correspondiente al zócalo orientado hacia el Este para apreciar el “lentejón resistivo” que aparece próximo al Perfil nº 1. ....</b>	<b>289</b>
<b>Figura 6. 46. Situación de las zonas de muestreo superficial D1, D2 y D3 en “Brunita”.....</b>	<b>294</b>
<b>Figura 6. 47. Valores medios de pH medido en agua de las muestras superficiales D1, D2 y D3. ....</b>	<b>295</b>
<b>Figura 6. 48. Valores medios de pH medido en KCl de las muestras superficiales D1, D2 y D3. ....</b>	<b>296</b>
<b>Figura 6. 49. Valores medios de conductividad eléctrica de las muestras superficiales D1, D2 y D3. ....</b>	<b>297</b>
<b>Figura 6. 50. Valores de pH de las muestras del sondeo. ....</b>	<b>298</b>
<b>Figura 6. 51. Valores de conductividad eléctrica de las muestras del sondeo. ....</b>	<b>299</b>
<b>Figura 6. 52. Concentración media de Zn total y Pb total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “Brunita”. ....</b>	<b>300</b>
<b>Figura 6. 53. Concentración media de Cu total y Cd total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “Brunita”. ....</b>	<b>302</b>
<b>Figura 6. 54. Concentración de Pb total y Zn total en los puntos de muestreo del sondeo. ....</b>	<b>304</b>
<b>Figura 6. 55. Concentración de Cu total y Cd total en los puntos de muestreo del sondeo. ....</b>	<b>305</b>
<b>Figura 6. 56. Dimensiones del grupo de balsas de purín de Fuente-Álamo (Murcia).....</b>	<b>310</b>
<b>Figura 6. 57. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (septiembre de 2003). ....</b>	<b>311</b>
<b>Figura 6. 58. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 1 realizado en septiembre de 2003. ....</b>	<b>312</b>
<b>Figura 6. 59. Litología principal en el grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia). ....</b>	<b>314</b>
<b>Figura 6. 60. Penetración del agua y las sales del purín en las formaciones del subsuelo. ....</b>	<b>314</b>
<b>Figura 6. 61. Retroceso de la humedad del purín en las formaciones del subsuelo. ....</b>	<b>315</b>
<b>Figura 6. 62. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 2 realizado en septiembre de 2003. ....</b>	<b>317</b>
<b>Figura 6. 63. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 3 realizado en septiembre de 2003. ....</b>	<b>318</b>
<b>Figura 6. 64. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 4 realizado en septiembre de 2003. ....</b>	<b>320</b>
<b>Figura 6. 65. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (abril de 2004). ....</b>	<b>322</b>

<b>Figura 6. 66. Representación esquemática del dispositivo empleado dentro de las balsas con purín.....</b>	<b>323</b>
<b>Figura 6. 67. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en abril de 2004.....</b>	<b>323</b>
<b>Figura 6. 68. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 3 realizado en abril de 2004.....</b>	<b>325</b>
<b>Figura 6. 69. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en abril de 2004.....</b>	<b>328</b>
<b>Figura 6. 70. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (octubre de 2004).....</b>	<b>330</b>
<b>Figura 6. 71. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>331</b>
<b>Figura 6. 72. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>332</b>
<b>Figura 6. 73. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 3 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>333</b>
<b>Figura 6. 74. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>334</b>
<b>Figura 6. 75. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (abril de 2005).....</b>	<b>335</b>
<b>Figura 6. 76. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>336</b>
<b>Figura 6. 77. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 3 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>337</b>
<b>Figura 6. 78. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>338</b>
<b>Figura 6. 79. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y los sondeos mecánicos sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).....</b>	<b>342</b>
<b>Figura 6. 80. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.....</b>	<b>343</b>
<b>Figura 6. 81. Vista 3D orientada hacia el Oeste de la zonificación del depósito “Brunita” en función de los valores de resistividad eléctrica. ....</b>	<b>343</b>
<b>Figura 6. 82. Vista 3D orientada hacia el Este de la zonificación del depósito “Brunita” en función de los valores de resistividad eléctrica. ....</b>	<b>344</b>
<b>Figura 6. 83. Sección del bloque 3D donde se aprecia el espesor del material depositado. ....</b>	<b>344</b>
<b>Figura 6. 84. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo n° 1 analizadas, junto con la columna litológica atravesada. ....</b>	<b>345</b>
<b>Figura 6. 85. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo n° 1. ....</b>	<b>347</b>

<b>Figura 6. 86. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo n° 2 analizadas, junto con la columna litológica atravesada. ....</b>	<b>350</b>
<b>Figura 6. 87. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo n° 2. ....</b>	<b>351</b>
<b>Figura 6. 88. Triángulo de texturas.....</b>	<b>352</b>
<b>Figura 6. 89. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo n° 1.....</b>	<b>353</b>
<b>Figura 6. 90. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo n° 2.....</b>	<b>354</b>
<b>Figura 6. 91. Horizontes litológicos principales en el grupo de balsas de purines. ....</b>	<b>355</b>
<b>Figura 6. 92. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre la balsa de purín de Lorca 1 (octubre de 2004).....</b>	<b>359</b>
<b>Figura 6. 93. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil n° 1 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>360</b>
<b>Figura 6. 94. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>363</b>
<b>Figura 6. 95. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre la balsa de purín Lorca 1 (abril de 2005).....</b>	<b>365</b>
<b>Figura 6. 96. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>366</b>
<b>Figura 6. 97. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 3 realizado en abril de 2004.....</b>	<b>368</b>
<b>Figura 6. 98. Representación del comportamiento de la filtración bajo la balsa Lorca 1.....</b>	<b>369</b>
<b>Figura 6. 99. Emplazamiento del perfil de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de Lorca 2 (octubre de 2004).....</b>	<b>371</b>
<b>Figura 6. 100. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en octubre de 2004.....</b>	<b>372</b>
<b>Figura 6. 101. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de Lorca 2 (abril de 2005).....</b>	<b>374</b>
<b>Figura 6. 102. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>376</b>
<b>Figura 6. 103. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en abril de 2005.....</b>	<b>378</b>
<b>Figura 6. 104. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico en la balsa de purines Lorca 1. ....</b>	<b>383</b>
<b>Figura 6. 105. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado en Lorca 1.....</b>	<b>384</b>
<b>Figura 6. 106. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, señalando con líneas a trazos regiones alcanzadas ligeramente por la filtración del purín.....</b>	<b>384</b>

Figura 6. 107. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, destacando la región afectada por el purín próxima al perfil nº 5.....	385
Figura 6. 108. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico en la balsa de purines Lorca 1. ....	389
Figura 6. 109. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado en Lorca 2.....	390
Figura 6. 110. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, señalando con líneas a trazos regiones alcanzadas ligeramente por la filtración del purín.....	390
Figura 6. 111. Volumen correspondiente a materiales del bloque geoelectrico 3D con valores bajos de resistividad eléctrica ( $< 0,37 [\log_{10}\rho]$ ). ....	391
Figura 6. 112. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo de Lorca 1 analizadas, junto con la columna litológica atravesada. ....	392
Figura 6. 113. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo de Lorca 1.....	394
Figura 6. 114. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo de Lorca 2 analizadas, junto con la columna litológica atravesada. ....	396
Figura 6. 115. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo de Lorca 2.....	397
Figura 6. 116. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo realizado en Lorca 1.....	399
Figura 6. 117. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo realizado en Lorca 2.....	400
Figura A.1. Potencial en un punto P1 provocado por una fuente de corriente puntual A (Burger, 1992). ....	439
Figura A.2. Potencial en un punto P1 provocado por dos electrodos de corriente A y B (Burger, 1992). ....	440
Figura A.3. Dispositivo tetrapolar sobre un terreno homogéneo e isótropo.....	441
Figura A.4. Electrodo puntual sobre un terreno homogéneo e isótropo.....	442
Figura A.5. Tipos de dispositivos electrónicos lineales más comunes (Telford <i>et al.</i> , 2004).....	443
Figura A. 6. Medida del potencial sobre un semi-espacio homogéneo con anisotropía estratificada. ....	447
Figura A. 7. Representación de un terreno estratificado horizontalmente. ....	448
Figura B. 1. Modelo de dos capas con un semi-espacio superior de resistividad $\rho_0$ . ....	456
Figura B. 2. Trayectoria con un rebote en el contacto. ....	457
Figura B. 3. Trayectorias con inicio en el contacto inferior y un número par de rebotes. ....	458
Figura B. 4. Trayectorias con inicio en el contacto superior y un número par de rebotes. ....	459

<b>Figura B. 5. Potencial producido por una fuente puntual A cerca de una capa vertical de espesor <math>m</math>.</b> .....	<b>463</b>
<b>Figura C. 1. Modelo del subsuelo creado con Res2dmod en el que se ha introducido un penacho contaminantes con forma de “L”, de resistividad eléctrica 10 ohm.m.</b> .....	<b>465</b>
<b>Figura C. 2. Seudosección de resistividad aparente obtenida para el dispositivo Wenner con una separación entre electrodos de 1 metro (problema directo)</b> .....	<b>466</b>
<b>Figura C. 3. Seudosección de resistividad, que intenta aproximarse al modelo creado con el Res2dmod, obtenida a partir de un proceso de inversión para un dispositivo Schlumberger-Wenner con una separación entre electrodos de 0,5 metros.</b> .....	<b>466</b>
<b>Figura C. 4. Seudosección de resistividad real, que intenta aproximarse al modelo creado con el Res2dmod, obtenida a partir de un proceso de inversión para un dispositivo Wenner con una separación entre electrodos de 0,5 metros.</b> .....	<b>467</b>
<b>Figura C. 5. Etapas seguidas en el proceso de inversión de datos geoelectricos.</b> .....	<b>468</b>
<b>Figura D. 1. Sección de la profundidad de investigación normalizada sobre el depósito de “Brunita”.</b> .....	<b>471</b>
<b>Figura D. 2. Sección de la profundidad de investigación normalizada sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia).</b> .....	<b>471</b>
<b>Figura E. 1. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 5, realizado sobre el depósito “El Lirio”, filtrada con el programa X2IPI</b> .....	<b>473</b>
<b>Figura E. 2. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 5, realizado sobre el depósito “El Lirio”, sin filtrar.</b> .....	<b>473</b>
<b>Figura E. 3. Seudosección geoelectrica 2D del perfil A, realizado sobre el depósito “Brunita”, filtrada con el programa X2IPI</b> .....	<b>474</b>
<b>Figura E. 4. Seudosección geoelectrica 2D del perfil A, realizado sobre el depósito “Brunita”, sin filtrar.</b> .....	<b>474</b>
<b>Figura E. 5. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia), filtrada con el programa X2IPI</b> .....	<b>475</b>
<b>Figura E. 6. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia), sin filtrar.</b> .....	<b>475</b>
<b>Figura E. 7. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre la balsa de purines Lorca 1, filtrada con el programa X2IPI</b> .....	<b>475</b>
<b>Figura E. 8. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre la balsa de purines Lorca 1, sin filtrar</b> .....	<b>476</b>
<b>Figura E. 9. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre el grupo de balsas de purines Lorca 2, filtrada con el programa X2IPI</b> .....	<b>476</b>
<b>Figura E. 10. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre el grupo de balsas de purines Lorca 2, sin filtrar.</b> .....	<b>476</b>

ÍNDICE DE FOTOS	Página
Foto 2. 1. Urbanización Manga Club vista desde el depósito “El Lirio”.....	16
Foto 2. 2. Vista general del depósito de estériles “Brunita”.....	20
Foto 2. 3. Sondeo mecánico con testigo continuo en el depósito “Brunita”.....	22
Foto 2. 4. Balsa nº 1 y balsa nº 2 vaciadas en septiembre de 2003.....	27
Foto 2. 5. Balsa “Lorca 1”.....	29
Foto 2. 6. Balsa con purín del grupo “Lorca 2”.....	30
Foto 2. 7. Sondeo mecánico con testigo continuo en una de las balsas de purines.....	32
Foto 2. 8. Caja porta-testigos.....	33
Foto 5. 1. Dique recrecido “aguas arriba” y restos del sistema de vertido con canaletas de madera en el depósito “El Lirio”.....	181
Foto 5. 2. Depósito de estériles mineros “Brunita”.....	189
Foto 5. 3. Vista general de la granja porcina de Fuente-Álamo (Murcia).....	195
Foto 5. 4. Detalle de la geología superficial próxima al grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).....	197
Foto 6. 1. Vista parcial del Perfil nº 1 orientada hacia electrodo nº 1.....	220
Foto 6. 2. Vista parcial del Perfil nº 2 orientada hacia electrodo nº 1.....	223
Foto 6. 3. Playa de arena originada durante el proceso de vertido.....	223
Foto 6. 4. Vista parcial del Perfil nº 3 orientada hacia electrodo nº 54.....	225
Foto 6. 5. Vista parcial del Perfil nº 3 orientada hacia electrodo nº 1.....	226
Foto 6. 6. Vista parcial del Perfil nº 4 orientada hacia electrodo nº 1, e indicación de la posición del sondeo mecánico.....	227
Foto 6. 7. Indicación de la dirección del Perfil nº 4 y de la zona habitual de embalsamiento de agua.....	228
Foto 6. 8. Vista parcial del Perfil nº 5 orientada hacia electrodo nº 36.....	230
Foto 6. 9. Vista parcial del Perfil nº 6 orientada hacia electrodo nº 36.....	232
Foto 6. 10. Vista parcial del Perfil nº 6 orientada hacia electrodo nº 1.....	232
Foto 6. 11. Vista parcial del Perfil nº 7 orientada hacia electrodo nº 1.....	234
Foto 6. 12. Vista parcial del Perfil nº 7 orientada hacia electrodo nº 36.....	234
Foto 6. 13. Vista parcial del Perfil nº 8 orientada hacia electrodo nº 1.....	236
Foto 6. 14. Vista parcial del parcial del Perfil nº 9 orientada hacia electrodo nº 36.....	238
Foto 6. 15. Testigo continuo obtenido de 9 a 12 metros.....	247

<b>Foto 6. 16. Emplazamiento del sondeo mecánico en el depósito de estériles “El Lirio”.</b> .....	<b>247</b>
<b>Foto 6. 17. Vista parcial del Perfil A orientada hacia electrodo n° 54.</b> .....	<b>268</b>
<b>Foto 6. 18. Situación del sondeo-piezómetro en el Perfil A.</b> .....	<b>270</b>
<b>Foto 6. 19. Extremo del Perfil A, mostrando la posición del electrodo n° 54.</b> .....	<b>270</b>
<b>Foto 6. 20. Vista parcial del Perfil B orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>272</b>
<b>Foto 6. 21. Vista parcial del Perfil B orientada hacia electrodo n° 54.</b> .....	<b>273</b>
<b>Foto 6. 22. Costras cementadas en superficie.</b> .....	<b>273</b>
<b>Foto 6. 23. Acarcavamiento intenso de la zona noroccidental del depósito “Brunita”.</b> .....	<b>274</b>
<b>Foto 6. 24. Vista parcial del Perfil C orientada hacia electrodo n° 54.</b> .....	<b>276</b>
<b>Foto 6. 25. Vista parcial del Perfil C orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>276</b>
<b>Foto 6. 26. Vista parcial del Perfil D orientada hacia electrodo n° 36.</b> .....	<b>278</b>
<b>Foto 6. 27. Posición del electrodo n° 1 del Perfil D.</b> .....	<b>279</b>
<b>Foto 6. 28. Máquina para sondeos emplazada sobre el depósito “Brunita”.</b> .....	<b>290</b>
<b>Foto 6. 29. Testigo continuo obtenido entre los 12 y los 15 metros.</b> .....	<b>290</b>
<b>Foto 6. 30. Vista parcial del Perfil 1 orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>313</b>
<b>Foto 6. 31. Vista general de la balsa n° 2 de la cual ha sido retirado el estiércol.</b> .....	<b>315</b>
<b>Foto 6. 32. Instalación del perfil geoelectrico n° 2 y situación del electrodo n° 36.</b> .....	<b>317</b>
<b>Foto 6. 33. Instalación del perfil n° 3 y situación del electrodo n° 36.</b> .....	<b>319</b>
<b>Foto 6. 34. Vista parcial del perfil n° 4 orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>320</b>
<b>Foto 6. 35. Situación del electrodo n° 36 del perfil n° 4.</b> .....	<b>321</b>
<b>Foto 6. 36. Vista parcial del perfil n° 1 y el sistema de soporte aéreo empleado.</b> .....	<b>324</b>
<b>Foto 6. 37. Vista parcial del perfil n° 3 orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>326</b>
<b>Foto 6. 38. Vista del perfil n° 3 situado exteriormente entre las balsas de purines.</b> .....	<b>327</b>
<b>Foto 6. 39. Vista parcial del perfil n° 4 exteriormente a la balsa n° 4.</b> .....	<b>328</b>
<b>Foto 6. 40. Vista del extremo del perfil n° 4 orientada hacia electrodo n° 1.</b> .....	<b>329</b>
<b>Foto 6. 41. Instalación para tomografía eléctrica 3D orientada a electrodo n° 1.</b> .....	<b>339</b>
<b>Foto 6. 42. Instalación para tomografía eléctrica 3D orientada a electrodo n° 36.</b> .....	<b>339</b>
<b>Foto 6. 43. Vista de la posición del sondeo mecánico n° 1 en la balsa n° 2.</b> .....	<b>346</b>
<b>Foto 6. 44. Tractor realizando la limpieza del purín en la balsa n° 3.</b> .....	<b>348</b>

<b>Foto 6. 45. Vista de la posición del sondeo mecánico nº 2 en la balsa nº 3.....</b>	<b>349</b>
<b>Foto 6. 46. Vista parcial del Perfil nº 1 orientada hacia electrodo nº 36.....</b>	<b>361</b>
<b>Foto 6. 47. Instalación del sistema de soporte aéreo para el Perfil nº 1. ....</b>	<b>362</b>
<b>Foto 6. 48. Vista parcial del Perfil nº 2 orientada hacia electrodo nº 1.....</b>	<b>363</b>
<b>Foto 6. 49. Vista general del Perfil nº 2 instalado dentro de la balsa Lorca 1. ....</b>	<b>364</b>
<b>Foto 6. 50. Vista parcial del perfil nº 1 y el sistema de soporte aéreo empleado. ....</b>	<b>367</b>
<b>Foto 6. 51. Vista parcial del perfil nº 2 exterior orientada hacia electrodo nº 1 y situación del brocal del sondeo mecánico realizado posteriormente.....</b>	<b>369</b>
<b>Foto 6. 52. Vista parcial del perfil cruzando la balsa con purín del grupo Lorca 2 (octubre de 2004). ....</b>	<b>370</b>
<b>Foto 6. 53. Vista parcial del perfil cruzando la balsa semi-vacía del grupo Lorca 2 (octubre de 2004). ....</b>	<b>372</b>
<b>Foto 6. 54. Instalación del soporte aéreo en el grupo Lorca 2 (abril de 2005).....</b>	<b>375</b>
<b>Foto 6. 55. Proceso de instalación del perfil nº 1 cruzando una de las balsas de Lorca 2.....</b>	<b>377</b>
<b>Foto 6. 56. Vista parcial del perfil nº 1 listo para medir.....</b>	<b>377</b>
<b>Foto 6. 57. Vista parcial del perfil nº 2 y posicionamiento del brocal del sondeo mecánico realizado en octubre de 2005. ....</b>	<b>379</b>
<b>Foto 6. 58. Instalación para tomografía eléctrica 3D en Lorca 1 orientada a electrodos nº 1. ....</b>	<b>380</b>
<b>Foto 6. 59. Instalación para tomografía eléctrica 3D en Lorca 2 orientada a electrodos nº 36. ....</b>	<b>386</b>
<b>Foto 6. 60. Vista de la posición del sondeo mecánico de Lorca 1.....</b>	<b>393</b>
<b>Foto 6. 61. Vista de la posición del sondeo mecánico en Lorca 2.....</b>	<b>395</b>



ÍNDICE DE TABLAS	Página
<b>Tabla 6. 1. Coordenadas de los perfiles de tomografía eléctrica 2D. ....</b>	<b>217</b>
<b>Tabla 6. 2. Granulometría de las muestras analizadas. ....</b>	<b>248</b>
<b>Tabla 6. 3. Plasticidad de las muestras analizadas. ....</b>	<b>248</b>
<b>Tabla 6. 4. Permeabilidad de las muestras analizadas. ....</b>	<b>249</b>
<b>Tabla 6. 5. Clasificación de los materiales según A.A.S.H.T.O. (Faz <i>et al.</i>, 2003a).....</b>	<b>249</b>
<b>Tabla 6. 6. Coordenadas de los perfiles de tomografía eléctrica 2D. ....</b>	<b>265</b>
<b>Tabla 6. 7. Granulometría de las muestras analizadas. ....</b>	<b>291</b>
<b>Tabla 6. 8. Plasticidad de las muestras analizadas. ....</b>	<b>292</b>
<b>Tabla 6. 9. Permeabilidad de las muestras analizadas. ....</b>	<b>292</b>
<b>Tabla 6. 10. Clasificación de los materiales según A.A.S.H.T.O. (Faz <i>et al.</i>, 2003b).....</b>	<b>293</b>

# **1 Introducción**

## **1.1 Antecedentes**

La prospección geofísica puede describirse, modificando ligeramente la descripción original, como un conjunto de técnicas que permiten efectuar un diagnóstico indirecto del subsuelo a partir de la interpretación de unos datos que son el resultado de unas mediciones y de unos cálculos (Plata, 2000) o bien, se puede definir como una rama de la física aplicada que se ocupa del estudio de las estructuras del interior de la Tierra y de la localización, en ésta, de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante a través de mediciones realizadas en superficie, o en sondeos (Orellana, 1972).

Las diferentes técnicas disponibles para la prospección geofísica en superficie pueden clasificarse en seis grandes grupos: métodos gravimétricos, métodos magnéticos, métodos sísmicos, métodos radiométricos, métodos geotérmicos y métodos geoelectrónicos (Mares, 1984); considerando la testificación geofísica para la obtención de registros geofísicos o diagráfía, como otra gran rama de la prospección geofísica para ser aplicada en sondeos (Serra y Serra, 2000).

Los métodos geoelectricos, aunque en rigor deberían denominarse métodos electromagnéticos (Orellana, 1972), se clasifican, según Iakubovskii y Liajov (1980), en métodos de campo constante (frecuencia 0), métodos de campo variable de baja frecuencia y no estacionarios (frecuencias entre  $10^{-2}$  Hz y  $10^4$  Hz) y métodos de campo variable con empleo de frecuencias radiofónicas o altas frecuencias (frecuencias entre  $10^5$  Hz y 1 GHz). Dentro de los métodos de campo constante se encuentran los métodos eléctricos de corriente continua, también llamados métodos de resistividad eléctrica (Reynolds, 1997), que representan a las técnicas de prospección que se estudian y analizan en esta Tesis Doctoral.

La prospección geofísica en general, y la prospección geoelectrica en particular, es una ciencia relativamente joven, puesto que su aparición se remonta a sólo dos o tres siglos. Los métodos geoelectricos se basan fuertemente en los principios de la física, de ahí que cualquier descubrimiento físico o cualquier contribución científica sobre este campo influyera en mayor o menor medida sobre el desarrollo de estas técnicas. En este sentido, se puede establecer el siglo XVIII como el momento en el cual se inicia el desarrollo de las técnicas geoelectricas a través de la contribución de investigadores como Gray y Wheeler que fueron los primeros en medir la conductividad de algunas rocas en el año 1720. Unos años más tarde, en 1746, Watson constata que el subsuelo posee la capacidad de conducir, según la composición del terreno, corriente eléctrica creada artificialmente.

Entre la última mitad del siglo XVIII y la primera mitad del siglo XIX surgen los “padres” de los principios físicos sobre los que se asientan los métodos geoelectricos. Éstos fueron, el matemático Georg Simon Ohm (1787-1854) que estableció la relación física entre el voltaje y la corriente eléctrica, el también matemático Andre Marie Ampere (1775-1836) que definió el valor de la intensidad del campo magnético que va asociada a un flujo de corriente eléctrica y el físico Michael Faraday (1791-1867) que demostró la generación de corriente inducida en una espira, al girar ésta dentro de un campo magnético. Sin embargo, no fue hasta 1873 cuando el físico Jame Clerk Maxwell (1831-1879) unificó matemáticamente las teorías electromagnéticas anteriores en su *Treatise on Electricity and Magnetism* (Zhdanov y Keller, 1994).

La primera aplicación de los métodos geoelectricos para la exploración de yacimientos fue en el año 1829 (Orellana, 1972; Iakubovskii y Liajov, 1980), cuando el inglés Robert Fox midió los campos eléctricos naturales que se producían a través de procesos de oxidación-reducción para descubrir los yacimientos de sulfuros de Cornualles (Inglaterra). La dificultad de estas primeras exploraciones eléctricas radicaba en el uso de electrodos no adecuados para la medida de potenciales, algo que quedó solucionado con el empleo de los electrodos impolarizables, introducidos por Barus en el año 1880. El primer hallazgo de un depósito mineral, económicamente explotable, a través de los métodos geoelectricos fue en Noruega en 1907 por Muenster (Rust, 1938). No obstante, el inicio del verdadero desarrollo sobre el uso pragmático de las ecuaciones de Maxwell para explorar el interior del subsuelo, fue debido principalmente al ingeniero de minas francés Conrad Schlumberger, considerado el “padre de la prospección eléctrica” quien, en el año 1913, descubre un yacimiento de sulfuros en Bor (Serbia) a través de la aplicación del método de polarización espontánea, también denominado método del potencial natural. En 1914 pone a punto el método de puesta a la masa (*mise à la masse*). Conrad Schlumberger y el americano Frank Wenner (1916) idean de forma independiente el dispositivo tetrapolar (Dahlin, 2001), siendo Conrad Schlumberger el primero que en el año 1920 hace un levantamiento de resistividad eléctrica que se aplica a la exploración minera y petrolera, fundando enseguida la *Société de Prospection Electrique* en 1926, sociedad que dará nacimiento un poco más tarde a dos grandes compañías geofísicas que son actualmente referencia mundial, la *Compagnie Générale de Géophysique* (C.G.G.) y la *Schlumberger Well Surveying Corporation*. En 1900 los americanos Daft y Williams fueron los primeros en proponer el uso de la corriente alterna y el empleo de los mapas de curvas equipotenciales usando receptores telefónicos (Rust, 1938). También los investigadores rusos y escandinavos incorporan metodologías en este campo, como el sueco Lundberg que en 1918 introduce el empleo de los cables de corriente en lugar de los electrodos puntuales para el método de curvas de potencial (Rust, 1938). Más tarde, entre 1919 y 1922, Lundberg y Sundberg desarrollan los métodos inductivos basados en la observación de las líneas equipotenciales del campo eléctrico y de la intensidad del campo magnético (Iakubovskii y Liajov, 1980). En los años veinte del siglo pasado la exploración geoelectrica se emplea en esencia para la prospección e investigación de yacimientos minerales (Iakubovskii y Liajov, 1980). Un gran desarrollo de la teoría de la exploración eléctrica por corriente continua se debe a la contribución hecha por el

rumano Sabba Stefanescu que en 1930 desarrolló el método de cálculo de los campos eléctricos de fuentes puntuales en terrenos estratificados horizontalmente (Dahlin, 2001; Stefanescu *et al.*, 1930). En este mismo sentido en 1943 el ruso Andrei Tikhonov también contribuyó de forma importante en el desarrollo teórico de los métodos eléctricos de corriente continua al estudiar la resolución del problema inverso para los datos geoelectrónicos (Zhdanov y Keller, 1994). Los estudios de Tikhonov, posteriormente también han jugado un papel importante en el desarrollo de los métodos electromagnéticos.

A partir de esta época, la prospección eléctrica por corriente continua se centra, principalmente, en la ejecución e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) y calicatas eléctricas (Marescot, 2004). En los años 1970 aparece una nueva forma de presentar los datos de la prospección eléctrica por corriente continua y es bajo la forma de pseudosecciones (Edwards, 1977). Sin embargo, habrá que esperar hasta principios de los años de la década de 1990 con el importante desarrollo de los medios informáticos, para que los métodos de tomografía eléctrica 2D y 3D, asociados a los algoritmos de inversión, se desarrollen (Loke y Barker, 1996a; Loke y Barker, 1996b). Se puede afirmar sin ningún tipo de duda que la tomografía eléctrica es el origen actual del nuevo desarrollo que está conociendo la corriente eléctrica por corriente continua (Dahlin, 1993).

La prospección eléctrica se emplea actualmente, de una manera habitual, con el objetivo de estudiar la hidrogeología de una zona (Marescot y Chapellier, 2003a; Marescot y Chapellier, 2003b; Marescot *et al.*, 2003a), exploración minera (Aracil *et al.*, 2002), caracterizar la fracturación (Wang *et al.*, 1991), detectar cavidades o estructuras heladas (Porres, 2003; Delaloye *et al.*, 2003; Reynard *et al.*, 2003; Marescot *et al.*, 2001), obtener imágenes 2D sobre intrusiones de agua salada en el subsuelo (Bevc y Morrison, 1991), detectar la presencia de vestigios arqueológicos (Porres, 2003; Hesse *et al.*, 1986), estudiar la estructura de los suelos y de la superficie próxima (Benderitter *et al.*, 1994; Panissod, 1997; Bourennane *et al.*, 1998; Panissod *et al.*, 1998; Michot, 2003), estudiar la contaminación de acuíferos por fuentes antrópicas (Buselli *et al.*, 1998; Buselli y Lu 2000; Buselli y Lu 1999), investigaciones sobre depósitos de estériles mineros (Campbell y Fitterman, 2000), o incluso delimitar las descargas de los vertidos contaminantes en el subsuelo y revelar su evolución en el mismo (Aracil *et al.*,

2005a; Aracil *et al.*, 2004a; Daily *et al.*, 1995; Daily y Ramirez, 1995; de Lima *et al.*, 1995; Park, 1998; Olayinka y Yaramanci, 1999; Slater *et al.*, 2000; Dahlin *et al.*, 2002). Las técnicas geofísicas de tomografía eléctrica están suscitando un interés creciente en ámbitos de la ingeniería civil (Draskovits y Simon, 1992; Johansson y Dahlin, 1996; Maillol *et al.*, 1999; Yaramanci, 2000; Yaramanci y Kiewer, 2000; Denis *et al.*, 2002; Lataste, 2002; Chouteau y Beaulieu, 2002; Chouteau *et al.*, 2003). Investigaciones en el dominio de la tomografía eléctrica biomédica están actualmente bajo un desarrollo constante (Linderholm *et al.*, 2004; Lionheart, 2004). En los últimos años están apareciendo técnicas geoelectricas correspondientes al desarrollo de equipos de adquisición de tomografía electrostática en continuo para obtener pseudosecciones de resistividad sobre superficies “duras”, que se dan habitualmente en ambientes urbanos (hormigón, asfalto, membranas PEHD, etc.), donde no es posible clavar los electrodos o bien, esta tarea se convierte en pesada (Tabbagh *et al.*, 1993; Panissod *et al.*, 1998; Tabbagh *et al.*, 2002). Últimamente se han desarrollado equipos para la toma de medidas eléctricas (galvánicas e inducidas) en continuo a través de pequeños vehículos que van arrastrando un elemento longitudinal de kevlar donde van alojados los electrodos y que permite cubrir varios kilómetros de medidas en un solo día (Christensen y Sorensen, 2001).

Desde una óptica más particular, los métodos geofísicos aplicados al estudio de zonas contaminadas ofrecen información sobre la extensión de la contaminación y sobre la constitución del subsuelo más superficial (dentro de una franja comprendida entre 0 y 30 metros de profundidad) que integran la naturaleza de los materiales, su porosidad, su hidrología (zona de aireación o zona freática). Las investigaciones en este campo han visto un desarrollo importante en los últimos diez años pudiendo destacarse algunos de estos trabajos como son, entre otros, los siguientes:

Bernstone y Dahlin (1997) utilizan la tomografía eléctrica 2D y medidas electromagnéticas Slingram (ver Capítulo 3) sobre zona baldía, para localizar un penacho salino, lodo industrial contaminado y objetos metálicos enterrados. Ogilvy *et al.* (1999) muestran con tomografía eléctrica 3D sobre un vertedero de residuos que los materiales contaminados y la arenisca tienen la misma resistividad pero que se les puede distinguir por su geometría 3D. Chambers *et al.* (1999) emplean la tomografía eléctrica 3D para obtener una geometría del valle colmatado por los residuos y la naturaleza de

estos residuos. Hördt *et al.* (2000) combinan varios métodos electromagnéticos (electromagnético en el dominio de tiempos: TDEM, y radiomagnetotelúrico) para prospeccionar una gran gama de profundidades y para determinar la contaminación del medio profundo. Sauck (2000) detecta un penacho de contaminación por LNAPL (del inglés, “*Light Non-Aqueous Phase Liquid*”) por radar y sondeos eléctricos verticales. Buselli y Lu (2001) han empleado métodos TDEM y eléctricos (corriente continua, polarización espontánea e inducida) sobre una zona minera para detectar las infiltraciones. Karlýk y Ali Kaya (2001) cartografían la extensión de la contaminación del nivel freático en un emplazamiento de desechos empleando electromagnetismo VLF (del inglés, “*Very Low Frequency*”) y corriente continua que corroboran los datos hidrogeológicos que presentan anomalías de concentración química. Frohlich y Urish (2002) muestran la aportación respectiva entre la medida geofísica de superficie (aquí sondeos eléctricos verticales) y el reconocimiento a través de sondeos, para el estudio de la calidad de un acuífero vulnerable en razón de su proximidad a una zona industrial y al mar. Chambers *et al.* (2002) demuestran la influencia de la orientación de los dispositivos eléctricos para estudiar estructuras anisotrópicas tales como objetos enterrados. Vickery y Hobbs (2003) estudian una antigua zona industrial por tomografía eléctrica 2D para el emplazamiento de los drenes de transferencia de contaminación hacia un estuario. Werkema *et al.* (2003) muestran que los métodos eléctricos son apropiados para la detección de contaminación por hidrocarburos: una zona contaminada por LNAPL presenta anomalías conductoras debidas a la biodegradación mientras que los hidrocarburos de reciente vertido se caracterizan por anomalías resistivas. Porsani *et al.* (2004) emplean perfiles radar para localizar el techo de un penacho de contaminación y sondeos eléctricos verticales para conocer la sucesión vertical por encima y fuera de la zona contaminada. Las medidas geofísicas sobre vertederos sin geomembrana superior se están generalizando, así Carpenter *et al.* (1990), Carpenter *et al.* (1991) y Cardarelli y Bernabini (1997) identifican las características del vertedero a partir de sondeos eléctricos verticales y sísmica de refracción: las zonas de fractura y de erosión en la cubierta superficial y la extensión de la contaminación. Bernstone *et al.* (2000) muestran la capacidad de las medidas eléctricas para describir la humedad en un vertedero de residuos sin necesidad de identificar el tipo de residuos. Naudet *et al.* (2003) correlacionan las medidas de polarización inducida y de potencial redox sobre un vertedero. Bentley y Gharibi (2004) analizan el aporte de las prospecciones eléctricas 3D para el estudio de zonas de

remediación. Guérin *et al.* (2004a) y Guérin *et al.* (2002) han estudiado una antigua zona industrial a través de técnicas electromagnéticas slingram y tomografía eléctrica 2D y 3D para conocer el impacto de la contaminación por zinc, plomo y ácido sulfúrico en los terrenos que ocupaba una antigua metalúrgica. Guérin *et al.* (2004b) muestran como la tomografía eléctrica puede ayudar en el análisis del contenido de humedad en depósitos de desechos para el control del birreactor, que emplean recirculación de lixiviados.

La geoquímica ha acompañado desde los inicios a la exploración geofísica. En un principio, con la finalidad exclusiva de ayudar a la detección fiable de nuevos yacimientos de mineral, hidrocarburos y gas (Fountain, 1972; Horvitz, 1939; Stegena, 1961; Schumacher, 2000) y ya en los últimos años además de lo anterior, también conjuntamente con la geofísica, para estudios tan variados como la delimitación de zonas que son potenciales para su explotación termal (Ward *et al.*, 1978), para un mayor conocimiento de los sistemas acuíferos (Glynn y Plumier, 2005), en investigaciones sobre vertederos abandonados que permiten correlacionar las medidas geoelectricas con los contenidos totales de sólidos disueltos (Meju, 2000), en investigaciones de acuíferos contaminados por hidrocarburos (Atekwana *et al.*, 2004) o su integración con los datos magnéticos y espectrométricos obtenidos a través de vuelos para el estudio de depósitos de cobre (Ranjbar *et al.*, 2001).

## **1.2. Problemática ambiental de las balsas mineras y ganaderas**

En esta Tesis Doctoral se aborda el estudio de los principales focos de contaminación antrópica de la Región de Murcia a través de la aplicación de técnicas geofísicas: los depósitos de estériles mineros y las balsas de purines resultado de la actividad porcina.

La importante actividad minera que ha existido en España desde la época de los romanos hasta nuestros días, aunque si bien, en intensidad ha sido más importante en los dos últimos siglos, ha generado un volumen importante de estériles procedentes de los procesos mineralúrgicos y de explotación. Estos estériles se vertían en zonas próximas a las plantas de concentración de menas, siguiendo un proceso constructivo que daba lugar a los depósitos de estériles mineros o balsas de lodos (Penman, 1996).



En la Región de Murcia estos depósitos de estériles se encuentran, principalmente, en las que fueron las principales comarcas mineras: Cartagena-La Unión y Mazarrón (Linares, 2001; S.M.M.P., 1980). Las balsas de estériles mineros de la Región de Murcia son el resultado de la explotación de sulfuros metálicos: blenda, galena y pirita, principalmente (Gallego y Monllor, 1993), y se encuentran en una región considerada como semiárida, con un régimen pluviométrico irregular, escasa vegetación colindante, y elevados niveles de escorrentía superficial; por ello, los principales problemas medioambientales que surgen de su presencia son: fenómenos de erosión y arrastre de metales pesados, inestabilidad geotécnica de las estructuras, lixiviados ácidos (I.C.A.R.D., 2000; Akcil y Koldas, 2005), contaminación de acuíferos, impacto visual y obstáculo puntual al desarrollo urbano e industrial. Como muestra de la incidencia que ha tenido la actividad minera en la Región de Murcia basta el número de depósitos catalogados por el Inventario Nacional de Balsas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia que recoge 85 depósitos de estériles (I.T.G.M.E., 1999).

Por otro lado, según datos estadísticos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, M.A.P.Y.A. (2001), España ocupaba el segundo lugar en efectivos de porcino (después de Alemania) dentro de la UE-15 con más de 22 millones de cabezas (Llona, 2005) de las que más de dos millones de cabezas se encuentran en la Región de Murcia. Esta actividad ganadera intensiva da lugar a la producción de purín que es el material residual formado por las deyecciones sólidas y líquidas de los animales y el agua procedente de los abrevaderos y limpieza de los establos. En la Región de Murcia en el 2003 se produjeron alrededor de nueve millones de m<sup>3</sup> de purín (M.A.P.Y.A., 2003) que fueron vertidos a las balsas de purines para su desecación y posterior aprovechamiento como fertilizante agrícola. Las balsas de purines, debido a la propia naturaleza del purín, son focos potenciales de contaminación: eutrofización del medio acuático de superficie (Zambaz y Messeiller, 2004), contaminación de las aguas subterráneas por nitratos, problemas de salinidad, fototoxicidad y desequilibrio nutricional en plantas (Llona, 2005).

### **1.3 Justificación de las técnicas empleadas**

Con base en los comentarios anteriores se hace idóneo el empleo de técnicas no destructivas de exploración del subsuelo, como es la tomografía eléctrica, que permitan alcanzar la profundidad de investigación deseada, sin llegar a ser necesaria la excavación del terreno y sin merma de su resolución vertical y horizontal. Estas técnicas deberán caracterizar geoelectricamente los materiales que forman el subsuelo y los fluidos contenidos en ellos, y así, poder extraer una información que va a ser útil para describir geológicamente el subsuelo y que apoyará a los trabajos que lleven a cabo otros equipos de trabajo que finalmente darán unas conclusiones definitivas sobre el estado del terreno, desde un punto de vista hidrogeológico, geotécnico, geoquímico, etc. Así mismo dichos resultados servirán para el establecimiento de las actuaciones necesarias con vistas a la completa eliminación de los riesgos de contaminación de acuíferos, drenajes de lixiviados ácidos (en inglés, “*Acid Mine Drainage*” o *AMD*), estabilidad de presas de materiales sueltos, arrastres de metales pesados, problemas erosivos, etc.

### **1.4 Objetivos**

Esta Tesis Doctoral persigue diferentes objetivos que pretenden ser alcanzados mediante la aplicación de técnicas geofísicas de tomografía eléctrica sobre zonas que son focos potenciales de contaminación directa o difusa:

#### Sobre depósitos de estériles mineros

- Establecer una metodología adecuada a este tipo de construcciones mineras.
- Analizar los resultados geoelectricos obtenidos con tomografía eléctrica sobre depósitos de estériles mineros procedentes del procesamiento de sulfuros metálicos: pirita, blenda y galena.
- Calibrar la tomografía eléctrica para este tipo de estructuras mineras.
- Valorar si la caracterización geoelectrica obtenida es válida para ser empleada en la resolución de problemas de estabilidad geotécnica, de hidrogeología, de contaminación y de cubicación de estériles mineros.

- Poner a punto y aplicar sobre el terreno la tomografía eléctrica 3D y analizar sus resultados frente a los obtenidos con tomografía eléctrica 2D.

#### Sobre balsas de purines

- Establecer una metodología adecuada a este tipo de balsas de almacenamiento, tanto con purín como sin él.
- Analizar los resultados geoeléctricos obtenidos con tomografía eléctrica sobre balsas de purines y analizar el efecto de estacionalidad sobre las medidas obtenidas.
- Calibrar la técnica de tomografía eléctrica para este tipo de estructuras de almacenamiento.
- Valorar si la caracterización geoeléctrica obtenida del subsuelo es adecuada para evaluar fielmente el grado de filtración de las balsas sin impermeabilidad artificial.
- Concluir también si la resolución de la tomografía eléctrica es capaz de correlacionar la concentración de sales contenidas en el subsuelo con la resistividad obtenida desde superficie; si es así, cuál sería el límite de aquella a partir del cual la tomografía eléctrica deja de ser fiable.

## **2 Metodología**

La elaboración de este estudio se ha llevado a cabo en zonas de la Región de Murcia que tienen en común ser fuentes potenciales de contaminación ambiental como resultado de actividades antrópicas, bien por actividades industriales, como ha sido la generación de depósitos de estériles a partir de la explotación de los recursos minerales de las comarcas mineras de Cartagena – La Unión y Mazarrón, bien por actividades ganaderas de carácter intensivo, como es la generación de purín en las explotaciones de ganado porcino.

De acuerdo a las importantes diferencias existentes entre ambos tipos de fuentes de contaminación ambiental (origen, naturaleza, área afectada, volumen almacenado y profundidad del depósito, o de la balsa, principalmente) las zonas se clasifican en dos grupos: uno (denominado grupo 1) que engloba a aquellas zonas que albergan depósito de estériles mineros (zona a y zona b) (Figura 2.1) y, otro grupo (denominado grupo 2) que engloba a aquellas otras zonas que contienen balsas de purines (zona c y zona d) (Figura 2.1). Cada grupo, por lo tanto, ha requerido una metodología específica en cuanto al número de perfiles empleados, separación entre electrodos, periodicidad de la toma de medidas, profundidad mínima de investigación exigida, etc., que más adelante se describirá.

Las zonas sobre las que se han llevado las investigaciones se han seleccionado siguiendo una serie de criterios particulares, de forma que sean representativas al resto de zonas de la Región de Murcia con la misma problemática y de idénticas características. Las conclusiones que se extraigan de esta tesis podrán ser también aplicables a dichas zonas bajo ciertas consideraciones.

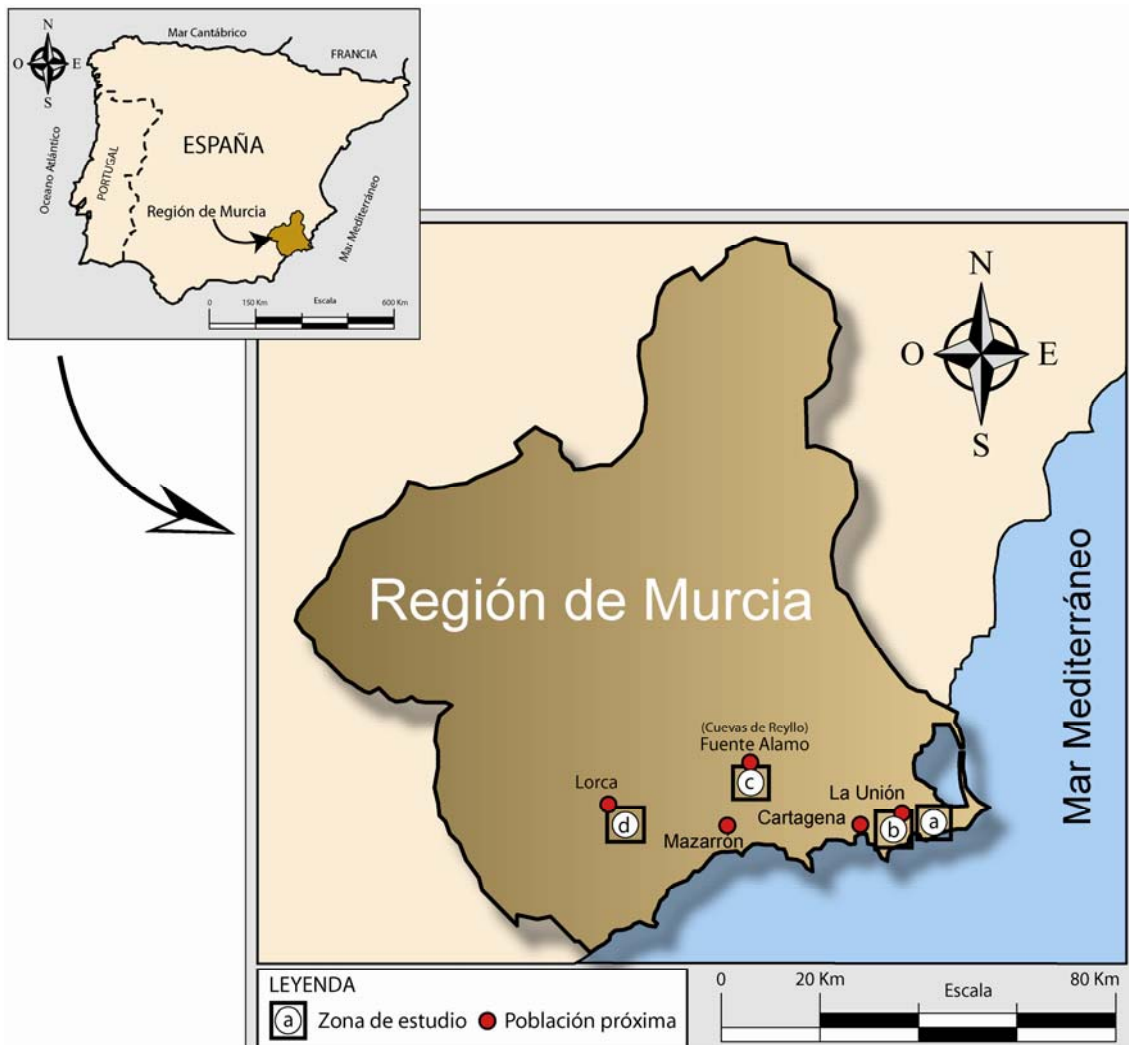


Figura 2.1. Situación de las zonas de la Región de Murcia sobre las que se han realizado las investigaciones. Depósito de estériles “El Lirio” (a); depósito de estériles “Brunita” (b); balsas de purines de Fuente-Álamo (c); balsas de purines de Lorca (d).

## 2.1 Depósitos de estériles mineros

La mayor intensidad de la investigación geofísica (tomografía eléctrica 2D y 3D) se va a centrar en el depósito denominado “Brunita” con número de identificación 0977-4-0021 según la Consejería de Economía, Industria e Innovación de la Región de

Murcia, y en el depósito denominado “El Lirio” situado en el barranco Ponce, con número de identificación 0978-1-0026. La selección de estos dos depósitos se ha realizado atendiendo a los siguientes criterios:

- Importancia del volumen de material depositado, clasificadas como presas de Clase 1 (ver definición más abajo).
- Proximidad a núcleos habitados o a infraestructuras de comunicación (carreteras, vías férreas, etc.).
- Poseer el vaso sin impermeabilizar.
- Estructuras situadas a menos de 100 metros de una corriente de agua.
- Presas sin dique exterior.
- Emplazamiento en valle.
- Presencia de signos de inestabilidad sobre su estructura (erosión, deslizamientos, grietas, cárcavamiento, etc.).
- Sistema de vertido por gravedad a través de canal o tubería.
- Existencia de condicionantes de impacto ambiental (impacto visual, contaminación de acuíferos, contaminación de aire y acción sobre flora y fauna).
- Presas con categoría A o B según el Inventario Nacional de Balsas (ver clasificación más adelante).

Según el Inventario Nacional de Balsas del I.T.G.M.E. (1999), las presas de Clase 1 se definen como: presa grande o gran presa, caracterizadas por:

- Una altura superior a 15 m, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentaciones hasta la coronación.
- O bien, una altura comprendida entre 10 y 15 m, siempre que tenga alguna de las siguientes características:
  - Longitud de coronación superior a 500 m.
  - Capacidad de embalse de líquidos superior a 1 000 000 m<sup>3</sup>.
  - Capacidad de desagüe superior a 2 000 m<sup>3</sup>/s.

El Inventario Nacional de Balsas del I.T.G.M.E. (1999), a las presas también las clasifica en varias categorías:

- Categoría A: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, así como producir daños muy importantes a los elementos en riesgo.
- Categoría B: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños importantes a los elementos en riesgo o afectar a un determinado número de viviendas.
- Categoría C: Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños de moderada importancia a los elementos en riesgo y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas.

Los dos depósitos mineros seleccionados (depósito de estériles “Brunita” y depósito de estériles “El Lirio”) cumplen los criterios arriba enumerados, por lo que son en estos depósitos donde se han centrado la mayor parte de los análisis y de los estudios programados.

### **2.1.1 Depósito de estériles “El Lirio”**

Este depósito se encuentra ubicado en la zona conocida como Coto Ponce, inmediatamente al Sureste de la mina “El Lirio”, al Sureste del Llano del Beal. Se encuentra situado en una vaguada que vierte hacia la Rambla Carrasquilla (Figura 2.2). Hacia el sur y próxima al depósito se encuentra la urbanización “Manga Club” (Foto 2.1).

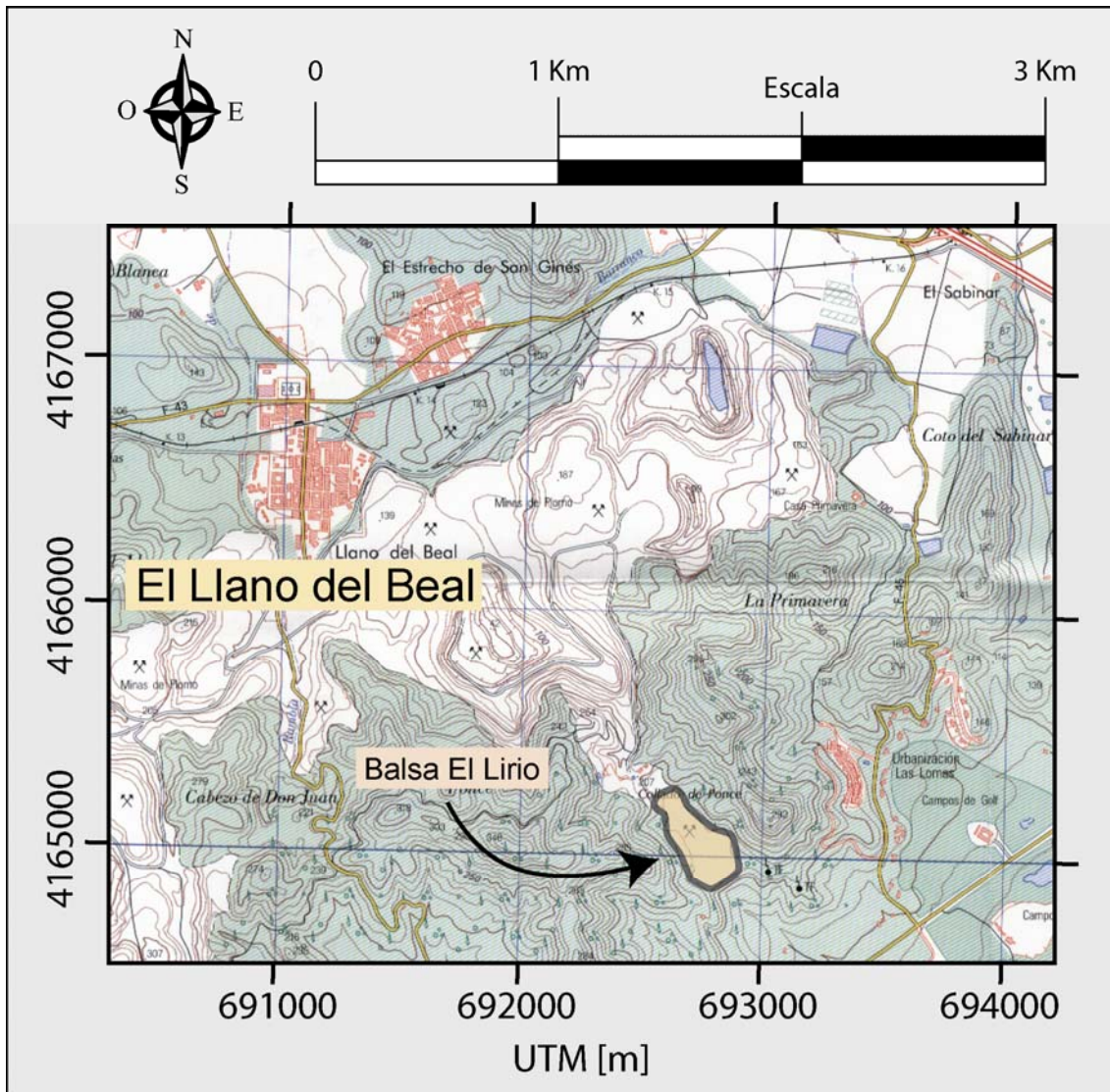


Figura 2. 2. Emplazamiento del depósito “El Lirio”.

El depósito posee una forma alargada de dirección noroeste-sureste que obedece a la forma y orientación de la vaguada sobre la que está construido.

La mayoría de los estudios llevados a cabo en el depósito (geofísica, análisis físico-químicos, hidrología, etc.), han cubierto la totalidad de su superficie, la cual consta de varios niveles de altura ya que obedece al proceso seguido en su realización (ver Apartado 5.1.1).





Foto 2. 1. Urbanización Manga Club vista desde el depósito “El Lirio”.

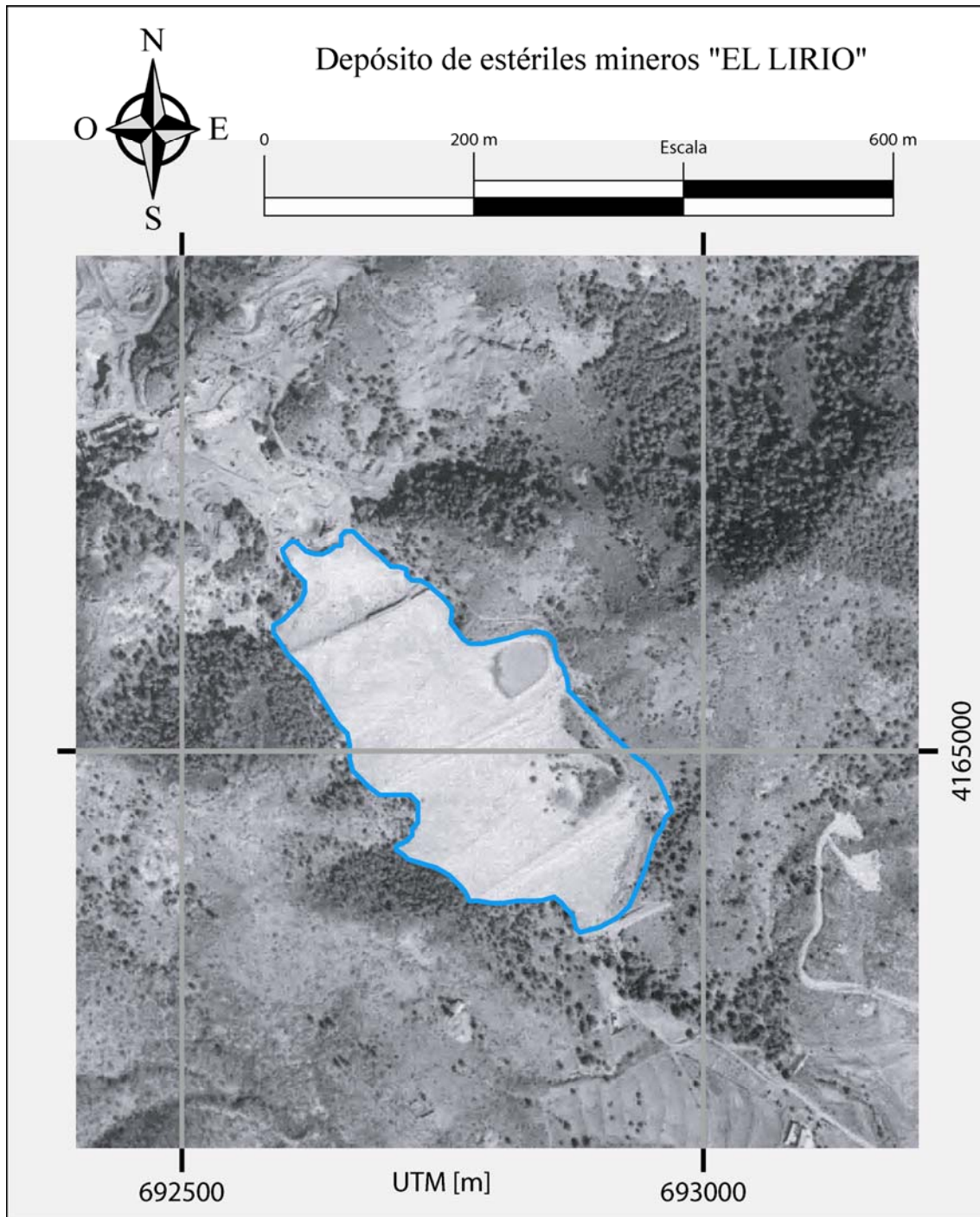


Figura 2. 3. Fotografía aérea del depósito de estériles mineros "El Lirio".

En el Capítulo 5 se hace una descripción más detallada sobre la geología, hidrogeología, vegetación, historia, etc., de la zona de estudio donde se ubica este depósito de estériles.

### 2.1.2 Depósito de estériles “Brunita”

El depósito estériles “Brunita” se encuentra al lado de la carretera N-345 (km 1) que va desde el cruce de La Esperanza a Portman, inmediatamente al sur del cementerio de La Unión, situándose su emplazamiento en el paraje Las Pocilgas. Este depósito se encuentra muy próximo a un importante núcleo urbano, como es el de La Unión, a la carretera N-332a que une dicha población con Cartagena y a la línea FEVE (Ferrocarril de Vía Estrecha) que conecta a Cartagena con las poblaciones del Mar Menor (Figura 2.4). Por ello, esta estructura se puede clasificar como de categoría A según la clasificación propuesta por el I.T.G.M.E. (1999).

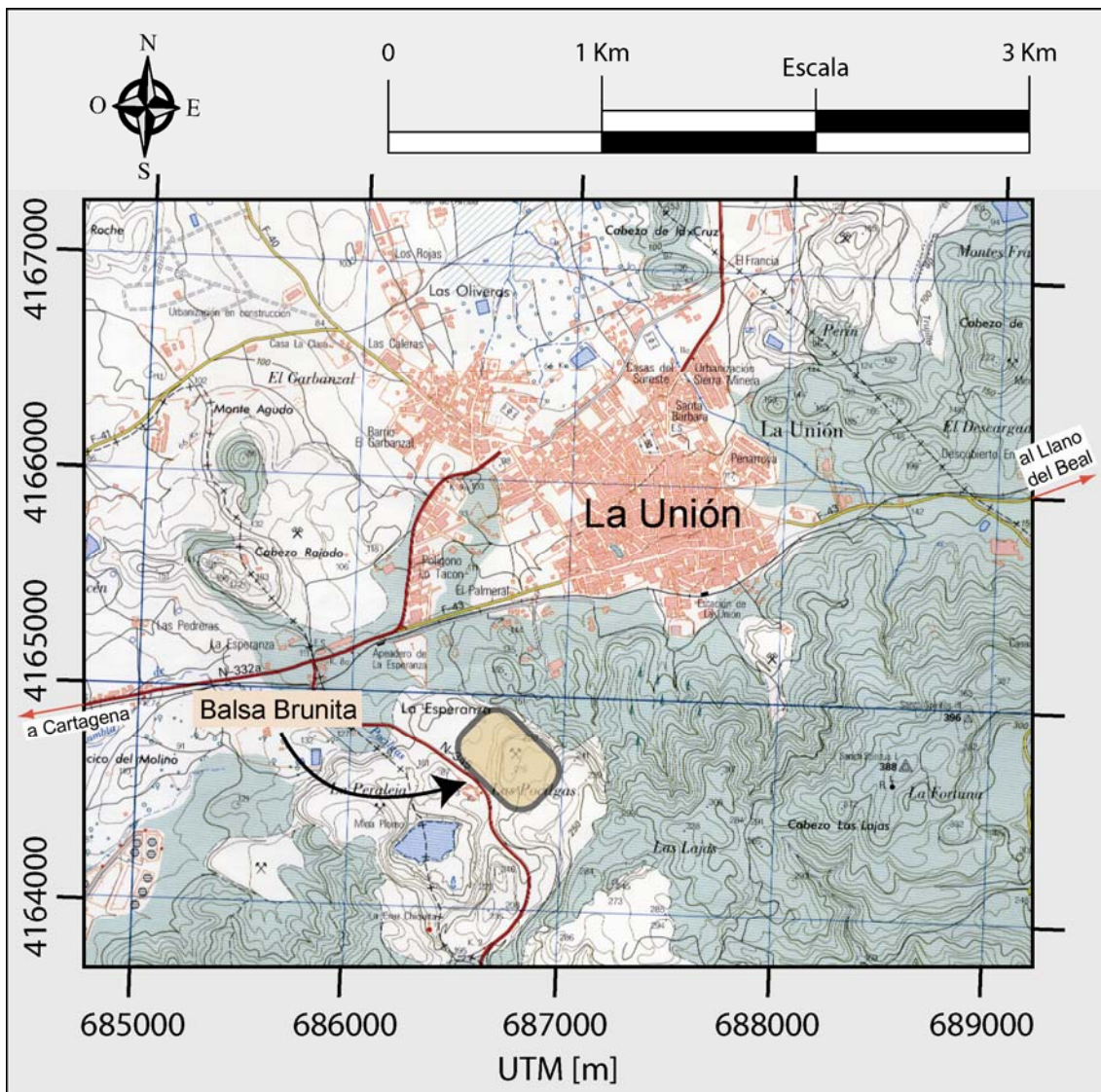


Figura 2. 4. Emplazamiento del depósito “Brunita”.

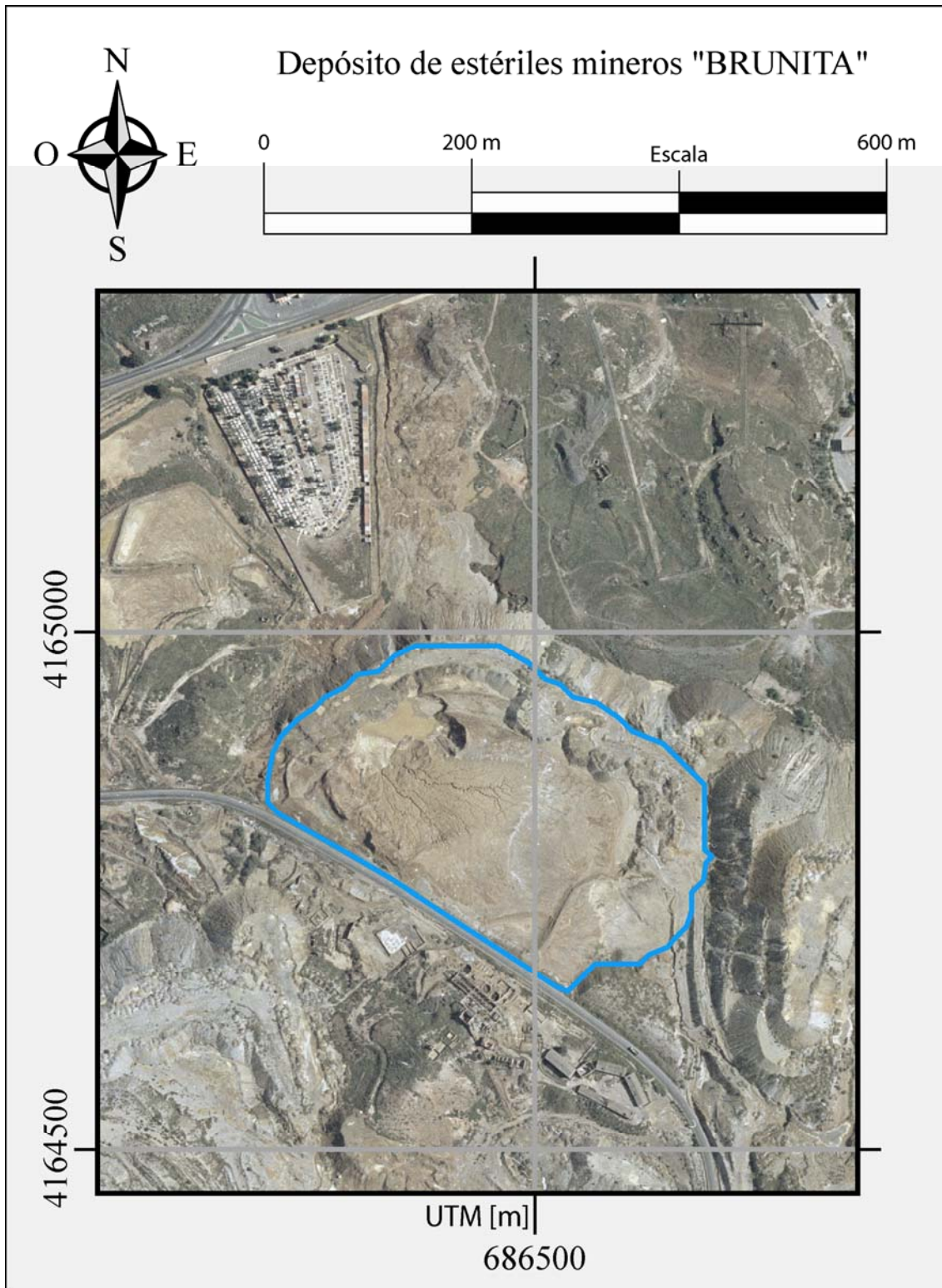


Figura 2. 5. Fotografía aérea del depósito de estériles mineros "Brunita".

La zona que ocupa el depósito corresponde a una suave vaguada que actualmente se encuentra rellena por los estériles procedentes del procesamiento mineralúrgico de los sulfuros metálicos y por grandes escombreras procedentes del desmonte de la corta Brunita (Figura 2.5).



Foto 2. 2. Vista general del depósito de estériles “Brunita”.

En el Capítulo 5 se hace una descripción más detallada sobre la geología, hidrogeología, vegetación, historia, etc., de la zona de estudio donde se ubica este depósito de estériles.

### **2.1.3 Técnicas aplicadas**

En estos depósitos se ha llevado a cabo un programa de actuaciones que ha abarcado completamente su superficie, dirigido a caracterizar la propia estructura del depósito, el tipo y la morfología del zócalo sobre el cual se asienta y el entorno próximo que lo rodea a través de estudios y análisis geofísicos, geotécnicos y geoquímicos.

Dado que el principal objetivo de esta tesis es el estudio geofísico, las técnicas geotécnicas y geoquímicas se utilizan como comparación y contraste para interpretar la fiabilidad de esta técnicas geoelectricas no destructivas.

## **Geofísica**

La investigación geofísica ha consistido en perfiles geoeléctricos de tomografía eléctrica llevados a cabo en número y longitud suficientes para cubrir la superficie de los depósitos y garantizar la profundidad de investigación exigida sin merma de resolución vertical y horizontal (Bernard, 2003). Puesto que esta Tesis Doctoral se centra en la aplicación de esta técnica geofísica, en el Capítulo 3 se describe el parámetro que mide y, en el Capítulo 4 se hace una descripción más detallada de la misma.

El equipo de medida empleado ha consistido en un resistivímetro Syscal R1 Plus (IRIS Instruments, 2001) de la casa IRIS Instruments, que dispone de un cable multiconductor con posibilidad de hasta 72 conexiones a los electrodos.

Sobre el depósito “Brunita” se han realizado tres campañas geofísicas de medidas (septiembre de 2003, febrero de 2004 y abril de 2005) que han permitido la ejecución de:

- 4 perfiles para tomografía eléctrica 2D.
- 7 perfiles para tomografía eléctrica 3D.

Sobre el depósito “El Lirio” se han realizado también tres campañas geofísicas de medidas (septiembre de 2003, febrero de 2004 y abril de 2005) que han permitido la ejecución de:

- 9 perfiles de tomografía eléctrica 2D.
- 7 perfiles de tomografía eléctrica 3D.

Los perfiles geoeléctricos se posicionaron sobre el depósito a través de GPS para una adecuada georeferenciación de los diferentes electrodos con respecto al resto de técnicas realizadas en la zona.

Posteriormente, a cada una de las campañas de campo le ha seguido inmediatamente una etapa de gabinete que consistió en la transferencia de los datos

desde el resistivímetro a un ordenador portátil, empleando para ello el programa Prosys; este programa también permitió un primer procesado de los datos para eliminar valores anómalos y realizar la corrección estática. Seguidamente, a través del programa Res2Dinv de Geotomo, para tomografía eléctrica 2D, o del programa Res3Dinv de Geotomo, para tomografía eléctrica 3D, se sometió a los datos a un proceso de inversión cuyo resultado final fue la pseudosección eléctrica sobre la cual se ha llevado a cabo la interpretación (ver Capítulo 4).

### Sondeo mecánico con extracción de testigo



Foto 2. 3. Sondeo mecánico con testigo continuo en el depósito "Brunita".

Para la caracterización y la evaluación geotécnica de los depósitos se realizó un sondeo mecánico a rotación con testigo (Puy, 1981) en cada uno de los depósitos (Foto 2.3), que permitió extraer la columna de material perforado para someterlo a los siguientes ensayos geotécnicos:

#### Índice de plasticidad (IP)

Consistió en determinar el grado de plasticidad de las muestras a través de los límites de Atterberg, que son el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). La

diferencia entre ambos límites dio el grado de humedad que admite el material y para el cual su comportamiento es plástico (B.S. 1377:1975).

### Permeabilidad

En el interior del sondeo se realizó un ensayo de permeabilidad Gilg-Gavard en la modalidad de carga variable. Para ello, tras llenar el sondeo de agua, se midió la posición de su nivel en tiempos sucesivos.

### Ensayo de penetración estándar (SPT)

También se realizó en el interior del sondeo durante la ejecución del mismo. Se empleó el penetrómetro dinámico abierto que se asemeja a un toma-muestras de tubo bipartido, pero de diámetro inferior. Este ensayo dio parámetros geotécnicos de los estériles como la densidad relativa, el ángulo de rozamiento y la carga admisible a través de su correlación con la resistencia del material al avance del penetrómetro.

### Nivel freático

La ejecución del sondeo sirvió para la instalación de un tubo piezómetro (Foto 2.3) para el seguimiento temporal del nivel piezométrico del depósito.

## **Análisis geoquímicos**

Para la caracterización físico-química de los depósitos de estériles se han realizado tres tipos de muestreo (Conesa, 2005):

*Muestreo de caracterización superficial.* Este tipo de muestreo se ha basado en una malla de muestreo aplicada en la superficie del depósito. Dentro de esta malla, las muestras se han tomado distribuidas en los vértices de un cuadrado 8x8 m y a una profundidad comprendida entre 0 y 15 cm.

*Muestreo a partir del sondeo mecánico.* Las muestras han sido obtenidas a lo largo del sondeo a intervalos de un metro y, se han tomado muestras puntuales pertenecientes al sustrato.



*Muestreo a partir de perfil de suelo.* Son muestras obtenidas en cada uno de los tres horizontes de los que consta el perfil realizado en el suelo y sirve para caracterizar edafológicamente la zona.

La metodología experimental que se ha seguido ha consistido en la determinación de una serie de parámetros:

#### pH en agua y KCl (Peech, 1965)

La determinación de pH se realizó en una solución 1:1, utilizando en cada uno de los casos agua y KCl. Estas medidas se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro provisto de un electrodo de pH combinado (pH-meter Basic 20 CRISON). Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivoltios) por el electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión  $H^+$ . Este potencial es comparado con un electrodo de referencia que produce un potencial constante e independiente del pH.

#### Sales solubles

Se ha determinado la conductividad eléctrica (ver Capítulo 3) como indicador de la concentración total de componentes ionizadas en las distintas soluciones (sólidos totales disueltos). Esta medida varía en función de la temperatura, por lo que se normaliza a 25 °C.

#### Textura (Pipeta Robinson)

El método empleado es el de la Pipeta Robinson. Los principales métodos de análisis de textura se basan en procesos de sedimentación y la “*International Union of Soil Science*” define la fracción arcilla como el conjunto de partículas de un diámetro efectivo inferior a 2  $\mu m$  y una velocidad de sedimentación en agua destilada de 10 cm en 8 horas a 20 °C.

El método ha consistido en la preparación de una suspensión del suelo en agua, previo tratamiento con el dispersante “calgón” (polifosfato de sodio). A continuación la suspensión se ha llevado a una probeta de dimensiones definidas donde se agita para homogeneizar.

Al tomar un pequeño volumen de esta suspensión de suelo, mediante una pipeta, a una profundidad y un determinado tiempo después del cese de la agitación, se obtiene una muestra en la que todas las partículas más gruesas que la partícula más grande que se quiere obtener han sido eliminadas. Los tiempos de las tomas están en función de la temperatura de la suspensión.

#### Metales totales (Digestión nítrico-perclórico)

El método ha consistido en el ataque de la muestra con una solución de ácidos fuertes (nítrico-perclórico) en calentamiento, durante un cierto tiempo, transcurrido el cual se procede al filtrado, y en la solución resultante pueden ser medidos los metales pesados mediante espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

## **2.2 Balsas de purines.**

Se han investigado dos grupos de balsas de purines, un grupo perteneciente al Municipio de Fuente-Álamo (Murcia) y otro grupo perteneciente al Municipio de Lorca (Murcia) (Figura 2.1). La selección de estos dos emplazamientos se ha realizado atendiendo a los siguientes criterios:

Los tipos de suelos a investigar son representativos de los que se emplean en la Región de Murcia para albergar este tipo de estructuras de almacenamiento.

Las balsas de purines se han construido sin impermeabilización artificial.

Poseen un amplio periodo de actividad (balsas de reciente creación y balsas de larga duración) con el fin de cotejar los resultados en ambos tipos.

Se encuentran ubicados en los dos municipios de mayor producción porcina de la Región de Murcia (el Municipio de Lorca con una producción de purín de 4 000 000 m<sup>3</sup> y el Municipio de Fuente-Álamo con una producción superior a los 2 000 000 m<sup>3</sup> según M.A.P.Y.A. (2003)).

### 2.2.1 Balsas de purines de Fuente-Álamo

Este grupo de balsas está formado por cuatro balsas agrupadas, una de las cuales (balsa nº 3) comenzó su actividad a partir de septiembre de 2003 (Figura 2.6). Todas ellas se encuentran en el Municipio de Fuente-Álamo de Murcia (ver Apartado 5.3.1).

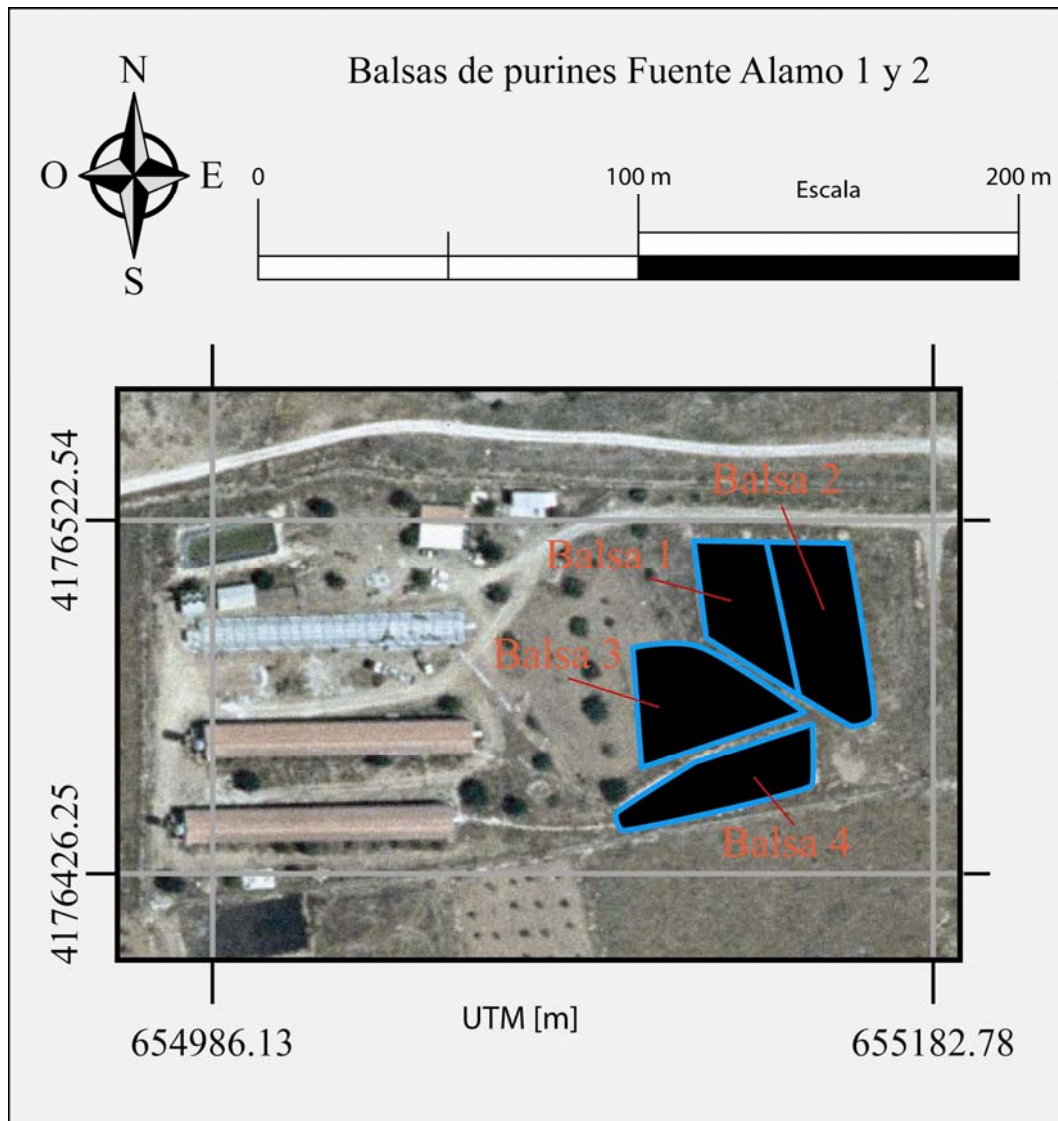


Figura 2. 6. Grupo de balsas de Fuente-Álamo de Murcia.



Foto 2. 4. Balsa nº 1 y balsa nº 2 vaciadas en septiembre de 2003.

Estas balsas se construyeron sin impermeabilización artificial (Foto 2.4). Ver el Apartado 5.3.1 para una descripción más detallada de la zona de estudio.

### **2.2.2 Balsas de purines de Lorca**

Este grupo de balsas está formado por 3 balsas, dos de las cuales están agrupadas y alejadas unos 300 metros de la tercera. Denominamos “Lorca 1” a esta última y “Lorca 2” al grupo formado por las dos balsas (Figura 2.7).

Estas balsas tampoco tienen impermeabilización artificial. La balsa “Lorca 1” posee características más propias de balsa de almacenamiento, propiamente dicha, que de balsa de evaporación debido a la profundidad del vaso de almacenamiento, que no facilita la evaporación rápida del líquido para dar estiércol (Foto 2.5).

Ver el Apartado 5.3.2 para una descripción más detallada de esta zona de estudio desde el punto de vista geológico, edafológico, hidrogeológico, de vegetación, etc.

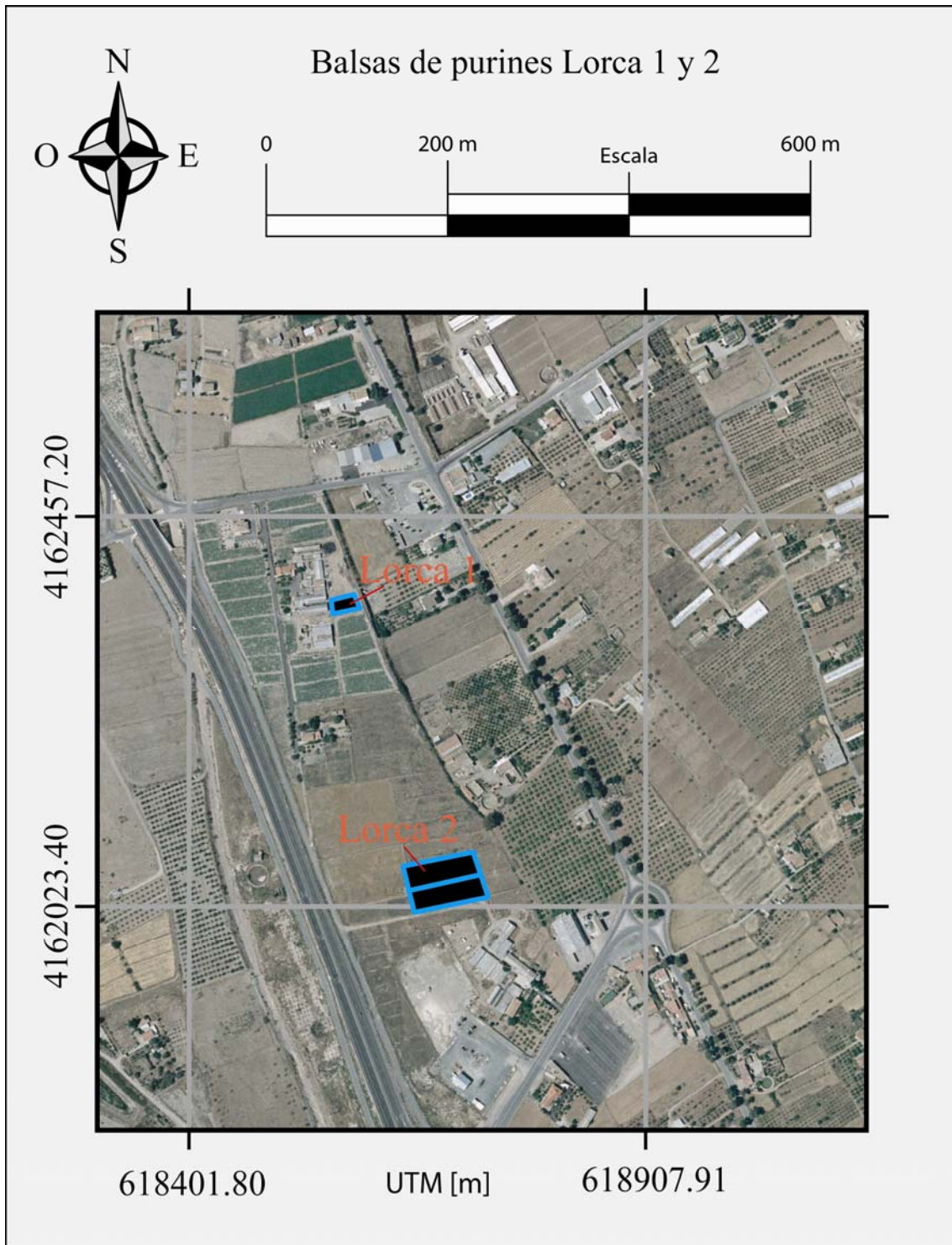


Figura 2. 7. Grupo de balsas de Lorca.



Foto 2. 5. Balsa “Lorca 1”.



Foto 2. 6. Balsa con purín del grupo “Lorca 2”.

### **2.2.3 Técnicas aplicadas**

En estas balsas también se ha llevado a cabo un programa de actuaciones que ha abarcado completamente su superficie, dirigido a caracterizar el purín, determinar los

horizontes litológicos sobre los que se asientan las balsas, estudiar la evolución temporal de los efectos de estas estructuras en el subsuelo, etc.

## **Geofísica**

La investigación geofísica ha consistido en perfiles geoeléctricos de tomografía eléctrica llevados a cabo en número y longitud suficientes para cubrir la superficie de los depósitos y garantizar la profundidad de investigación exigida sin merma de resolución vertical y horizontal (Bernard, 2003). Puesto que esta Tesis Doctoral se centra en la aplicación de esta técnica geofísica, en el Capítulo 3 se describe el parámetro que mide y, en el Capítulo 4 se hace una descripción más detallada de la misma.

El equipo de medida empleado ha consistido en un resistivímetro Syscal R1 Plus (Iris Instruments, 2001) de la casa IRIS Instruments, que dispone de un cable multiconductor con posibilidad de hasta 72 conexiones a los electrodos.

Sobre el grupo de balsas de Fuente-Álamo se han realizado cinco campañas geofísicas de medidas (septiembre de 2003, abril de 2004, octubre de 2004, abril de 2005 y septiembre de 2005) que han permitido la ejecución de un total de:

- 13 perfiles para tomografía eléctrica 2D.
- 5 perfiles para tomografía eléctrica 3D.

Sobre el grupo de balsas de Lorca se han realizado tres campañas geofísicas de medidas (octubre de 2004, abril de 2005 y septiembre de 2005) que han permitido la ejecución de un total de:

- 7 perfiles de tomografía eléctrica 2D.
- 10 perfiles para tomografía eléctrica 3D.

Los perfiles geoeléctricos se posicionaron sobre el depósito a través de GPS para una adecuada georeferenciación de los diferentes electrodos con respecto al resto de técnicas realizadas en la zona.



Posteriormente, a cada una de las campañas de campo le ha seguido inmediatamente una etapa de gabinete que consistió en la transferencia de los datos desde el resistivímetro a un ordenador portátil, empleando para ello el software Prosys; este programa también permitió un primer procesado de los datos para eliminar valores anómalos y realizar la corrección estática. Seguidamente, a través del software Res2Dinv de Geotomo, para tomografía eléctrica 2D, o del software Res3Dinv de Geotomo, para tomografía eléctrica 3D, se sometieron los datos a un proceso de inversión cuyo resultado final fue la seudosección eléctrica sobre la cual se ha llevado a cabo la interpretación (ver Capítulo 4).

### Sondeo mecánico con extracción de testigo



Foto 2. 7. Sondeo mecánico con testigo continuo en una de las balsas de purines.

Para caracterizar litológicamente los materiales sobre los que se sitúan las balsas de purines se realizó un sondeo mecánico con extracción de testigo continuo (Puy, 1981) en cada uno de los grupos de balsas de purines (Foto 2.7). La columna litológica

ha servido para relacionar los horizontes litológicos con los valores geoelectricos obtenidos con la tomografía eléctrica.

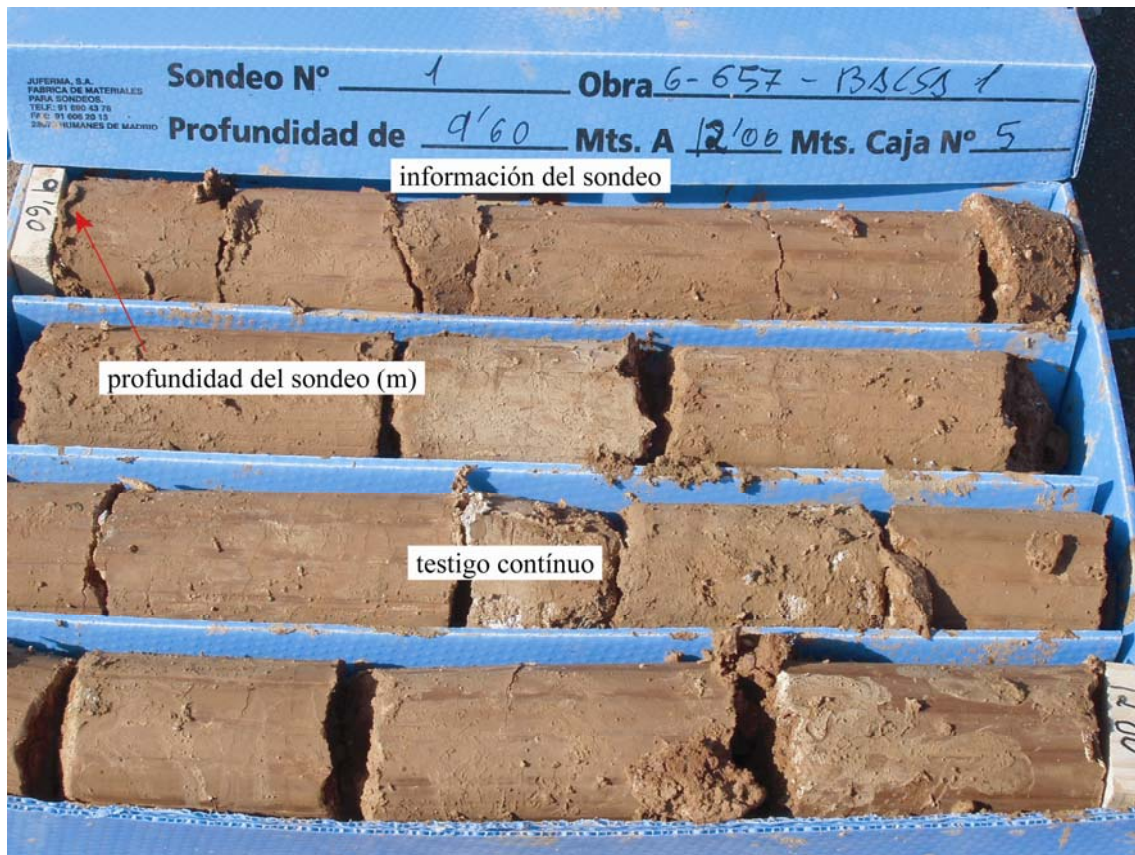


Foto 2. 8. Caja porta-testigos.

## Análisis geoquímicos

Para evaluar los efectos que originan las balsas de purines en el suelo se han efectuado análisis geoquímicos sobre: muestras superficiales de suelo, muestras obtenidas a partir de sondeos (Foto 2.8) y muestras de purín:

Al igual que en el caso de los depósitos de estériles mineros, la metodología experimental que se ha seguido ha consistido en la determinación de una serie de parámetros de dichas muestras:

### pH en agua y KCl (Peech, 1965)

La determinación de pH se realizó en una solución 1:1, utilizando en cada uno de los casos agua y KCl. Estas medidas se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro provisto de un electrodo de pH combinado (pH-meter Basic 20 CRISON). Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivoltios) por el electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión  $H^+$ . Este potencial es comparado con un electrodo de referencia que produce un potencial constante e independiente del pH.

### Conductividad eléctrica del extracto de saturación

Este análisis proporciona el diagnóstico de la salinidad-alcalinidad, por medio del conocimiento en sales solubles existentes en el suelo, proporcionales a la conductividad del mismo. La conductividad eléctrica se obtiene con un conductivímetro CRISON a 25°C.

### Textura (Pipeta Robinson)

El método empleado es el de la Pipeta Robinson. Los principales métodos de análisis de textura se basan en procesos de sedimentación y la “*International Union of Soil Science*” define la fracción arcilla como el conjunto de partículas de un diámetro efectivo inferior a 2  $\mu m$  y una velocidad de sedimentación en agua destilada de 10 cm en 8 horas a 20 °C.

El método ha consistido en la preparación de una suspensión del suelo en agua, previo tratamiento con el dispersante “calgón” (polifosfato de sodio). A continuación la suspensión se ha llevado a una probeta de dimensiones definidas donde se agita para homogeneizar.

Al tomar un pequeño volumen de esta suspensión de suelo, mediante una pipeta, a una profundidad y un determinado tiempo después del cese de la agitación, se obtiene una muestra en la que todas las partículas más gruesas que la partícula más grande que se quiere obtener han sido eliminadas. Los tiempos de las tomas están en función de la temperatura de la suspensión.

## 3 Fundamentos

El empleo de la geofísica para aplicaciones denominadas “medioambientales” ha ido aumentando de manera uniforme desde la década de los 80 (Greenhouse *et al.*, 1997). Hidrogeólogos, geólogos e ingenieros que trabajan en el estudio de situaciones que presentan un riesgo potencial para la sociedad, van a necesitar una mejor caracterización del subsuelo que la que se puede obtener exclusivamente a partir de datos de sondeos mecánicos.

La prospección geofísica es la aplicación de los principios físicos para el estudio de la Tierra. Por ejemplo, va a suponer la interpretación de campos naturales, tales como el magnetismo y la gravedad, los cuales penetran en el subsuelo y son capaces de ser influidos por su estructura. La *geofísica medioambiental* usa técnicas bien conocidas, o al menos la mayor parte de ellas, pero en este caso aplicadas en un nuevo contexto. Depende de la mayor parte de los principios y métodos que han sido conocidos y empleados durante décadas, que ahora se reorientan a problemas que son producto de la actividad de los tiempos más actuales.

### 3.1 Propiedades geofísicas para aplicaciones medioambientales en contaminación de suelos

En este apartado se discuten las propiedades geofísicas fundamentales. Para cada propiedad se da una definición básica, se proporciona la notación simbólica comúnmente empleada y sus unidades en el sistema internacional (S.I.). En numerosas ocasiones se expondrán algunos términos en inglés, conjuntamente con el nombre en castellano, debido a la internacionalización de estas técnicas y al predominio casi exclusivo de la bibliografía anglófona.

En general, la propiedad física de una roca  $g_f$  (el subíndice se emplea para “formación”) depende de las propiedades de la matriz rocosa  $g_m$ , de las propiedades del aire  $g_a$  y del resto de los fluidos  $g_w$  (agua) que rellenan los poros de la roca con una porosidad  $\phi$  (Figura 3.1). Por lo tanto, las propiedades de una mezcla de roca y agua pueden ser expresadas bajo la forma general de:

$$g_f^v = \phi \cdot g_w^v + (1 - \phi)g_m^v \quad (3.1)$$

Siendo  $g$  la propiedad, y  $f$ ,  $w$ ,  $m$  indican formación, agua y matriz respectivamente,  $\phi$  es la porosidad, y  $v$  es una constante que variará entre 1 y -1. El símbolo  $g$  puede representar a la velocidad sísmica, la densidad o la conductividad eléctrica (Greenhouse *et al.*, 1997).

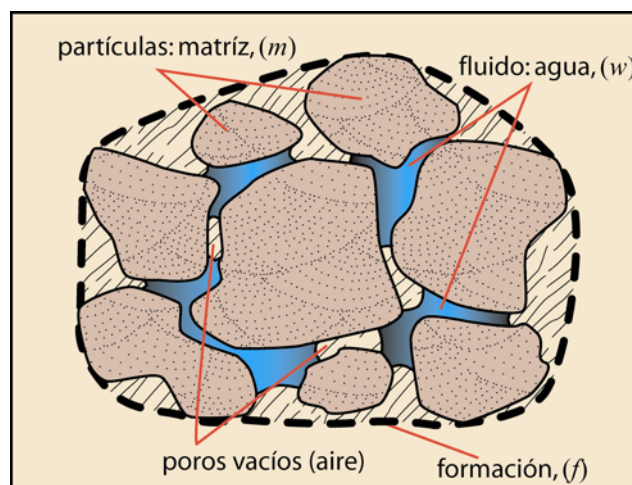


Figura 3. 1. Fragmento rocoso típico constituido por una matriz rocosa, poros y fluido (elaboración propia).

### **3.1.1. Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y resistividad ( $\rho$ )**

De entre todos los parámetros físicos y físico-químicos que se pudieran emplear para caracterizar el subsuelo, estos dos (la conductividad y, su opuesta, la resistividad) son los parámetros más importantes involucrados en investigaciones de zonas contaminadas. La conductividad, con unidades de Siemens por metro (S/m) o miliSiemens por metro (mS/m), es el factor de proporcionalidad que relaciona la corriente eléctrica que fluye libremente a través de un medio frente a la intensidad del campo eléctrico que se aplica. Es una medida de la habilidad de las cargas eléctricas a moverse a través de un medio. La ley de Ohm establece esto como:

$$J = \sigma E \quad (3.2)$$

Donde  $J$  es la densidad de corriente y  $E$  es el campo eléctrico. Ambas cantidades son vectores. La conductividad,  $\sigma$ , varía entre amplios órdenes de magnitud y puede no ser homogénea y ser anisotrópica. La conductividad necesita ser constante en el tiempo. Su valor puede cambiar con la temperatura, la presión y varios factores medioambientales. En rocas porosas, la resistividad es a menudo relacionada con la porosidad a través de la relación conocida como la ley de Archie (Reynolds, 1997).

La resistividad,  $\rho$ , es la inversa de la conductividad. Es una medida de la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de un medio. La resistividad tiene unidades de ohm·m. Para algunas investigaciones geofísicas, tales como la prospección mediante polarización inducida o mediante el dispositivo de sondeos eléctricos verticales, es más común usar la resistividad antes que la conductividad para describir la propiedad eléctrica del subsuelo.

Es importante diferenciar entre la resistividad intrínseca de un medio y la *resistividad aparente*,  $\rho_{ap}$ , medida en la superficie a través de métodos eléctricos o electromagnéticos. La resistividad aparente es definida como la resistividad de un semi-espacio homogéneo (en inglés, “*homogeneous half-space*”), y es la región que se encuentra por debajo de la superficie terrestre, produciendo la misma respuesta que aquella medida realmente sobre el terreno. Debido a las heterogeneidades del subsuelo, el valor de la resistividad media en un punto de la malla es un valor aparente. La

resistividad aparente es igual a la resistividad real o intrínseca sólo para el caso de un semi-espacio homogéneo. El concepto de resistividad aparente, el cual se trata en los métodos eléctricos, como la tomografía eléctrica, ha sido aplicado a los métodos electromagnéticos también, pero normalmente en la forma de *conductividad aparente*.

## Conductividad y porosidad

En ausencia de metales, los cuales conducen la corriente electrónicamente, la conductividad de formación esta relacionada con volumen y conductividad del agua contenida en los materiales del subsuelo. El agua subterránea conduce la corriente eléctrica a través de sus iones, y su conductividad dependerá por tanto de los *sólidos totales disueltos* (en inglés, “*total dissolved solids*” o TDS) (Gilbert *et al.*, 1999). En un medio poroso, libre de arcilla, cuya matriz es no conductora ( $\sigma_m = 0$ ), existe una relación conocida en sus varias formas que es ampliamente usada y razonablemente válida, llamada ley de Archie (U.S.A.C.E., 1979):

$$\sigma_f^v = \phi \cdot \sigma_w^v \quad \text{ó} \quad \sigma_f = \phi^{1/v} \cdot \sigma_w \quad (3.3)$$

Siendo,  $\sigma_w$  la conductividad del agua,  $\phi$  la porosidad y  $\sigma_f$  la conductividad de la formación como un todo. La constante  $v$  normalmente vale 0,5.

Si la formación está parcialmente saturada, un factor  $S^n$  multiplica al miembro derecho de la ecuación 1.3, donde  $S$  es el porcentaje de fluido que ocupa el volumen de poro y  $n$  es una constante empírica. El cociente  $F = S_w / S_f$  es conocido como “*factor de formación*” (Greenhouse *et al.*, 1997). La constante empírica  $n$  relaciona el volumen y la tortuosidad del espacio ocupado por los poros. Por lo tanto, si la conductividad de la formación y del agua subterránea pueden ser medidas por geofísica o por muestras de sondeos, entonces la porosidad puede ser estimada.

## Conductividad y contenido en arcilla

Las arcillas (“*shales*”) normalmente tienen mayores conductividades (o, consecuentemente, menores resistividades),  $\sigma_c$ , que los materiales de su entorno. En su presencia se emplea una expresión (Waxman y Smits, 1968) que es:

$$\sigma_f = F^{-1}(\sigma_w + \sigma_c) \quad (3.4)$$

Para conductividades bajas del agua, las conductividades de la roca están dominadas por la arcilla.

## Conductividad y permeabilidad

Una roca con una matriz no conductora debe ser también permeable así como porosa a la conducción eléctrica. Sin embargo, la relación entre la conductividad eléctrica y la permeabilidad es específica del lugar de investigación y por tanto es menos fiable que aquella que relaciona la conductividad y la porosidad.

Cuando sea aplicable, se puede emplear la ecuación de Kozeny (Hearst y Nelson, 1985) que relaciona la resistividad y la permeabilidad a través de la porosidad (Mazac *et al.*, 1986).

## Conductividad y profundidad “*skin*” o efecto “*skin*”

En los métodos electromagnéticos, la conductividad eléctrica del terreno o de los materiales depositados juega un importante papel en la penetración que se puede obtener con ellos. Esto es así, debido a que la conductividad “quita” o atenúa energía a la onda electromagnética (EM) a través del trabajo que realiza para mover cargas eléctricas. Cuanto mayor es la frecuencia de la onda, más rápido perderá la energía en relación a otras de baja frecuencia; se puede decir, al menos conceptualmente, que aquellas mueven más carga para un intervalo de tiempo igual.



La profundidad a la cual una onda electromagnética plana se atenúa hasta el valor de  $1/e$  (37 %) de su amplitud superficial es llamada la profundidad “*skin*”,  $d$  (Telford *et al.*, 1998). La utilidad del concepto de profundidad “*skin*” radica en que representa la máxima penetración de un método electromagnético que trabaja a una frecuencia,  $f$ , en un medio de conductividad  $\sigma$ . Sin embargo, hay que tener en cuenta que a veces la penetración puede ser mucho menor que la profundidad “*skin*” debido a otros factores como pueden ser la geometría del sistema de prospección.

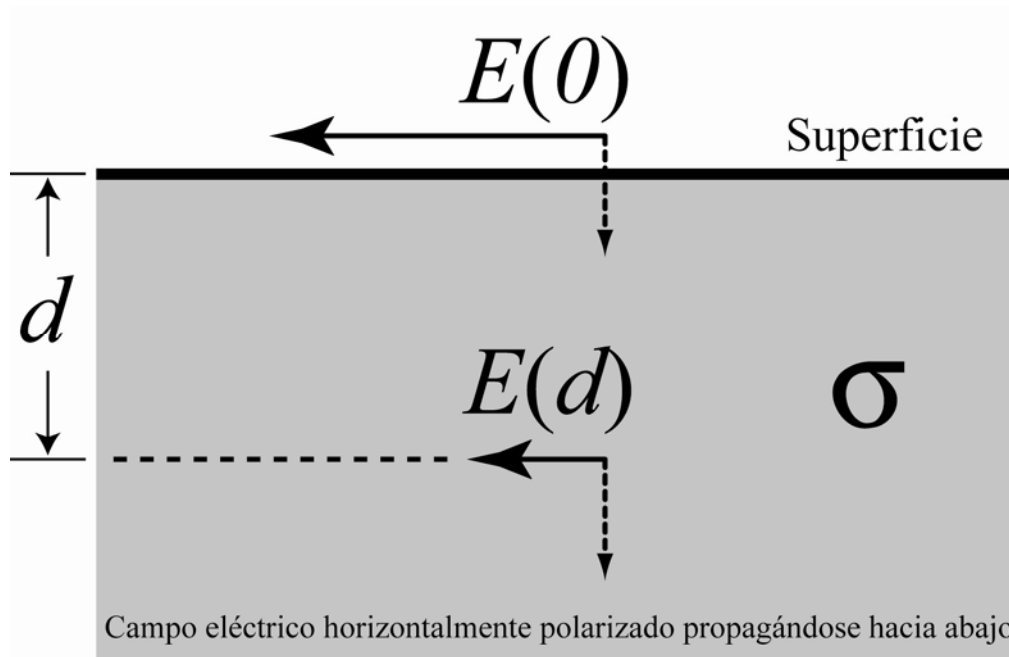


Figura 3. 2. Atenuación de un campo eléctrico  $E$  hasta un 37 % de su amplitud superficial a la profundidad  $d$  o profundidad “*skin*” (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

La profundidad “*Skin*” está relacionada a la conductividad a través de la siguiente expresión (Greenhouse *et al.*, 1997):

$$d = (\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma)^{-1/2} = 503.4(\sigma \cdot f)^{-1/2} \quad (3.5)$$

$f$  es la frecuencia en Hz,  $\sigma$  es la conductividad en Siemens/m,  $\rho$  es la resistividad en Ohm·m y  $\mu$  es la permeabilidad magnética. La segunda formulación de la expresión 3.5 asume un valor de permeabilidad magnética en el espacio libre de  $4\pi \cdot 10^{-7}$ .

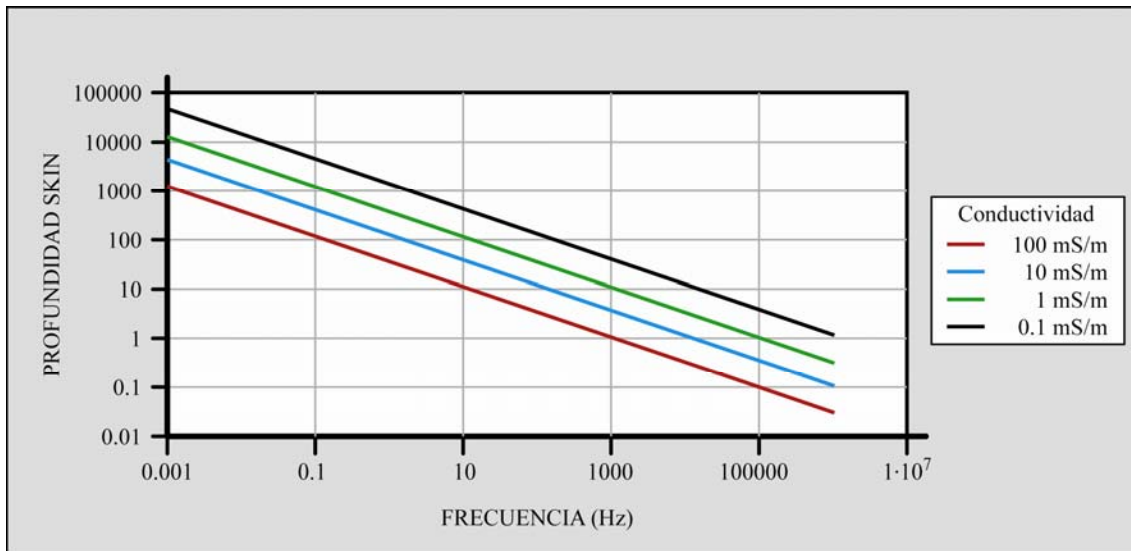


Figura 3.3. Profundidad “Skin”, en metros, como función de la frecuencia y de la conductividad de los materiales (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

## Conductividad y atenuación radar

Un tema afín es la atenuación,  $\alpha$ , de la señal radar por los terrenos o materiales conductores situados a profundidades someras o superficiales, como el caso de los suelos. La unidad de la atenuación son los decibelios por metro (db/m) y dentro del rango de frecuencia comprendidas entre 100 y 1000 MHz la atenuación vale (Annan y Cosway, 1991):

$$\alpha = 1.69 \frac{\sigma}{K^{1/2}} \quad \text{db/m} \quad (3.6)$$

$K$  es la constante dieléctrica relativa y  $\sigma$  está en mS/m.

### 3.1.2. Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) y constante dieléctrica ( $K$ )

La permitividad dieléctrica es conceptualmente similar a la conductividad eléctrica y describe una separación de cargas eléctricas (polarización) en lugar de un flujo libre de cargas eléctricas (corriente eléctrica). La permitividad eléctrica abarca a fenómenos diferentes como las deformaciones o rotaciones de moléculas, desplazamiento de cargas sobre distancias muy pequeñas, como máximo a la escala de poro, etc. (Tabbagh, 2005). Como diferencia de la conductividad, la permitividad tiene

un valor bien definido en el espacio libre o vacío,  $\epsilon_0$ , y sus unidades son faradios/m (F/m).

Un campo eléctrico aplicado polariza la distribución de carga, provocando que las positivas se dirijan en una dirección y las negativas en la otra (Figura 3.4).

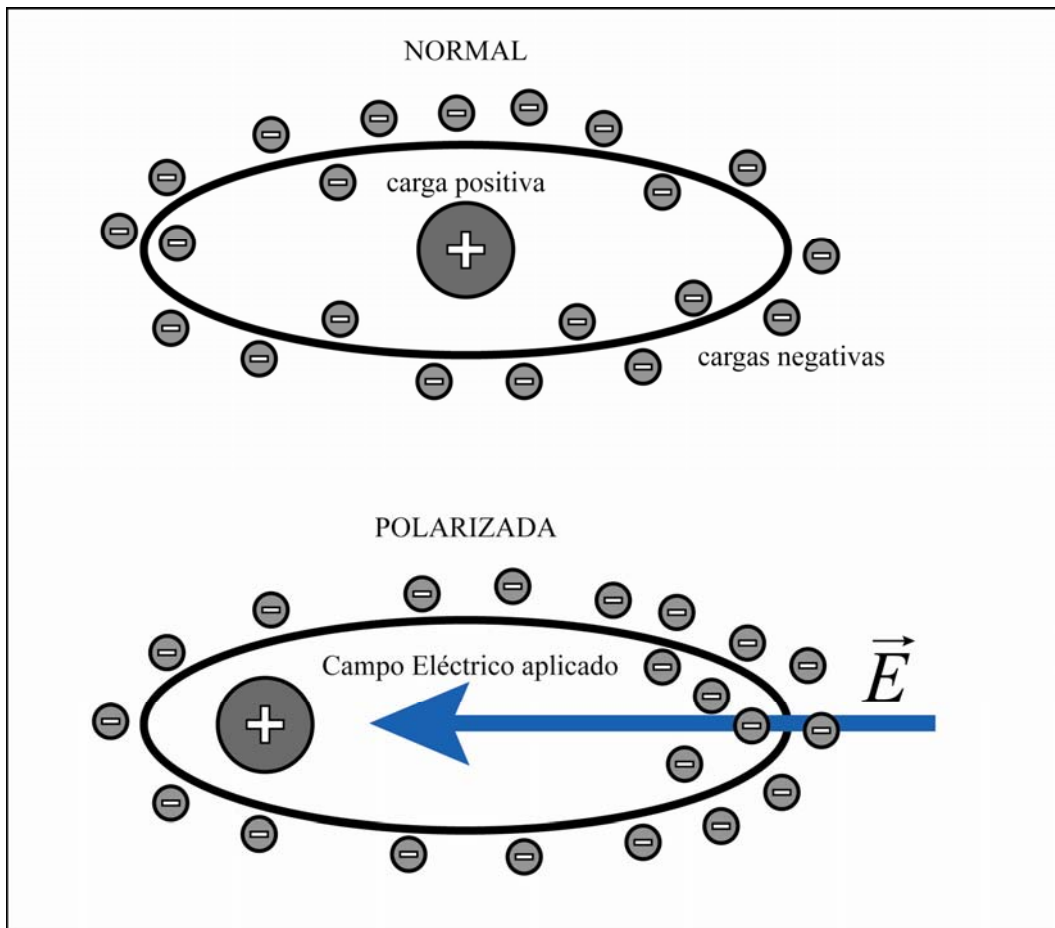


Figura 3. 4. Representación esquemática del resultado obtenido sobre las cargas eléctricas al aplicar un campo eléctrico,  $E$ , a una molécula (elaboración propia).

La polarización intrínseca,  $p$ , tiene unidades de Culombios/m<sup>2</sup>. La permitividad dieléctrica,  $\epsilon$ , relaciona la polarización con el campo eléctrico aplicado según la siguiente expresión:

$$p = \epsilon \cdot E \quad (3.7)$$

La permitividad se expresa comúnmente en términos de la permitividad en el vacío,  $\epsilon_0$ , y en términos de la constante dieléctrica  $K$ :

$$\varepsilon = K \cdot \varepsilon_0 \quad (3.8)$$

$K$  varía desde un valor de 1 para el vacío hasta un máximo de 80 para el agua.  $K$  es dependiente de manera importante de la frecuencia en ciertas partes del espectro electromagnético. No obstante, sólo se encontrará  $K$  a las frecuencias de empleo del sistema georadar o GPR (en inglés, “*ground penetrating radar*”), es decir, en el rango de 100 a 1 000 MHz.

La permitividad es el principal factor que influye en la velocidad de la radiación electromagnética dentro de los materiales del subsuelo. Contrastes en la velocidad producirán reflexiones de energía electromagnética dentro del terreno. De esta forma,  $K$  será la principal influencia sobre las medidas del GPR.

La permitividad dieléctrica,  $\varepsilon$ , tiene unidades de Culombios/voltios·m o faradios/m. La constante dieléctrica  $K$  es adimensional.

### **La constante dieléctrica $K$ y la velocidad de la radiación electromagnética**

La velocidad,  $V$ , de las ondas electromagnéticas a través de un medio de permitividad  $\varepsilon$  y permeabilidad magnética  $\mu$  es:

$$V = (\mu \cdot \varepsilon)^{-1/2} \quad (3.9)$$

### **La constante dieléctrica $K$ y la reflectividad de las ondas electromagnéticas**

El cociente o ratio entre la amplitud de la señal reflejada y la amplitud de la señal incidente (Figura 3.5), para una onda electromagnética viajando de un medio 1 a un medio 2, viene dado por:

$$R = (K_1^{1/2} - K_2^{1/2}) / (K_1^{1/2} + K_2^{1/2}) \quad (3.10)$$

## La constante dieléctrica $K$ y el contenido de agua

Con una constante dieléctrica de valor 80, el contenido de agua domina la permitividad del compuesto roca-agua. Un modelo propuesto en Greenhouse *et al.* (1997) es (Figura 3.6):

$$K_f = (1 - \phi^2) \cdot K_m + \phi^2 \cdot K_w \quad (3.11)$$

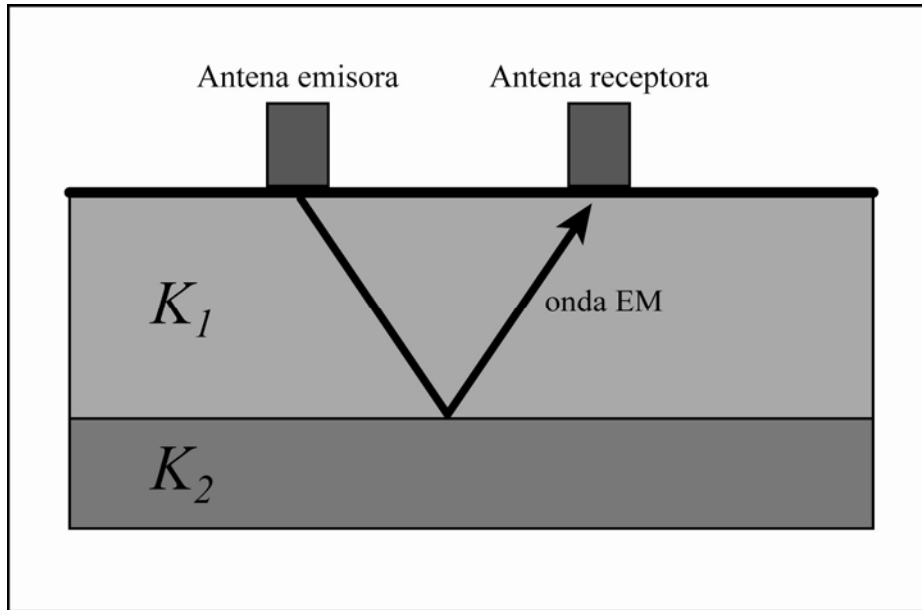


Figura 3. 5. Reflexión de una onda EM en una interfase con un significativo contraste de la constante dieléctrica,  $K$ , entre los dos medios (elaboración propia).

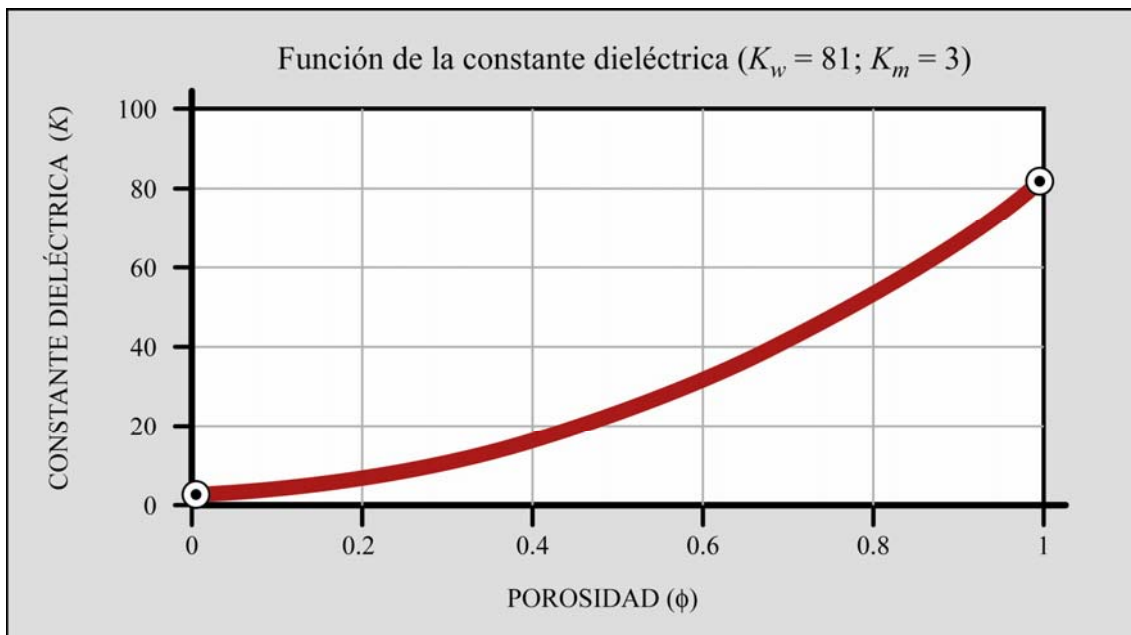


Figura 3. 6. Variación de la constante dieléctrica de una roca saturada de agua en función de la porosidad (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

### **3.1.3. Polarización inducida (IP) y resistividad compleja (CR)**

No es habitual emplear estas propiedades en el estudio de depósitos o vertederos de residuos pero tienen interesantes aplicaciones para la detección de restos de metales y materia orgánica. Las propiedades eléctricas se convierten en dependientes de la frecuencia cuando las cargas eléctricas se acumulan produciéndose polarización.

En la expresión 3.2 de la ley de Ohm se ha establecido que la conductividad eléctrica,  $\sigma$ , es la constante de proporcionalidad entre la corriente eléctrica y el campo eléctrico aplicado. Según dicha expresión, si se aplica un campo eléctrico variable con el tiempo, la corriente también será variable con el tiempo. Por ejemplo, si el campo aplicado es sinusoidal con cero en el tiempo  $t_1$ , entonces la corriente también lo será. Lo anterior implica que la resistividad,  $\rho$ , es independiente de la frecuencia o del comportamiento temporal del campo aplicado. Sin embargo la resistividad (conductividad) casi siempre es dependiente de la frecuencia en cierto grado y también es de naturaleza compleja, esto es, tendrá la siguiente expresión:

$$\rho(f) = \rho'(f) + i\rho''(f) \quad (3.12)$$

En este caso la corriente aún continúa siendo linealmente proporcional al campo aplicado pero ahora sufrirá un desfase en relación a él (Figura 3.7). Una representación equivalente de los efectos de una resistividad compleja es el resultado de la desconexión brusca de un voltaje que se está aplicando sobre la superficie terrestre. Teóricamente la corriente eléctrica en el terreno debería cesar inmediatamente, pero cuando la resistividad es compleja, la corriente continuará fluyendo durante un periodo de tiempo que puede ir desde microsegundos hasta una décima de segundo en algunos casos (Figura 3.8).

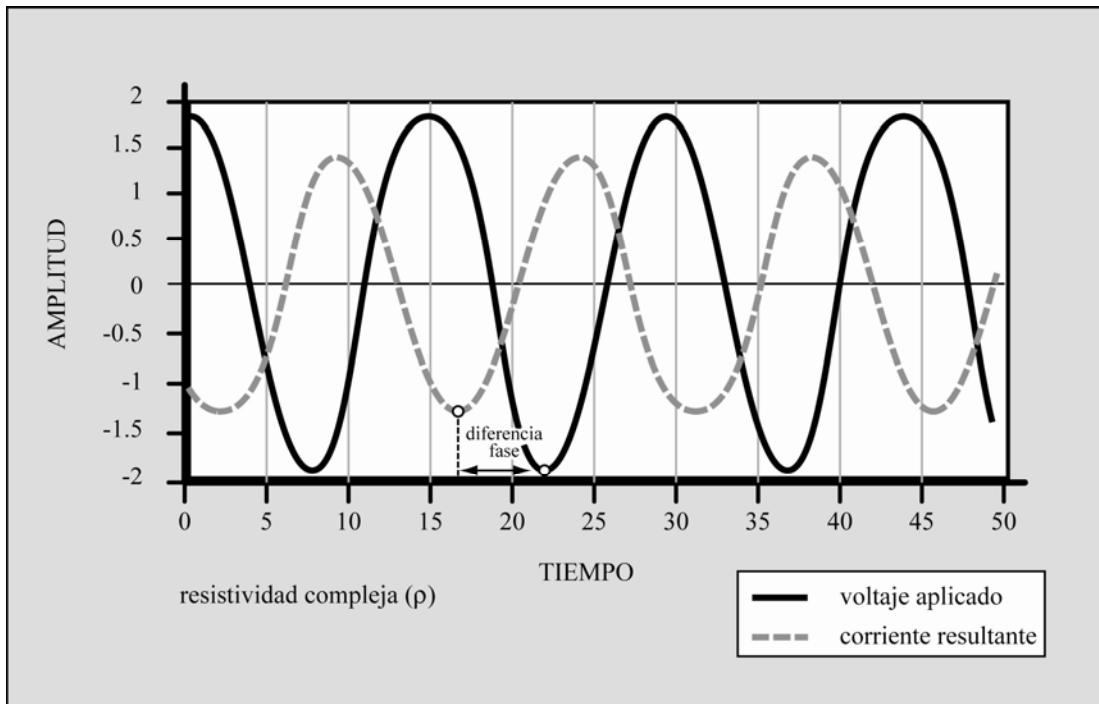


Figura 3. 7. Representación del desfase que se produce entre la señal del voltaje aplicado y la señal de la corriente resultante cuando tenemos una resistividad compleja (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

Métodos geofísicos ya conocidos como la polarización inducida (*IP*), la polarización inducida espectral (*SIP*) o la resistividad compleja (*CR*) explotan esta propiedad más general del parámetro de la resistividad/conductividad. El proceso mediante el cual se produce un desfase entre el campo eléctrico y la corriente implican un cierto retraso entre la causa (campo eléctrico) y el efecto (corriente), y esto requiere que la energía contenida en el campo eléctrico sea guardada durante un cierto instante antes de ser convertida a un flujo de corriente eléctrica; en un circuito eléctrico esto podría ser descrito como un condensador. En el terreno hay algunos mecanismos que mejoran este comportamiento complejo dependiente de la frecuencia de la resistividad. Los minerales metálicos diseminados constituyen, sobradamente el más importante objetivo de las investigaciones por *IP*. El mecanismo para el almacenamiento/retraso está relacionado, al menos conceptualmente, con el bloqueo de los poros por partículas metálicas (Reynolds, 1997). Un efecto similar puede ser observado en depósitos de residuos sólidos urbanos (*RSU*) con un contenido importante de desechos metálicos. Estos elementos diseminados pueden no incrementar la resistividad media pero pueden ser cargados eléctricamente ante la aplicación de un campo eléctrico y ser reconocida su presencia con una descarga suave del voltaje cuando el campo eléctrico se desconecta de forma abrupta (Figura 3.8). Estos efectos son más pronunciados a frecuencias por

debajo de los 1 000 Hz. Olhoeft (1986; 1992) describe otros tres procesos químicos activos que; aunque producen unas anomalías IP y CR más pequeñas, en algunas ocasiones son importantes. En arcillas, el proceso de intercambio iónico crea diferentes movibilidades entre los cationes y los aniones dentro de los poros. Esta separación o polarización de cargas se conoce con el nombre de *polarización de membrana*; este efecto es mucho más pequeño que el observado para los metales diseminados pero puede ser aprovechado en algún caso para distinguir arcilla y acuíferos contaminados, ya que ambos tendrían una baja resistividad a través de los métodos eléctricos de corriente continua.

Olhoeft (1986) también describe algún efecto, poco comprendido, de polarización que tiene lugar cuando sustancias orgánicas reaccionan con minerales arcillosos; sin embargo esto es prometedor para ser aplicado para la detección de sustancias orgánicas en vertederos siguiendo la respuesta IP de las arcillas o para detectar contaminantes orgánicos químicos en entornos glaciares (Vanhala *et al.* 1992) donde los métodos electromagnéticos tradicionales tienen muy poco éxito ya que los contaminantes orgánicos son poco conductores.

Es habitual hablar de resistividad compleja, en lugar de conductividad compleja, aunque esto es una elección arbitraria. Las unidades más simples de la resistividad compleja son los Ohms, pero medida como una parte real ( $\rho'$ ) y una parte imaginaria ( $\rho''$ ) y como una función de la frecuencia. Alternativamente es conveniente considerar a la resistividad como teniendo una magnitud igual a  $|\rho| = (\rho'^2 + \rho''^2)^{1/2}$  (ohms) y un retraso o adelanto de fase igual a  $\phi = \tan^{-1}(\rho'' / \rho')$  (radianes o mili-radianes).

En investigaciones IP, el *efecto porcentual de la frecuencia* (en inglés, “percentage frequency effect”, PFE) es definido como diferencia normalizada entre la resistividad medida a dos frecuencias diferentes (normalmente 0,1 Hz y 10 Hz). Un parámetro relacionado es la *cargabilidad*,  $m$ , (en inglés, “chargeability”) que es medida por sistemas que registran el retraso que sufre el flujo de corriente en hacerse nulo una vez que el voltaje se ha interrumpido de forma instantánea. La cargabilidad es una medida del área que hay bajo la curva de caída.



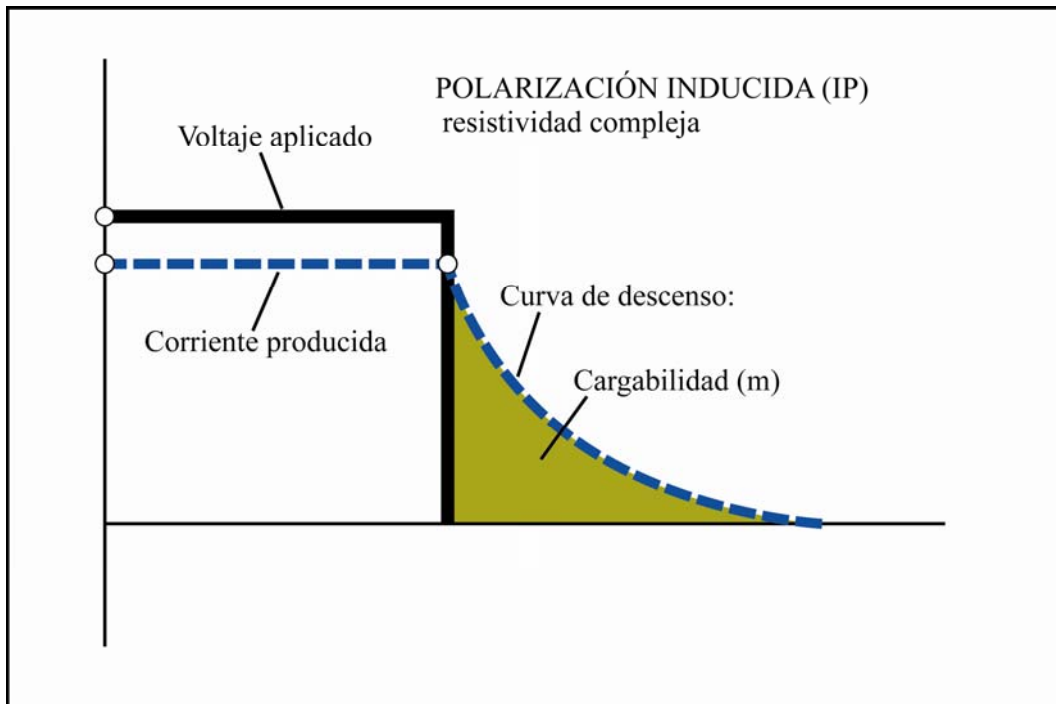


Figura 3. 8. Esquema de la curva de descenso de la corriente resultante después de desconectar el voltaje ante la presencia de resistividad compleja (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

### **3.1.4. Susceptibilidad magnética ( $k$ )**

La susceptibilidad magnética es una medida de la habilidad de un material a ser magnetizado, y es una constante proporcional que relaciona la magnetización del material,  $J$ , frente a la intensidad del campo magnético aplicado,  $T$ . La susceptibilidad está relacionada a la permeabilidad magnética,  $\mu$ , por:

$$\mu = \mu_o(1+k) \quad (3.13)$$

$\mu_o$  siendo la permeabilidad magnética del espacio libre o vacío y cuyo valor es  $4\pi \cdot 10^{-7}$ . La mayor parte de los materiales magnéticamente susceptibles son *ferromagnéticos* (o más apropiadamente *ferrimagnéticos*). De los diferentes minerales ferrimagnéticos, la magnetita predomina en las aplicaciones. En estudios de vertederos, el hierro y el acero son las principales fuentes de anomalías magnéticas.

Hay otras cantidades magnéticas pero su relación es confusa a veces. El objeto magnético básico es el polo magnético, equivalente al extremo norte de un imán. Sin

embargo el polo magnético no existe como partícula aislada sino que siempre aparece en parejas, de aquí el concepto de dipolo; un dipolo es el resultado de una carga eléctrica en movimiento, por ejemplo, haciendo pasar un corriente de intensidad  $I$  amperios alrededor de un circuito, o bobina, de área  $A$  ( $\text{m}^2$ ). En este caso la intensidad del dipolo magnético o momento magnético,  $\mathbf{H}$ , es un vector perpendicular al plano de la bobina con unidades de amperio-metro cuadrado.

Cualquier materia está constituida por cargas en movimiento, pero para la mayor parte de los materiales, los dipolos magnéticos resultantes de este movimiento de cargas se alinean de forma desordenada cancelándose unos a otros. Para aquellas sustancias en las cuales esa cancelación es incompleta se produce una magnetización y las sustancias se convierten en magnéticas. La magnetización,  $\mathbf{J}$ , se define como la densidad de dipolos alineados por metro cúbico, con unidades de amperio/metro, o en su forma reducida ( $\text{A/m}$ ). El momento magnético,  $\mathbf{M}$ , de un objeto, asumiéndolo magnetizado de forma uniforme, se puede estimar con la siguiente expresión:

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} \cdot V \quad (3.14)$$

Siendo,  $V$  el volumen del objeto (escalar).

La intensidad de magnetización,  $\mathbf{J}$ , está relacionada a la susceptibilidad magnética,  $k$ , de la sustancia magnetizada y a la intensidad del campo magnético terrestre,  $\mathbf{T}$  (en Teslas) a través de:

$$\mathbf{J} = \frac{k \cdot \mathbf{T}}{(1+k)\mu_0} \quad (3.15)$$

La susceptibilidad magnética en el sistema internacional (SI) de unidades es adimensional. La magnetización tiene unidades de amperios por metro y el campo magnético terrestre es medido en Teslas. El nanoTesla (nT) o gamma también es una unidad aceptada del campo magnético. La expresión 1.15 sólo considera magnetización inducida en una sustancia, pero si existe magnetización remanente, esta componente se combinará vectorialmente con la magnetización inducida.

Se detectan objetos magnéticos en el subsuelo a través de la distorsión que somete, su campo magnético, al campo magnético terrestre. Estas distorsiones en magnetometría son denominadas anomalías.

En las investigaciones magnetométricas de vertederos de residuos en las cuales los objetos metálicos enterrados son el objetivo, el valor de la susceptibilidad del sustrato rocoso, generalmente, es de poca entidad. Por regla general, los sedimentos poco consolidados son sustancias no magnéticas. Las rocas ígneas y metamórficas suelen tener una susceptibilidad apreciable y también muy variable. En el estudio de lixiviados de vertederos, las fallas o fisuras que suelen ser los canales potenciales de migración, a menudo se presentan con una firma magnética baja en relación con la roca de caja más magnética.

### **Susceptibilidad magnética y magnetita**

La susceptibilidad de la mayor parte de las rocas puede relacionarse, de una forma razonablemente bien, a su contenido en magnetita, según:

$$k = 12.2 \cdot f^{1.2} \quad (3.16)$$

Donde,  $f$  es la fracción en volumen de magnetita (Grant y West, 1965). La siguiente figura muestra la gráfica correspondiente a la relación 3.16.

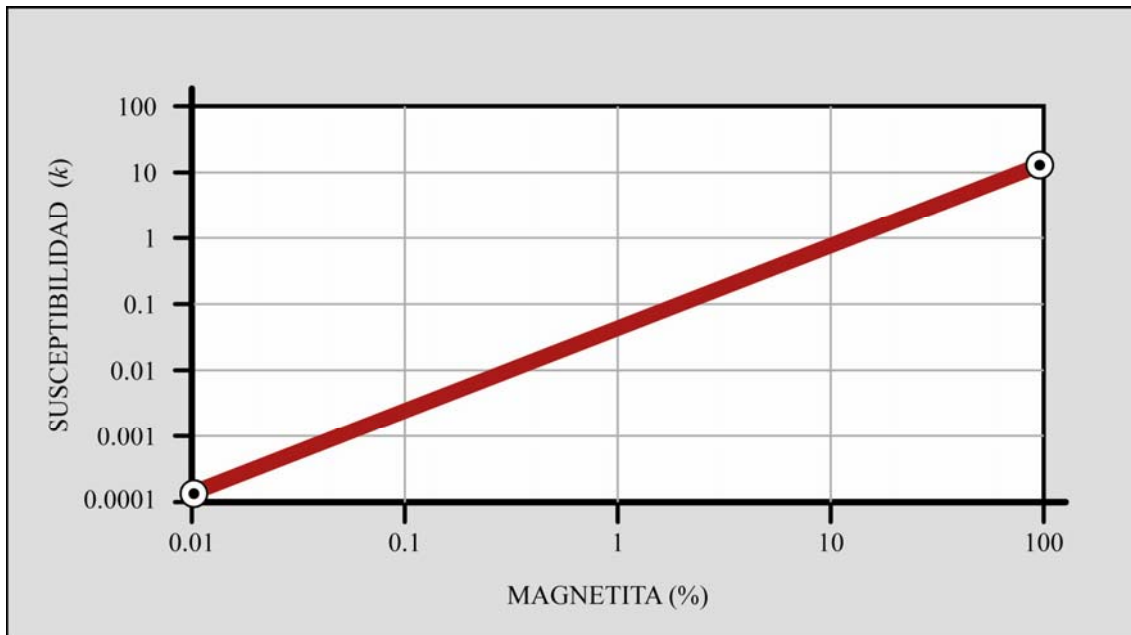


Figura 3. 9. Susceptibilidad magnética,  $k$ , de una material como función de su contenido en magnetita (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

## La magnetización de suelos

Breiner (1973) señala que los suelos de alguna manera reflejan su origen y algunos, como resultado de ello, son considerablemente más magnéticos que otros. Por ejemplo, suelos formados a partir de rocas ígneas o volcánicas tienen una susceptibilidad más alta que los suelos derivados de la alteración de caliza, arenisca o lutitas. Además, se piensa que la acción orgánica, en suelos con un alto contenido en humus, es responsable de la formación del mineral magnético denominado *maghemita* a partir de otras formas no magnéticas de óxido de hierro. Esto puede ser importante para cartografiar signos asociados a antiguos asentamientos humanos (arqueo-geofísica).

### 3.1.5. Densidad ( $\rho$ )

La densidad es un concepto muy bien conocido, que se define como la masa por unidad de volumen. Las unidades de la densidad en el SI son kilogramos por metro cúbico ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ). Desafortunadamente, los símbolos internacionalmente aceptados para la densidad y la resistividad son los mismos.

La porosidad, la saturación y la densidad de un material están relacionados a través de:

$$\rho_f = \rho_m(1-\phi) + 1000 \cdot S \cdot \phi \quad (3.17)$$

Donde los subíndices  $f$  y  $m$  se refieren a la formación y a la matriz respectivamente,  $S$  es la saturación de agua, en porcentaje, en los poros del material. Se asume, generalmente, una densidad para el agua de  $1\,000\text{ kg/m}^3$ .

En las investigaciones gravimétricas se miden las variaciones de densidad del subsuelo. Los vertederos enterrados, por sí solos, raramente suelen ser un objetivo de las campañas de gravimetría, sin embargo, esta técnica puede ser útil para poner de relieve condiciones interesantes del sustrato sobre el que se asientan estos vertederos. Por ejemplo, bloques hundidos del sustrato rocoso, valles enterrados o paleo-cauces pueden ser detectados por gravimetría debido al contraste de densidad entre los sedimentos débilmente consolidados, de  $2\,000\text{ kg/m}^3$ , y el sustrato rocoso (en inglés, “*bedrock*”), de  $2\,500$  hasta  $3\,000\text{ kg/m}^3$ . Otro objetivo interesante para los estudios de gravimetría suelen ser los huecos kársticos.

### **3.1.6. Velocidades sísmicas ( $V_p$ , $V_s$ )**

Cuando se hace detonar una carga explosiva en el subsuelo o se golpea la superficie con una maza, se generan ondas elásticas de tres tipos fundamentales que se propagan a través del subsuelo: ondas P de compresión-tracción, ondas S de cizalladura y ondas superficiales (denominadas Love y Rayleigh). Las velocidades de las ondas sísmicas son medidas en metros por segundo (m/s), y sus amplitudes se miden en el detector (cuando es posible) desde el punto de vista de la velocidad de partícula o aceleración de partícula.

Las ondas P se caracterizan por tener un movimiento de partícula en la dirección de la propagación, mientras que las ondas S tienen movimiento de partícula perpendicularmente a la dirección de propagación. Las ondas P son mucha más rápidas (un 50 % más) que las ondas S. Las ondas superficiales tienen un movimiento elíptico

retrógrado y, como en las ondas del mar, son dispersivas. Las velocidades de las ondas superficiales están en torno a un 90 % de la velocidad de las ondas de cizalladura. Las velocidades de las ondas P y S están relacionadas a través del módulo elástico del material y de la densidad:

$$V_p^2 = \frac{1.33 \cdot \mu + k}{\rho} \quad \text{y} \quad V_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.18)$$

Siendo  $\mu$  el módulo de rigidez (constante de Lamé) y  $k$  el módulo de compresibilidad (Parasnis, 1997). Debido a que los líquidos no tienen resistencia a la cizalladura ( $\mu = 0$ ), las ondas S no pueden propagarse a través de ellos.

Las ondas sísmicas generalmente no diagnostican bien los vertederos o balsas de residuos, por ello hay mejores opciones para investigar o detectar este tipo de estructuras. Sin embargo las ondas sísmicas pueden ser muy útiles para caracterizar geológicamente el entorno donde se ubica dicho vertedero y por ello son usadas ampliamente en este tipo de contextos.

### Velocidad sísmica y porosidad

La velocidad de las ondas P en un material formado por una mezcla de roca compacta y agua, obedece adecuadamente la ecuación de Wyllie hasta porosidades de 0,35 (Greenhouse *et al.*, 1997):

$$s_f = \phi \cdot s_w + (1 + \phi) s_m \quad (3.19)$$

Siendo,  $s$  la inversa de la velocidad ( $1/V$ ), y los subíndices  $f$ ,  $w$  y  $m$  indican formación, agua y matriz, respectivamente.

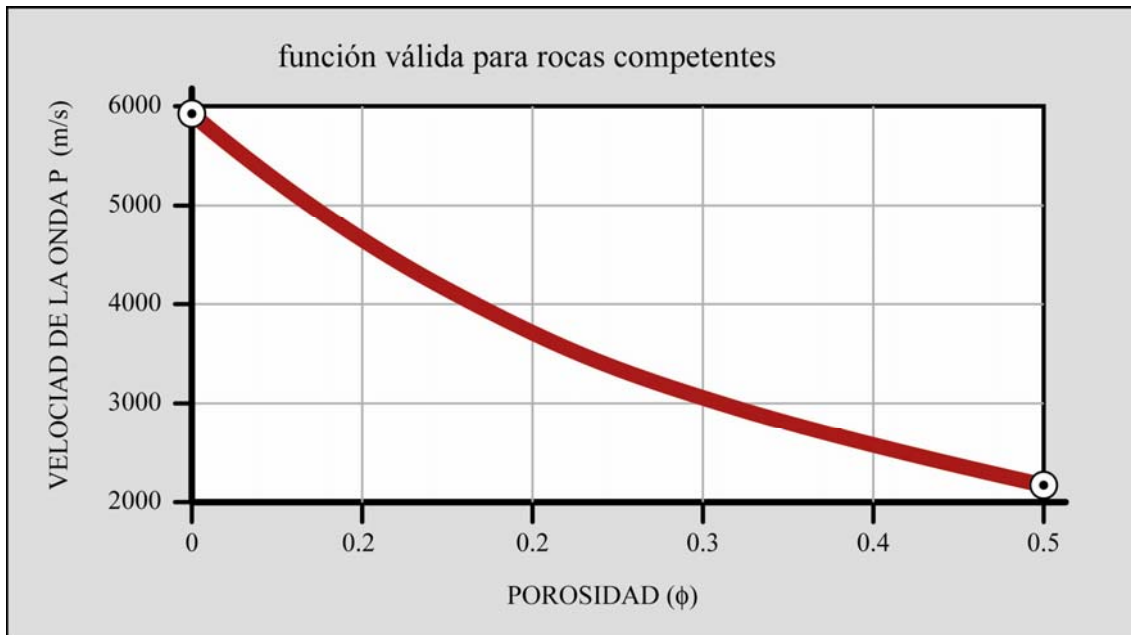


Figura 3. 10. Velocidad de la onda P a través de un medio en función de la porosidad existente en dicho medio (modificado de Greenhouse *et al.*, 1997).

### La velocidad sísmica y la reflectividad

La causa de las reflexiones que se producen en sísmica es debida al contraste de impedancia acústica ( $\rho V$ ) existente entre los materiales. Así, para las ondas que inciden de forma normal al reflector o con bajos ángulos de incidencia ( $<20^\circ$ ), el coeficiente de reflexión tiene por expresión (Reynolds, 1997):

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (3.20)$$

Donde,  $R$  es el ratio entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente.

### Velocidades sísmicas y propiedades geomecánicas

Las velocidades sísmicas pueden relacionarse a propiedades geotécnicas estándar. Por ejemplo, a través del cociente de Poisson se tiene que (Reynolds, 1997):

$$\left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 = \frac{0.5 - \sigma}{1 - \sigma} \quad (3.21)$$

### 3.1.7. Valores de las propiedades físicas para algunos materiales comunes

Las siguientes figuras muestran los rangos típicos de valores de las propiedades geofísicas descritas para algunos de los materiales y fluidos más comunes. Los valores de estos parámetros físicos han sido obtenidos a partir de las siguientes fuentes: Annan y Cosway (1991), Telford *et al.* (1998), Lankston (1990), Hinze (1990), Carmichael (1989), Keller (1988), Palacky (1988), McNeill (1980) y Breiner (1973).

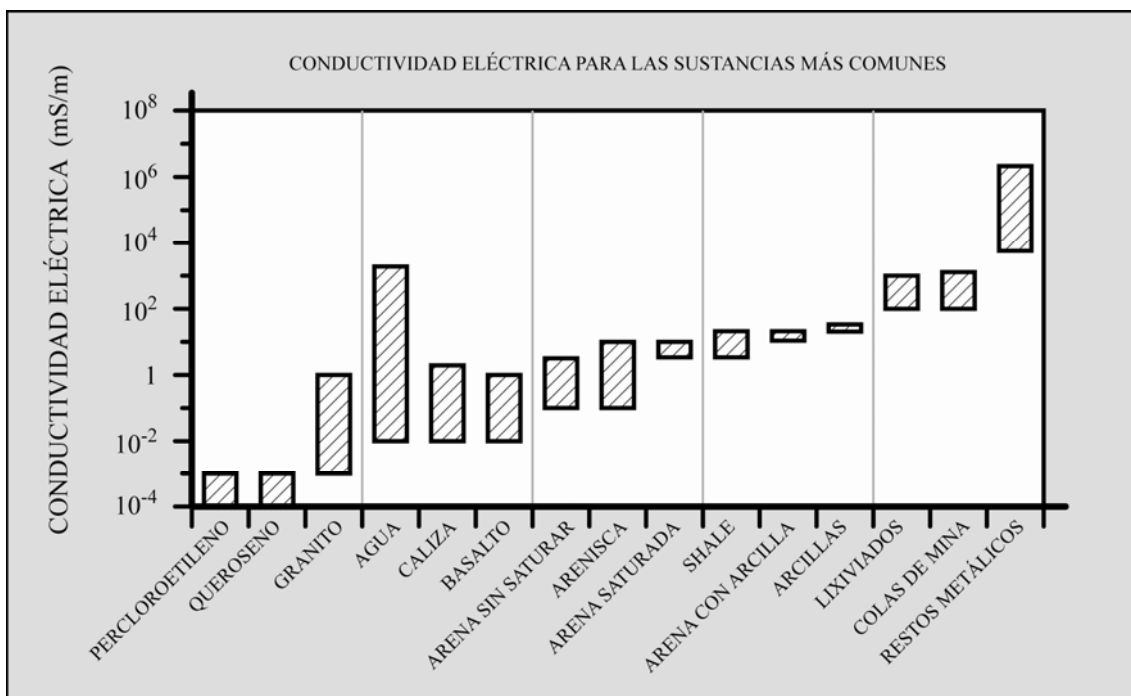


Figura 3. 11. Rangos de valores típicos de la conductividad eléctrica para algunas sustancias comunes.



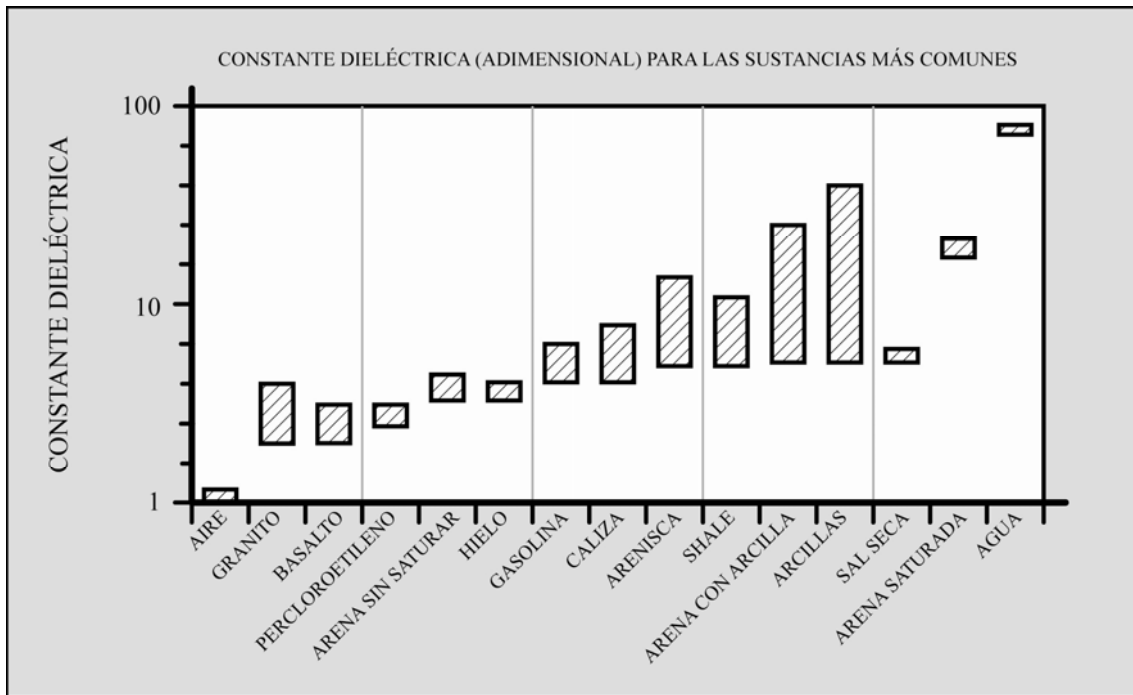


Figura 3. 12. Rangos de valores típicos de la constante dieléctrica para algunas sustancias comunes.

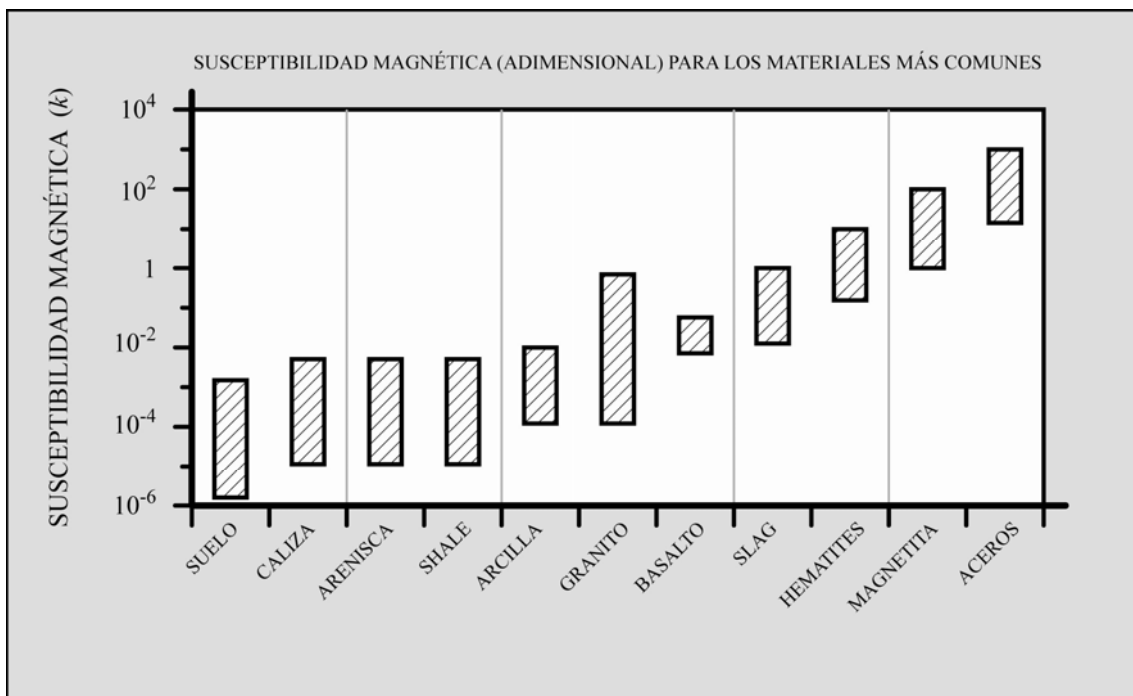


Figura 3. 13. Rangos de valores típicos de la susceptibilidad magnética para algunos materiales comunes.

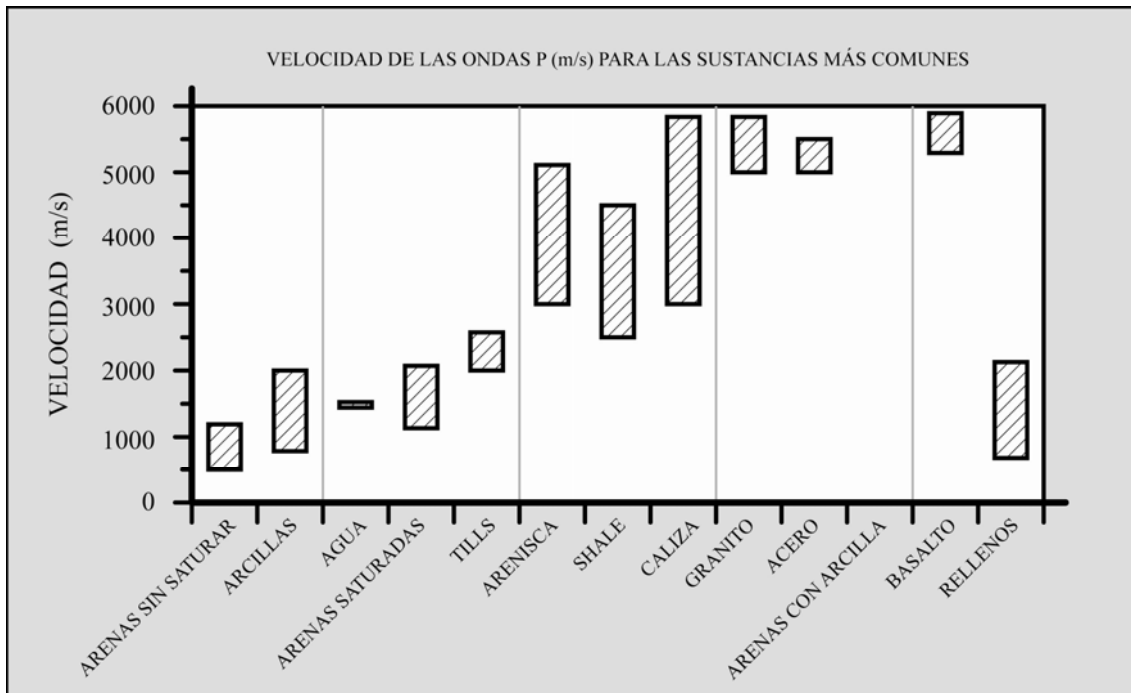


Figura 3. 14. Rangos de valores típicos de la velocidad de las ondas P para algunas sustancias comunes.

### 3.2 Técnicas geofísicas aplicadas en la superficie

En este apartado se hace una breve descripción (principios de cada técnica, equipo requerido, penetración de investigación, resolución, etc.) de los principales métodos geofísicos que son usados para la investigación de estructuras de almacenamiento de residuos: depósitos, vertederos, etc., y cuyos dispositivos se emplazan sobre la superficie del terreno. En numerosas ocasiones se describirán marcas y modelos comerciales ya que es la forma como se aborda el tratamiento de este tipo de equipos.

#### 3.2.1. Conductivímetros EM-31 y EM-34

Si hay algún instrumento que tipifica la geofísica medioambiental de las dos últimas décadas ese es el Geonics EM-31 (Gilbert *et al.*, 1999), junto con el modelo Geonics EM-34, de superior profundidad de investigación.

## Principio

El método para la medida de la conductividad del terreno a través de campos electromagnéticos (en inglés “*ground conductivity meters*” o *GCM*) es probablemente una de las técnicas más usadas para investigaciones de zonas contaminadas. El principio del conductivímetro ha sido tratado en detalle por McNeill (1980). Es una técnica electromagnética (EM) que trabaja sobre un principio simple, con ciertas variaciones. Un emisor producirá un campo electromagnético primario variable con el tiempo, el cual inducirá un voltaje en el subsuelo dando lugar a corrientes inducidas ante la presencia de un cuerpo conductor. Estas corrientes inducidas a su vez crearán un campo electromagnético (EM) secundario que es medido en el receptor. El campo EM secundario será proporcional a las corrientes inducidas en el terreno y por lo tanto proporcional a la conductividad del terreno. En el receptor se recibe la señal a baja frecuencia o bajo número de inducción (Reynolds, 1997).

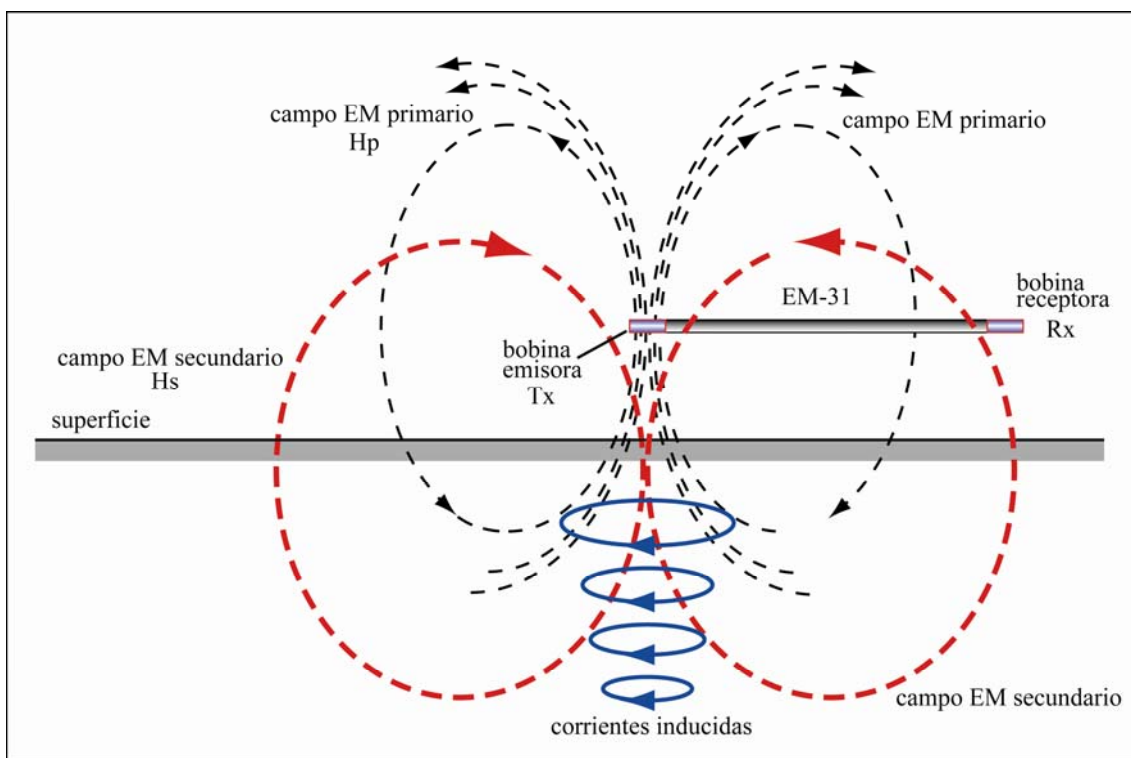


Figura 3. 15. Representación esquemática del funcionamiento de un conductivímetro Geonics EM-31 basado en la inducción electromagnética EM (modificado de McNeill, 1980).

La señal recibida en el receptor se divide en una componente real (en fase con el campo EM primario), proporcional a la susceptibilidad magnética del subsuelo, y en

una componente imaginaria (en cuadratura) a 90° fuera de fase con el campo primario directamente traducida por el equipo en un valor de conductividad expresada en mS/m (Gex, 1998). La profundidad “*skin*”, para las frecuencias normales de operación del equipo (5-15 kHz), debe ser grande en comparación al espaciamiento emisor-receptor.

### **Penetración, resolución**

La Figura 3.16 describe la penetración y la resolución vertical para los equipos Geonics (EM-31, EM-34 y EM-38) con las bobinas en posición vertical y horizontal. La profundidad es normalizada por el espaciamiento entre las bobinas para un determinado equipo. La respuesta representada gráficamente es una medida relativa de la sensibilidad del equipo a una capa delgada de material que se encuentra a una profundidad,  $z$ , normalizada. Según la figura, esta sensibilidad caerá rápidamente para profundidades normalizadas superiores a la separación entre bobinas, siendo la configuración de dipolo vertical (bobinas coplanares en posición horizontal) la que tiene una penetración mayor y una menor sensibilidad a los materiales superficiales (Reynolds, 1997).

Los equipos registran conductividades que son valores medios de volúmenes del terreno con dimensiones aproximadamente igual a espaciado entre bobinas. En este sentido, la resolución lateral también se ve afectada por la separación entre bobinas, así la respuesta que se recibe de un objeto caerá proporcionalmente a  $r^{-6}$ , siendo  $r$  la distancia entre el objeto y el emisor.

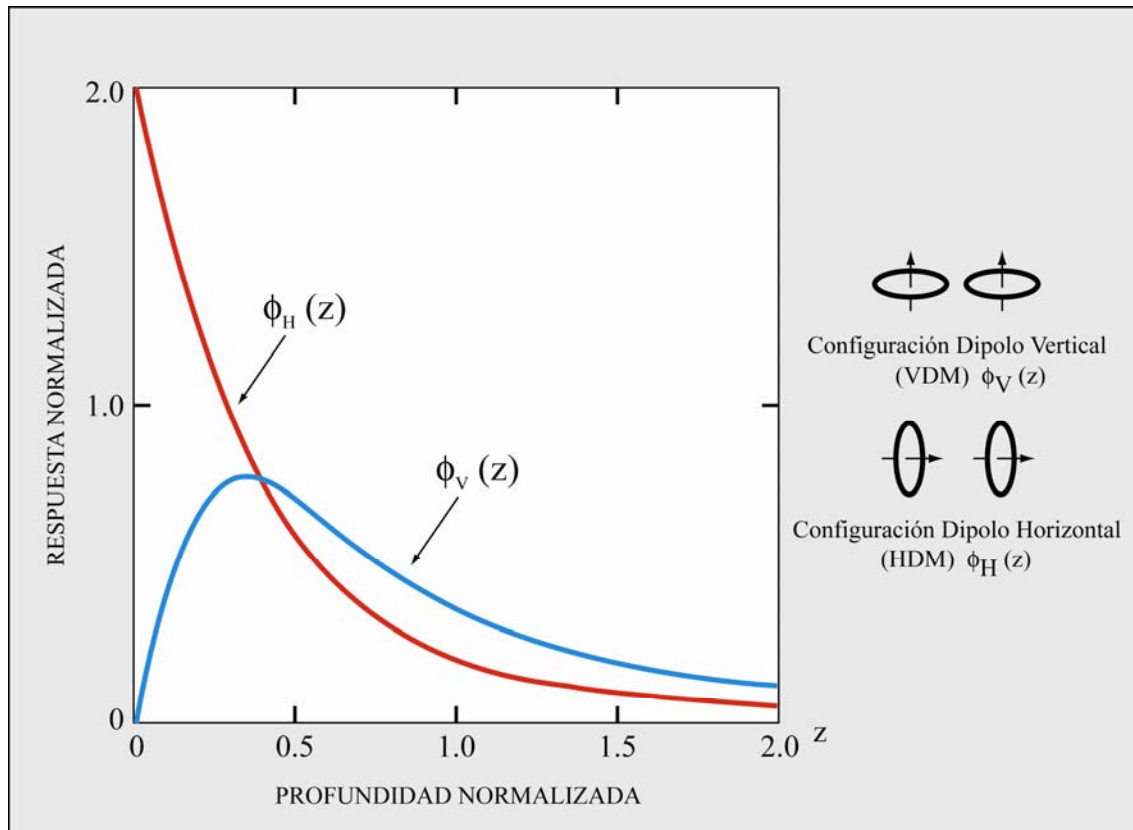


Figura 3. 16. Respuesta de la conductividad del terreno, como una función de la profundidad con las bobinas en dipolo vertical y horizontal, para los equipos Geonics EM-31 y EM-34 (modificado de McNeill, 1980).

Estos equipos se emplean, generalmente, para realizar perfiles o calicatas. Sin embargo, combinados en diferentes configuraciones de dipolo vertical y horizontal y con diferentes separaciones entre bobina, se pueden desarrollar sondeos electromagnéticos verticales; sin embargo esto resulta parcialmente fiable dada la dificultad de calibrar los equipos y las geometrías empleadas.

## Equipo

Los equipos empleados para técnicas geofísicas *GCM* son fabricados actualmente en exclusiva por Geonics Ltd. de Mississauga, Ontario, Canadá. Estos equipos pueden realizar lecturas con las bobinas coplanares en posición horizontal o vertical. Se suelen calibrar sobre terrenos de baja conductividad.

El EM-31 pone en juego un campo electromagnético de 9,8 kHz producido por una pequeña bobina de eje vertical fijada en uno de los extremos de una pértiga rígida de 4 metros de longitud; en el otro extremo se encuentra la bobina receptora, coplanar

con la primera. El equipo es manejado por un solo operador a una altura de 1 metro por encima de la superficie terrestre.

El EM-34 es un conductivímetro que se caracteriza por una longitud más grande y variable del dispositivo de medida. Consta de dos bobinas, una emisora y la otra receptora, unidas por un cable y cada una manejada por un operador. Permiten separaciones de 10, 20 ó 40 metros con profundidades de investigación también variables, siendo de 1,5 ó 0,7 veces la separación de las bobinas, en caso de trabajar con dispositivo de bobinas horizontales o dispositivo de bobinas verticales, respectivamente. Las frecuencias de trabajo son variables según la separación elegida: 6 400, 1 600 y 400 Hz (Gex, 1998).

### **Presentación e interpretación**

Los datos se presentan generalmente en forma de una carta de isovalores de conductividad o mostrados en perspectivas 3D. Es típico facilitar dos cartas de isovalores, una describiendo la conductividad del terreno y la otra representando la componente real o en-fase, que facilita la detección de objetos metálicos (Monier-Williams *et al.*, 1990).

#### **3.2.2. Método Slingram u “Horizontal Loop EM” (HLEM)**

Aunque hay cierta similitud entre esta técnica y la empleada para medir la conductividad del terreno, ya que ambas pueden utilizar dos bobinas horizontales, sin embargo, la diferencia entre ambos métodos se encuentra en que el método Slingram siempre empleará los valores de la componente real (en fase) e imaginaria (en cuadratura), expresados en porcentaje y no como lecturas de conductividad aparente.

Aunque el método HLEM surgió con objetivos mineros para la delineación de depósitos conductores localizados dentro de los 100 primeros metros, no obstante actualmente se emplea para aplicaciones medioambientales y geotécnicas en rangos de investigación superiores a los que pueden alcanzar los Geonics EM-31 y EM-34.

## Principio

El método Slingram forma parte de los dispositivos de emisor-receptor móviles. Una bobina emisora produce un campo electromagnético (EM) primario a una frecuencia del orden de 1 000 Hz. El equipo EM-Gun de ABEM, permite el empleo de dos frecuencias, 880 y 3 520 Hz. Sobre un terreno neutro, desde el punto de vista electromagnético, el campo EM primario que se detecta en la bobina receptora es cuidadosamente eliminado; así el campo EM secundario, de una amplitud relativamente pequeña, es detectado fácilmente en la bobina receptora (Gex, 1998). El HLEM o Slingram, está basado sobre el principio de que la relación entre las componentes imaginaria y real del campo electromagnético secundario mide la calidad del conductor generador del campo electromagnético secundario. Generalmente se emplean al menos dos frecuencias y cuando se utiliza para investigaciones medioambientales se pueden perseguir dos objetivos (Greenhouse *et al.*, 1997):

La delineación de las variaciones laterales en espesor o en conductividad de la capa de material depositada en superficie (en inglés “*overburden layer*”). Por ejemplo, la delineación de valles cubiertos de sedimentos.

La determinación del espesor y la conductividad de la capa de material en superficie.

Para el primer objetivo, se llevará a cabo una investigación en modo calicatas EM (electromagnéticas), empleando sólo una separación emisor-receptor; en el segundo caso la investigación se llevará en modo sondeo EM empleando al menos cuatro frecuencias diferentes y generalmente más de una separación emisor-receptor.

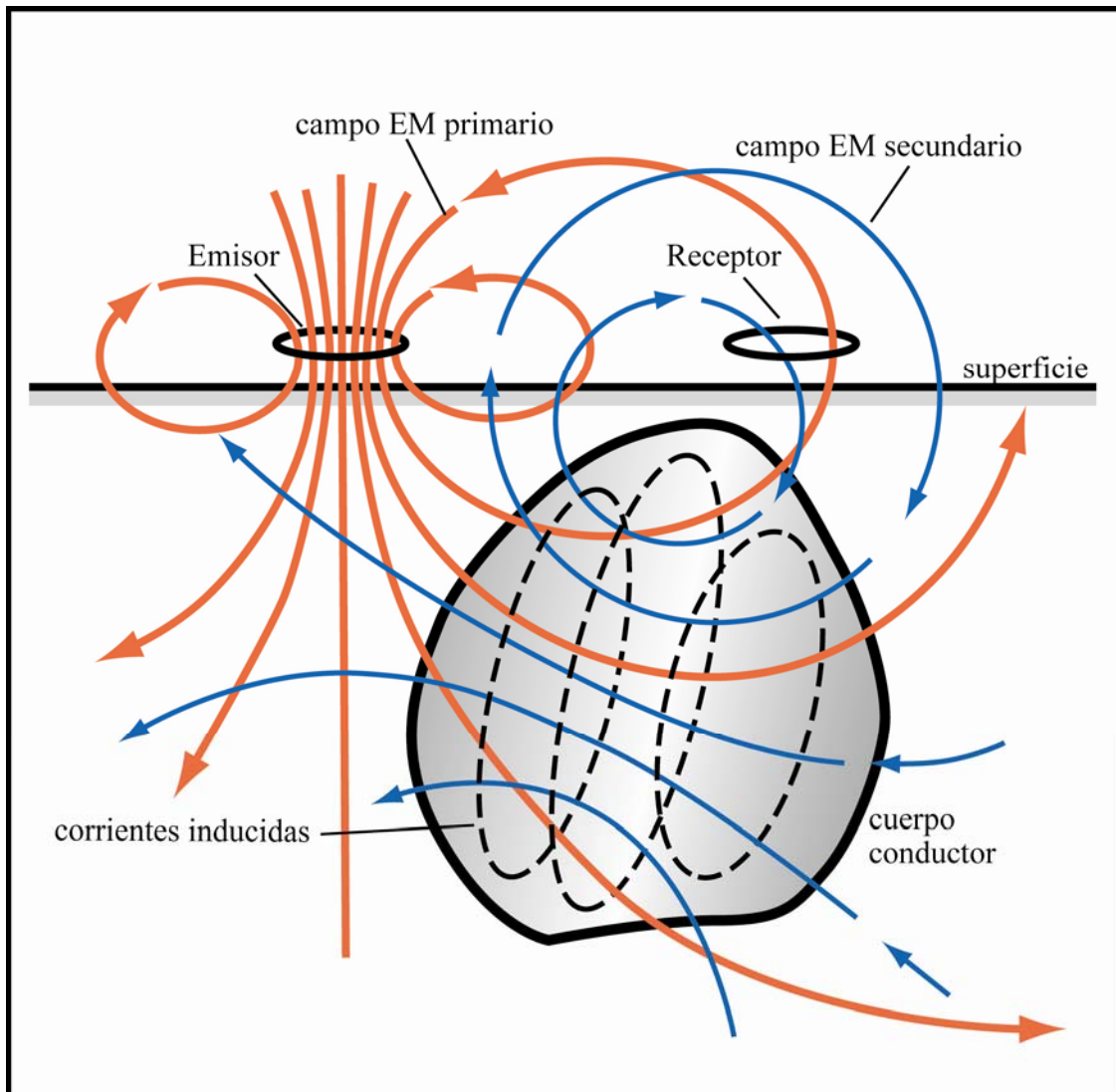


Figura 3. 17. Principio de funcionamiento de un equipo Slingram (modificado de Reynolds, 1997).

## Equipo

El Apex Parametrics MaxMin I es la unidad HLEM comúnmente empleada. El MaxMin I puede trabajar a 10 frecuencias a un rango de separación de bobinas, proporcionando tanto la posibilidad de perfilar a través de calicatas EM como de realizar sondeos EM verticales. El equipo es manejado por dos operadores.

## Penetración, resolución

La penetración y la resolución son determinadas por la separación establecida entre las bobinas, la frecuencia empleada, la conductancia del objetivo y el contraste



entre la roca encajante y el objetivo. Como una regla establecida, la profundidad de investigación es aproximadamente de un cuarto a un medio la separación entre bobinas, aunque en condiciones muy favorables puede llegar a ser la separación entre bobinas (Greenhouse *et al.*, 1997).

## **Presentación, interpretación**

Los datos de las calicatas HLEM se presentan como perfiles compilados (en inglés “*stacked*”) mostrando los resultados para los valores reales e imaginarios en gráficas diferentes (Palacky, 1991). Para los datos de sondeos EM verticales, los datos se representan en gráficas relacionando la respuesta real con la respuesta imaginaria (diagrama fasorial) (Palacky, 1991).

### **3.2.3. Métodos Eléctricos de Corriente Continua**

Los métodos geofísicos para la medida de la resistividad del terreno se diferencian fundamentalmente de los métodos electromagnéticos, anteriormente descritos, en que siempre van a requerir una inyección de corriente eléctrica en el terreno a través de electrodos, de ahí el nombre de métodos galvánicos. Los métodos EM inducen corrientes eléctricas en el terreno, por lo que generalmente no necesitan contacto físico a través de electrodos u otro medio. Hay algún método híbrido tal como el método *VLF* que emplea electrodos para medir campos eléctricos inducidos en el terreno a través de campos magnéticos primarios.

Los métodos eléctricos están entre las técnicas geofísicas más antiguas, y todavía siguen siendo tan importantes como lo eran hace 50 años (Zhdanov y Keller, 1994). Estos métodos pueden complementar a las medidas electromagnéticas al proporcionar información detallada de aquellas zonas altamente resistivas donde los campos electromagnéticos secundarios serán muy poco significativos. Debido al bajo coste y a la simplicidad de los equipos, estos equipos permanecen aún hoy siendo considerados para una gran parte de las investigaciones medioambientales.

## Principio

Cuando se inyecta una corriente en el terreno a través de una pareja de electrodos de corriente, el patrón seguido por el flujo de corriente eléctrica refleja la resistividad del subsuelo. Estos patrones pueden ser cartografiados en superficie a través de otro par de electrodos que medirán las variaciones en el potencial o voltaje. Estos voltajes son una medida de la energía requerida para que la corriente pase a través de los materiales y por ello también dependerá de su resistividad (Anexo A). La Figura 3.18 representa la distribución de las líneas de corriente eléctrica y las líneas de potencial en un subsuelo ideal (homogéneo e isótropo).

En la Figura 3.19 se muestra como sería la distribución de las líneas de corriente y de potencial ante la presencia de un objeto significativamente conductor (por ejemplo, el penacho contaminante de un lixiviado) en un entorno más resistivo, y de un objeto fuertemente resistivo (por ejemplo, la región afectada por el derrame de un hidrocarburo) en un entorno más conductor.

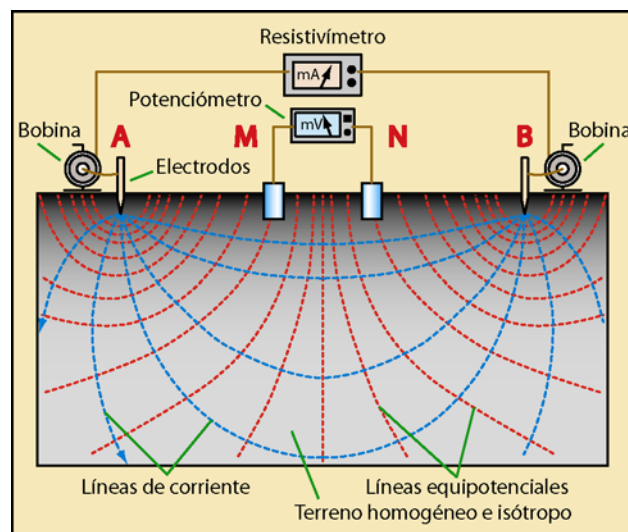


Figura 3. 18. Principio de funcionamiento de un equipo tetraelectródico de prospección eléctrica (elaboración propia).

Algunas investigaciones eléctricas llevan a cabo calicatas eléctricas y sondeos eléctricos verticales (SEV) de forma simultánea (Parasnis, 1970). En la realización de calicatas eléctricas, se estudia la distribución lateral de la resistividad manteniendo una profundidad de investigación relativamente constante a través del control del espaciamiento entre electrodos. El empleo de las calicatas eléctricas se recomienda

cuando exista una importante variación lateral de la resistividad como es el caso de paleocauces de arena en depósitos de arcillas o un penacho contaminante en un entorno arenoso. Los sondeos eléctricos verticales (SEV) estudian la variación de la resistividad conforme se incrementa la profundidad de investigación. Esta técnica es aplicable en regiones donde la geología está formada por estratificaciones horizontales, o muy ligeramente inclinadas, y además no hay cambios laterales de facies.

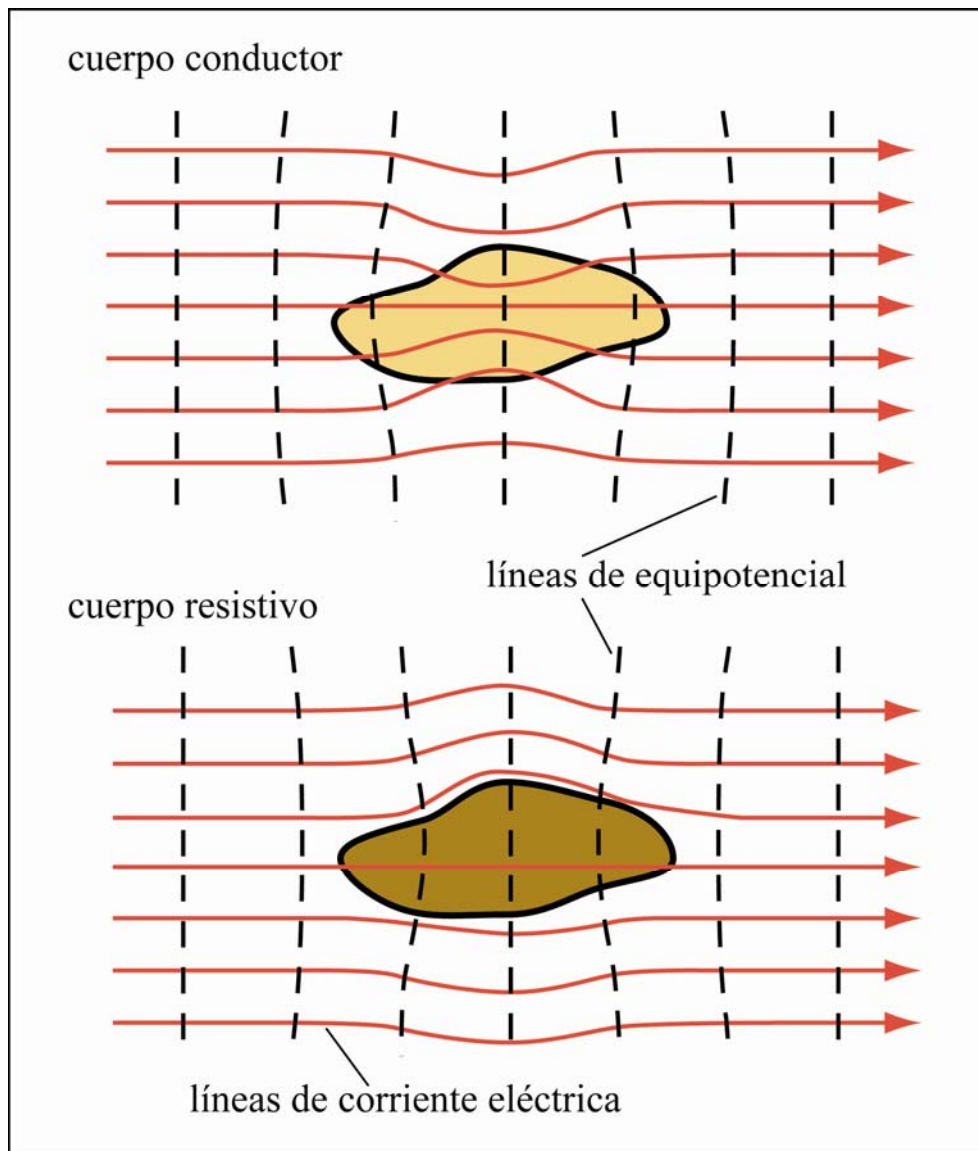


Figura 3. 19. Distribución de las líneas de corriente eléctrica y de equipotencial ante la presencia de un cuerpo conductor o un cuerpo resistivo (elaboración propia).

Tanto la ejecución de perfiles eléctricos (calicatas eléctricas) como de sondeos eléctricos verticales son llevados a cabo generalmente con dispositivos (en inglés "arrays") de cuatro electrodos. Las tres configuraciones mayoritariamente empleadas

para estudios de hidrogeología y de contaminación de suelos son la configuración Wenner, la configuración Schlumberger y la configuración dipolo-dipolo (Anexo A). Otras configuraciones también posibles son la configuración polo-polo y la configuración polo-dipolo. Cada una de estas configuraciones tiene sus ventajas e inconvenientes tanto en términos de resolución como de logística de campo, pero todas cumplen la misma idea: una media ponderada del valor de la resistividad del subsuelo hasta una profundidad máxima relacionada con la longitud del dispositivo. La resistividad, expresándola de una forma simple, tiene la siguiente expresión  $K \cdot (V/I)$ , donde  $V$  es el voltaje medido con los electrodos de potencial,  $I$  es la intensidad de corriente que se inyecta al terreno a través de los electrodos de corriente, y  $K$  es un factor geométrico que depende de la geometría del dispositivo. La resistividad así calculada es una resistividad aparente (Apartado 3.1.1).

Otro método menos común es el método eléctrico azimutal (en inglés, “*azimuthal resistivity survey*”) en el que el dispositivo es rotado alrededor de un punto central. Las variaciones de la resistividad aparente respecto al azimut son empleadas para cartografiar orientaciones de fracturas situadas debajo del punto de investigación (Taylor y Fleming, 1988). Los datos son adquiridos en ángulos de 10° ó 20° y representados en un diagrama de roseta.

## Equipo

Una de las grandes ventajas de los métodos de prospección eléctrica es que en su forma más simple exigen equipos muy poco costosos si se les compara con el precio de sus competidores: equipos para exploración sísmica o equipos para exploración electromagnética en el dominio temporal (en inglés, “*Time Domain EM*” o *TDEM*). El equipo que es necesario, el cual es idéntico al exigido para investigación por *polarización inducida* (IP), constará de una fuente de energía (batería o un generador eléctrico), un emisor/receptor, conductor y electrodos de corriente y potencial. La teoría asume que la corriente eléctrica empleada es continua (DC) pero en la práctica se emplea una señal a muy baja frecuencia (< 100 Hz). Iris Instruments, ABEM, Androtex, Bison, PASI, Campus, OYO, Soiltest, y Scintrex están entre los fabricantes de equipos de prospección eléctrica. Están surgiendo nuevas generaciones de equipos que registran

los datos digitalmente y pueden ser programados para transmitir y medir diferentes formas de onda y manejar dispositivos que emplean más de 100 electrodos (Dahlin *et al.*, 1994). Sorensen (1994) y sus colegas de la Universidad de Aarhus (Dinamarca) han desarrollado un sistema multielectrónico, denominado PACE, que es arrastrado por un vehículo móvil y mide resistividad aparente en continuo.

## **Penetración, resolución**

Teóricamente, no hay límite en cuanto a la penetración de los métodos eléctricos, puesto que ésta está relacionada a la separación de los electrodos de corriente. Los sondeos eléctricos verticales, a veces, han tenido por objetivo capas de material situadas a cientos e incluso miles de metros de profundidad. La resolución lateral está limitada por el espaciamiento de los electrodos de potencial y de los electrodos de corriente. Barker (1989) proporciona una interesante discusión sobre la resolución de los métodos eléctricos.

## **Presentación, interpretación**

Los datos de las calicatas eléctricas son representados, de forma convencional, como valores de resistividad aparente frente a distancias. Los datos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) son dibujados sobre papel bilogarítmico como resistividad aparente frente a espaciamiento del dispositivo. También hay una representación gráfica de los valores de resistividad aparente (ver Capítulo 4), denominada pseudosección que se emplea con el método eléctrico de la tomografía eléctrica, el cual es una especie de híbrido entre el método de calicata eléctrica y el método de sondeo eléctrico vertical. La pseudosección no debe ser considerada literalmente como una imagen del subsuelo (Greenhouse *et al.*, 1997). Ward (1990) realizó un estudio riguroso de los métodos eléctricos, incluyendo ejemplos de la presentación de los datos y de su interpretación.

En el pasado, la interpretación de los sondeos eléctricos verticales se llevaba a cabo comparando las curvas de los datos de campo con las curvas teóricas de los catálogos preparadas para cada tipo de dispositivo (Koefoed, 1979). Actualmente, aunque todavía se siga empleando el método tradicional en una etapa muy preliminar de la interpretación, la interpretación es llevada a cabo a través del empleo de programas

de ordenador, y, mediante modelos sintéticos del subsuelo y comparación con los datos medidos en campo, se resuelve el problema de forma directa o inversa (en inglés, “*forward and inverse modelling*”).

### **3.2.4. Método de la Resistividad Compleja (CR)**

Una investigación geofísica para la medida de la resistividad compleja (ver Apartado 3.1.3) es esencialmente una investigación a través de métodos eléctricos que emplean corriente alterna. Esta técnica mide el módulo y la fase (o también la componente real y la componente imaginaria) del cociente entre el voltaje y la corriente, empleando dispositivos electródicos convencionales en amplio rango de frecuencias. El término *resistividad compleja* (en inglés, “*complex resistivity*”) y el término *polarización inducida espectral* (en inglés, “*spectral IP*”) son equivalentes. El método de la polarización inducida, un método esencial en la exploración minera, es una particularidad de la resistividad compleja, pero trabajando a bajas frecuencias.

Los equipos empleados en la medida de la resistividad compleja son sofisticados y caros y no se emplean habitualmente para la investigación de zonas contaminadas. No obstante, en un futuro próximo, las técnicas de resistividad compleja podrán ver más aplicabilidad en este tipo de entornos, sobre todo, en la detección de contaminantes orgánicos (Olhoeft, 1986).

### **Principio**

La respuesta de la resistividad compleja es una gráfica del valor de la resistividad compleja aparente como función de la frecuencia, normalmente en el rango que va desde la corriente continua hasta los 10 kHz. Las variaciones en la respuesta se deberán a fenómenos producidos a escala de poro. Es una resistividad compleja debido al desfase que sufre el voltaje respecto a la corriente inyectada en el terreno. La amplitud del cociente  $V/I$  disminuirá con el aumento de la frecuencia debido a que la resistencia al flujo de cargas eléctricas disminuirá con ella.

La resistividad compleja es una información que se complementa con la resistividad normal. Por ejemplo, una roca sedimentaria, porosa y sin arcilla, dará una resistividad independiente de la frecuencia, pero esa misma roca, con arcilla o con partículas metálicas diseminadas, dará una resistividad compleja.

## **Equipo**

El equipo empleado para esta técnica difiere del empleado para prospección eléctrica por corriente continua en el grado de sofisticación que requiere el receptor puesto que necesita un conocimiento preciso de la forma de la señal enviada por el emisor y de la diferencia de fase entre el voltaje y la corriente. Estos equipos son fabricados actualmente por las casas Phoenix Geophysics, Androtex, Bison, Zonge Engineering y Scintrex, entre otras.

## **Penetración, resolución**

La profundidad de investigación, o penetración, de esta técnica y su nivel de resolución son similares a las que ofrecen los métodos eléctricos por corriente continua. Sin embargo, debido a efecto “*skin*” asociado a la corriente alterna, la profundidad de investigación será algo menor que para el caso de los métodos eléctricos convencionales.

## **Presentación, interpretación**

La presentación de los datos de resistividad compleja puede realizarse en una variedad de opciones tanto en forma de cartas de isovalores como en forma de secciones (Ward, 1990). Los datos de los perfiles de polarización inducida, adquiridos con dispositivo dipolo-dipolo, son presentados en forma de pseudosecciones (Figura 3.20). Los valores de la resistividad compleja espectral se presentan como gráficas logarítmicas de resistividad y fase frente a frecuencia (Vanhala *et al.*, 1992; Olhoeft, 1992).

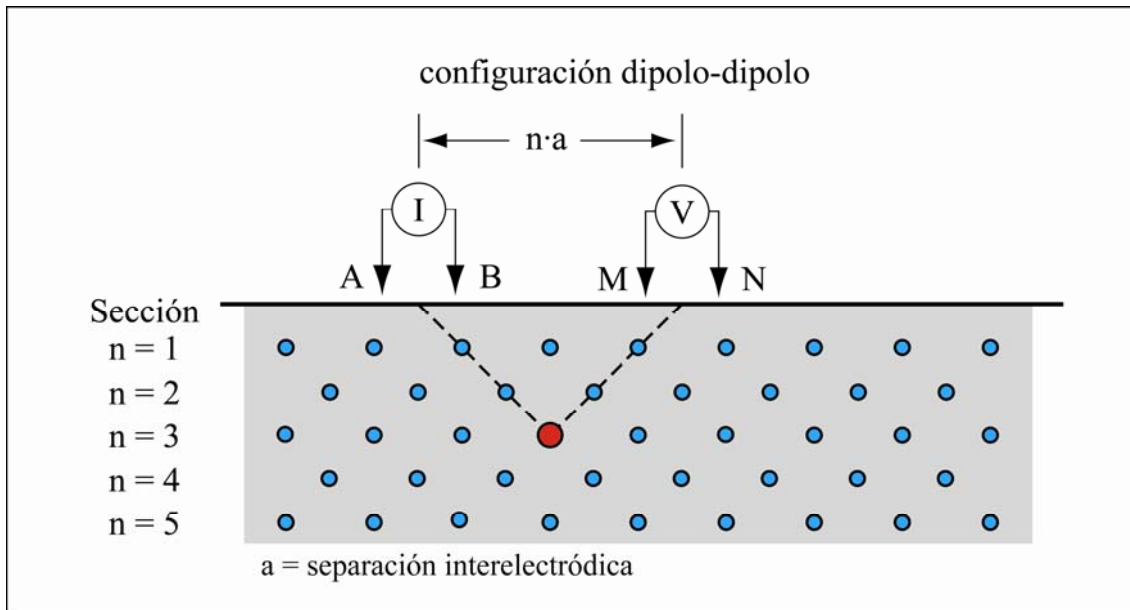


Figura 3. 20. Convención establecida para representar un valor sobre una pseudosección 2D con dispositivo dipolo-dipolo (elaboración propia).

Como en el caso de los métodos eléctricos convencionales, la interpretación se lleva a cabo a través del empleo de paquetes informáticos que permiten la elaboración de modelos sintéticos que dan respuesta a las medidas obtenidas en campo, sin embargo en este caso la interpretación es más complicada.

### **3.2.5. Método VLF-R (en inglés, “VLF Resistivity”)**

El método VLF-R, (del inglés, “*Very Low Frequency-Resistivity*”) no debe confundirse con el método VLF-EM (del inglés, “*Very Low Frequency-Electromagnetic*”). El primero es un método que exige el empleo de electrodos para conseguir un contacto eléctrico con el terreno y poder medir la resistividad del subsuelo directamente. El método VLF-EM no necesita ningún contacto físico y es empleado, generalmente, para localizar grandes zonas mineralizadas, zonas de cizalladura o valles colmatados de sedimentos (McNeill y Labson, 1991).



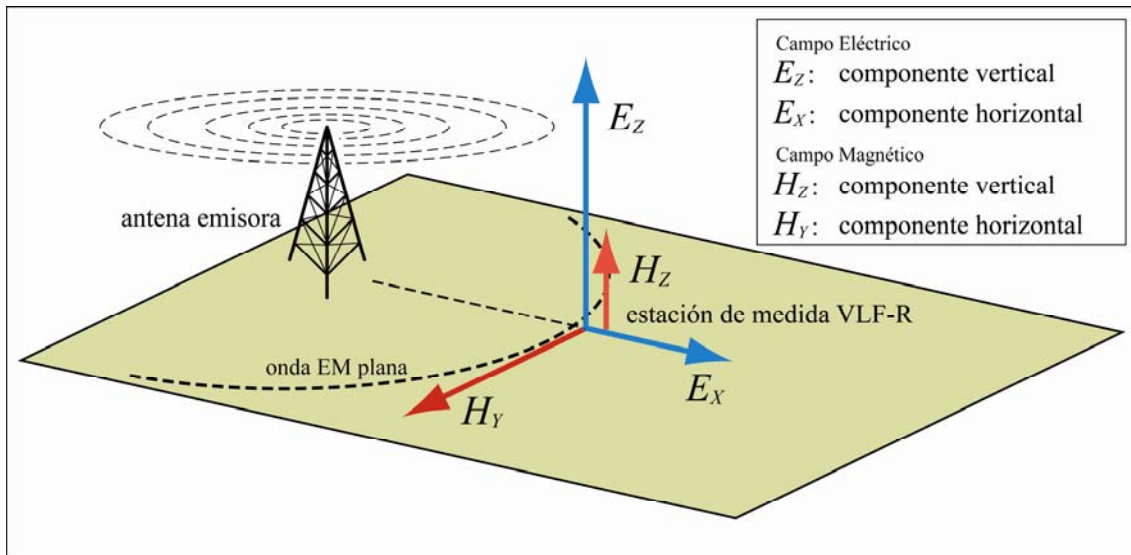


Figura 3. 21. Componentes del campo eléctrico y magnético para un emisor VLF (elaboración propia).

### Principio

El método VLF-R designa una banda de frecuencias empleada por las radiocomunicaciones de grandes distancias, concretamente las empleadas por los submarinos militares. Potentes antenas emisoras de uso militar, situadas en diferentes puntos de la superficie terrestre, provocan un campo magnético primario entre 15 y 30 kHz, que los investigadores geofísicos aprovechan para su beneficio desde principios de los años 60 (Gex, 1998). El campo magnético primario emitido por estas antenas puede propagarse hasta distancias de miles de kilómetros y puede representarse como una onda EM plana horizontal a la superficie del terreno (Figura 3.21).

La medición simultánea de la componente del campo magnético,  $H_y$ , y de la componente perpendicular del campo eléctrico,  $E_x$ , proporcionan un valor de la resistividad del subsuelo; también el desfase entre estas componentes ofrece información sobre la estructura conductora en profundidad. Por ejemplo, el desfase normalmente vale  $45^\circ$  sobre un terreno homogéneo e isótropo. Un desfase superior a  $45^\circ$  indica una disminución de la resistividad del subsuelo con la profundidad mientras que un desfase inferior a  $45^\circ$  indica lo contrario (Gex, 1998). Ben-Miloud (1986) ha empleado este método para delimitar el penacho contaminante producido en un vertedero cerca de North Bay (Ontario, Canadá).

## Equipo

El Geonics EM-16R es el equipo de amplio uso para el método VLF-R, desde hace veintitrés años. Actualmente han aparecido otros equipos que aprovechan las ventajas de los ordenadores como son los que ofrecen Scintrex y Gem Systems. Los nuevos equipos permiten registrar datos a partir de tres estaciones emisoras, simultáneamente.

## Penetración, resolución

Debido a las altas frecuencias manejadas y a la pequeña profundidad pelicular o “*skin depth*”, la profundidad de investigación alcanzada por esta técnica es mucho menor que la que puede ser obtenida con otros métodos. Como una regla empírica, la profundidad de investigación es aproximadamente  $2/3$  de la profundidad “*skin*” asociada (ver Apartado 3.1.1). Por ejemplo, con materiales en superficie de 100 ohm-m de resistividad, la profundidad de investigación es de 20 metros. Inversamente, la resolución es generalmente superior a la de otros métodos EM/resistividad debido a las altas frecuencias manejadas.

## Presentación, interpretación

Los datos VLF-R, se presentan como secciones 2D o como mapas de isovalores de resistividad y fase. También se pueden calcular modelos 1D multicapa (Ben-Miloud, 1986).

### **3.2.6. Método EM en el Dominio Temporal (en inglés, “TDEM”)**

El método EM en el dominio temporal o TDEM (del inglés, “*Time Domain EM*”), posee la ventaja de alcanzar grandes profundidades de investigación y de “ver” a través de capas de materiales conductores superficiales. En el ámbito medioambiental esta técnica es aplicada a problemas que se encuentran a una profundidad significativa como son la intrusión marina y la contaminación asociada a campos de extracción de hidrocarburos.

## Principio

Cuando se lleva a cabo una investigación con TDEM, se registra la respuesta del terreno ante la interrupción instantánea de un campo magnético primario. Puesto que la señal contiene varias frecuencias, esto es similar a las medidas realizadas con diferentes frecuencias, de forma independiente, con los conductivímetros, HLEM o VLF. El principio de funcionamiento de un TDEM es el siguiente. El emisor genera una serie de pulsos cíclicos (Figura 3.22). Cuando la corriente, en el bucle emisor, es bruscamente interrumpida entonces se produce una fuerza electromotriz inducida (voltaje inducido) en el terreno que generará corrientes inducidas en los objetos del subsuelo. El descenso temporal de la amplitud de estas corrientes producirá un campo magnético secundario, que es registrado en el receptor a través de ventanas temporales de registro o ventanas de muestreo. El ratio de caída del campo magnético secundario,  $\tau$ , es una medida de la conductividad del subsuelo y está relacionado inversamente a la profundidad “*skin*” de las medidas en el dominio frecuencial (Figura 3.23). A diferencia de los métodos electromagnéticos en el dominio frecuencial, este método mide el campo magnético secundario en ausencia del campo magnético primario.

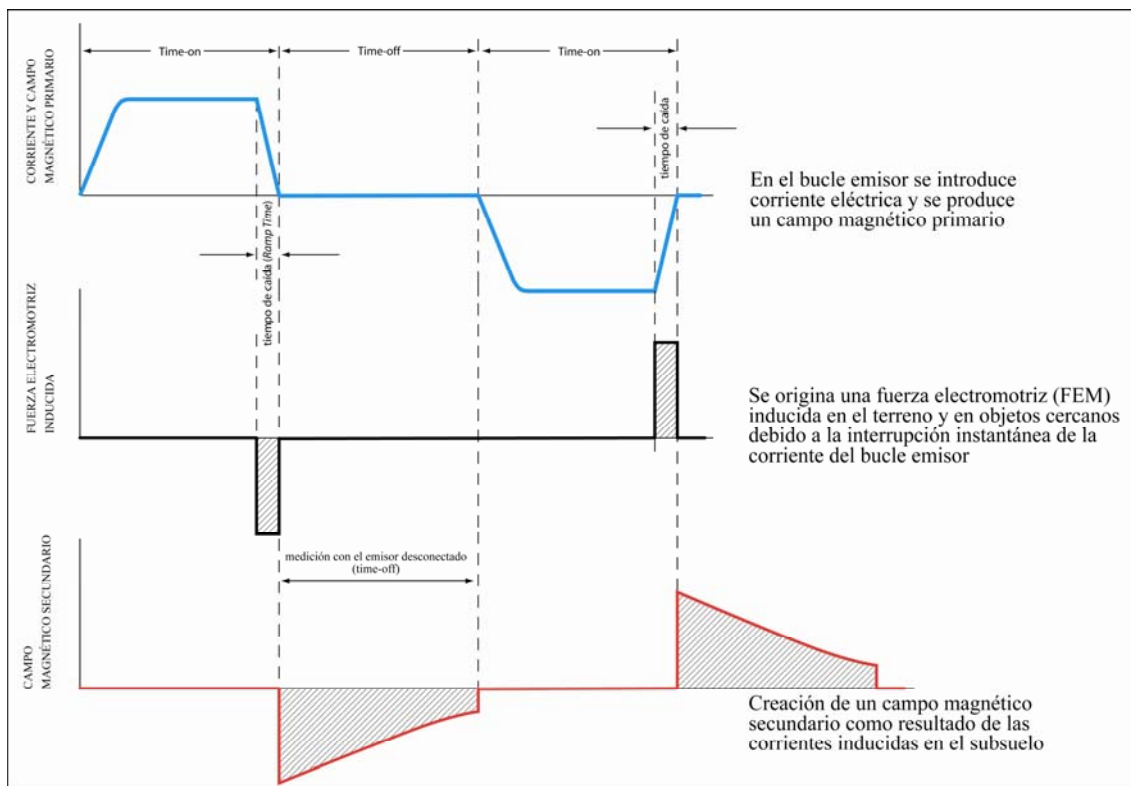


Figura 3. 22. Respuesta de la señal EM en el dominio temporal, TDEM (modificado de McNeill, 1990).

Los objetos conductores son resueltos e interpretados sobre la base del ratio de caída del campo magnético secundario (Figura 3.23). Este campo magnético es registrado en 10 o 20 canales, que son puntos discretos de medida donde se registra la curva de caída en intervalos discontinuos. Los primeros canales darán información de las estructuras más superficiales y los últimos canales la darán de las estructuras más profundas.

Este método puede ser empleado en modo de sondeo EM (Sondeo Electromagnético en el Dominio Temporal, SEDT) en el cual el modelo de estratificación del terreno, respecto de la conductividad existente debajo del bucle, es construido con ayuda de la información de todos los canales, o bien en modo de calicatas EM en el cual uno o más canales son desplazados sobre un área, permitiendo dibujar sus líneas de isovalores. El método de calicatas EM en el dominio temporal se emplea generalmente cuando el objeto no es continuo y subvertical. El método TDEM se tiene en cuenta cuando el objetivo es moderadamente conductivo o fuertemente conductivo y localizado a profundidades que exceden las decenas de metros.

### **Penetración, resolución**

La profundidad de investigación de una investigación TDEM puede ser de cientos de metros si la roca encajante y la capa de material depositado en superficie no son excesivamente conductoras. La resolución para los objetos conductores situados cerca de la superficie puede que no sea tan buena como la alcanzada para los métodos electromagnéticos en el dominio frecuencial, por ello para estudios de contaminación somera del subsuelo será preferible optar por otras técnicas alternativas. Comparado con los sondeos eléctricos verticales, los sondeos TDEM requieren menos tiempo en su realización y ofrecen mayor resolución lateral.

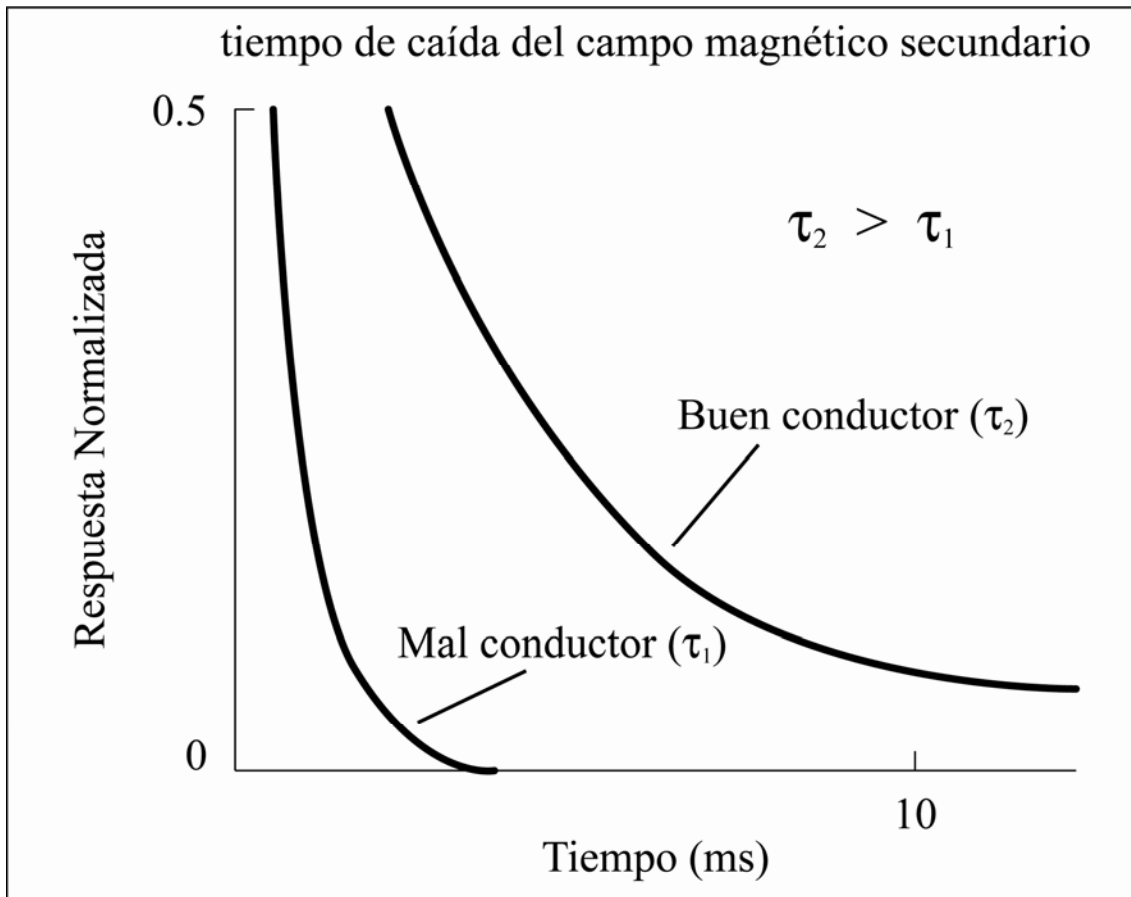


Figura 3. 23. Curva de caída para el campo magnético secundario inducido (modificado de McNeill, 1990).

## Equipo

Los equipos TDEM son fabricados por Zonge Engineering, Lamontagne Geophysics (UTEM 3), Sirotix y Crone Geophysics and Exploration (PEM y DEEPEM).

## Presentación, interpretación

Los datos pueden ser presentados bajo una amplia variedad de formas que van desde secciones de isovalores de resistividad aparente, pasando por mapas de valores de conductividad hasta datos de sondeos electromagnéticos donde se representa la conductividad frente a la profundidad (Reynolds, 1997; Fitterman y Stewart, 1986)

### **3.2.7. Método Magnético**

El principal objetivo de la investigación de zonas contaminadas con el empleo de magnetómetros es la localización de objetos magnéticos enterrados que pueden ser fuente de contaminación, por ejemplo barriles metálicos conteniendo residuos. No obstante, las investigaciones magnéticas también pueden proporcionar información útil sobre la geología del entorno. Por ejemplo, pueden dar una estimación del espesor de un aluvial no magnético o de los sedimentos que cubren un basamento rocoso magnético.

#### **Principio**

El método de prospección magnética se basa en la medición de las anomalías locales del campo magnético terrestre producidas por variaciones en la intensidad de magnetización de las rocas o de los objetos situados en el subsuelo o aflorando (Figura 3.24). La magnetización de las rocas se debe, por un lado a la inducción magnética provocada por el campo magnético terrestre y por otro lado a la magnetización remanente. El valor de la magnetización inducida va a depender, principalmente, de la susceptibilidad magnética del material (ver Apartado 3.1.4) y de la intensidad del campo magnético externo, sin embargo la intensidad remanente dependerá de la historia geológica de la roca (Parasnis, 1970).

En una investigación magnetométrica el principal objetivo es, normalmente, medir el campo magnético total existente sobre una zona, buscando valores anómalos altos y bajos que son indicadores de vertidos ferromagnéticos.

#### **Equipo**

Actualmente hay dos diseños básicos de sensores magnéticos de uso común, los basados en la medida del campo magnético total terrestre y los basados en la medida de la componente vectorial del campo magnético. El magnetómetro fluxgate es del tipo vectorial (Figura 3.25); es decir, es un equipo que mide la componente vectorial del campo magnético correspondiente a una determinada dirección, normalmente la componente vertical (Figura 3.26). Los magnetómetros de campo total existentes en el mercado son: el magnetómetro de protones y el magnetómetro de vapor de cesio (Figura 3.28). Ambos equipos miden la intensidad del campo magnético pero no dan su

dirección vectorial. También existen gradiómetros que miden el gradiente vertical del campo magnético.

El magnetómetro de protones o de precesión protónica (Figura 3.27), es un equipo que polariza una mezcla rica en protones (agua, queroseno, etc.), a continuación mide la frecuencia de relajación, pero sólo inmediatamente después de haber interrumpido el campo magnetizante; este proceso de medida tomará un segundo o dos. Esta frecuencia de relajación es proporcional a la intensidad del campo magnético externo.

El equipo fluxgate es más complicado de operar, ya que debe ser orientado en cada nueva medida pero al poder dar el valor de las componentes del campo magnético, es el que da una información más completa. Los magnetómetros de vapor de cesio son empleados básicamente en exploración y sobre todo en investigaciones aerotransportadas de alta sensibilidad.

Actualmente es práctica común, en las investigaciones terrestres y aéreas, registrar digitalmente las variaciones diurnas del campo magnético terrestre a través del empleo de una estación base. El uso de la estación base proporcionará datos de campo de gran calidad.

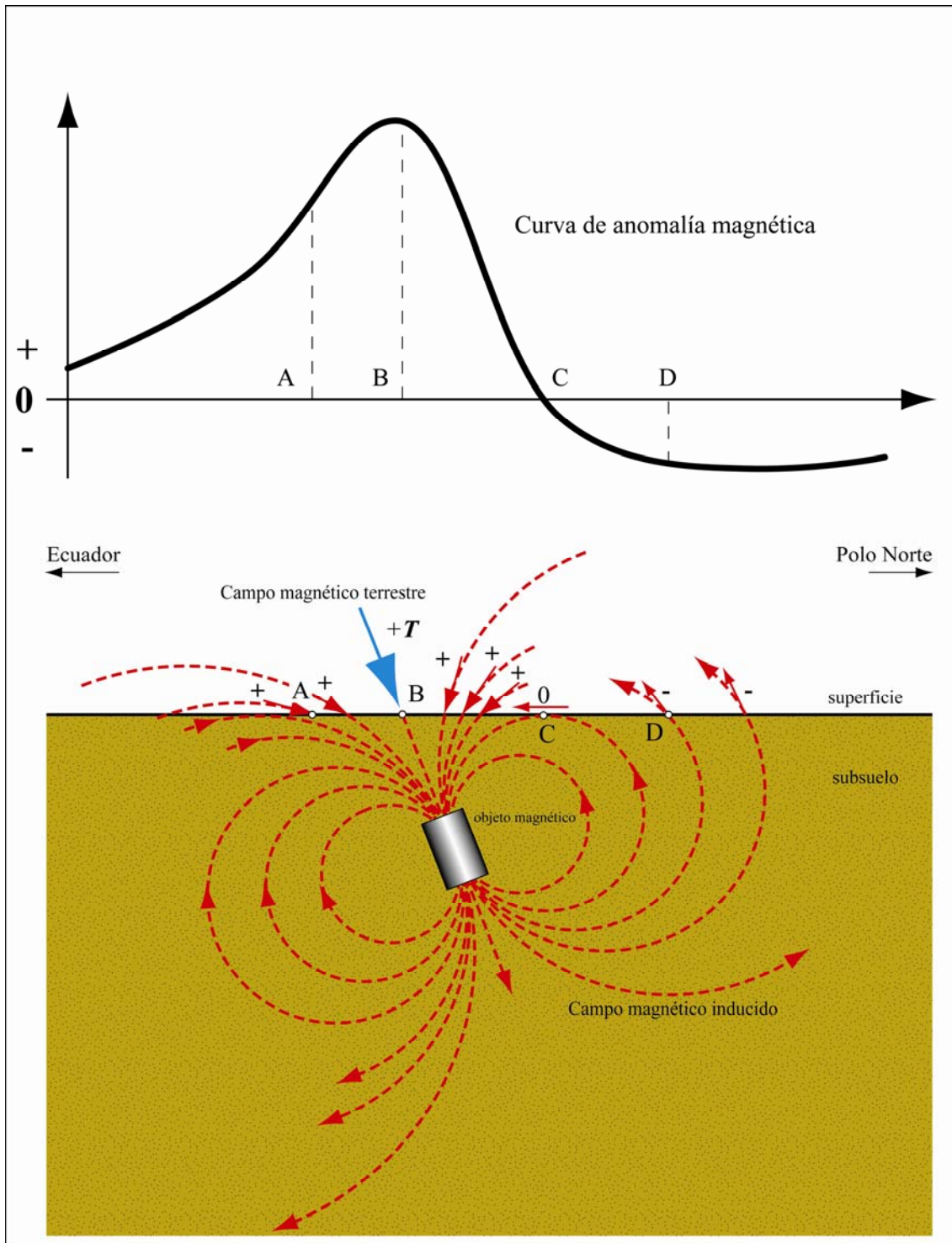


Figura 3. 24. Anomalía magnética de un objeto magnetizado por el campo magnético terrestre (modificado de Reynolds, 1997).



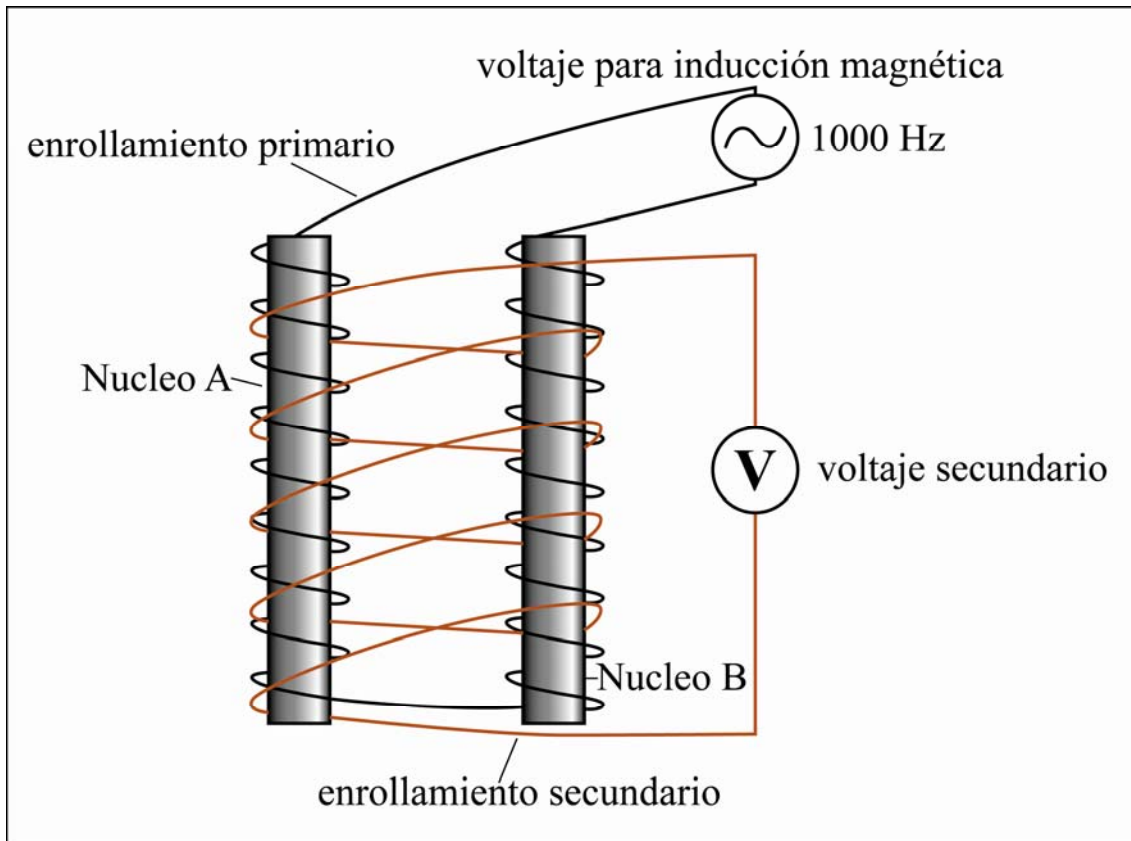


Figura 3. 25. Representación esquemática de los principales elementos de un magnetómetro fluxgate (modificado de Reynolds, 1997).

### Penetración, resolución

La anomalía magnética de un objeto dipolar (Figura 3.24), como la ofrecida por un barril enterrado, disminuye proporcionalmente a  $r^{-3}$  (siendo  $r$ , la distancia entre el objeto magnético y el sensor de medida). De esta forma el tamaño de una anomalía disminuirá rápidamente con la profundidad del objeto inducido magnéticamente y limitará la profundidad de las investigaciones para la búsqueda de un único barril con sustancias tóxicas, por ejemplo, hasta una profundidad máxima de 2 metros (Greenhouse *et al.*, 1997). Para un alineamiento de barriles, la caída de la anomalía será proporcional a  $r^{-2}$ , y para una agrupación de barriles, la caída de la anomalía será proporcional a  $r^{-1}$  (Breiner, 1973).

La resolución horizontal de un objetivo magnético está relacionada al ancho de su anomalía. Como regla empírica general, la zona a prospectar magnéticamente debe ser muestreada con un espaciamiento entre estaciones inferior a la mitad de la profundidad del objeto a investigar. Por ejemplo, para investigar la localización de

barriles enterrados a un metro, las lecturas deberían hacerse cada medio metro, como máximo.

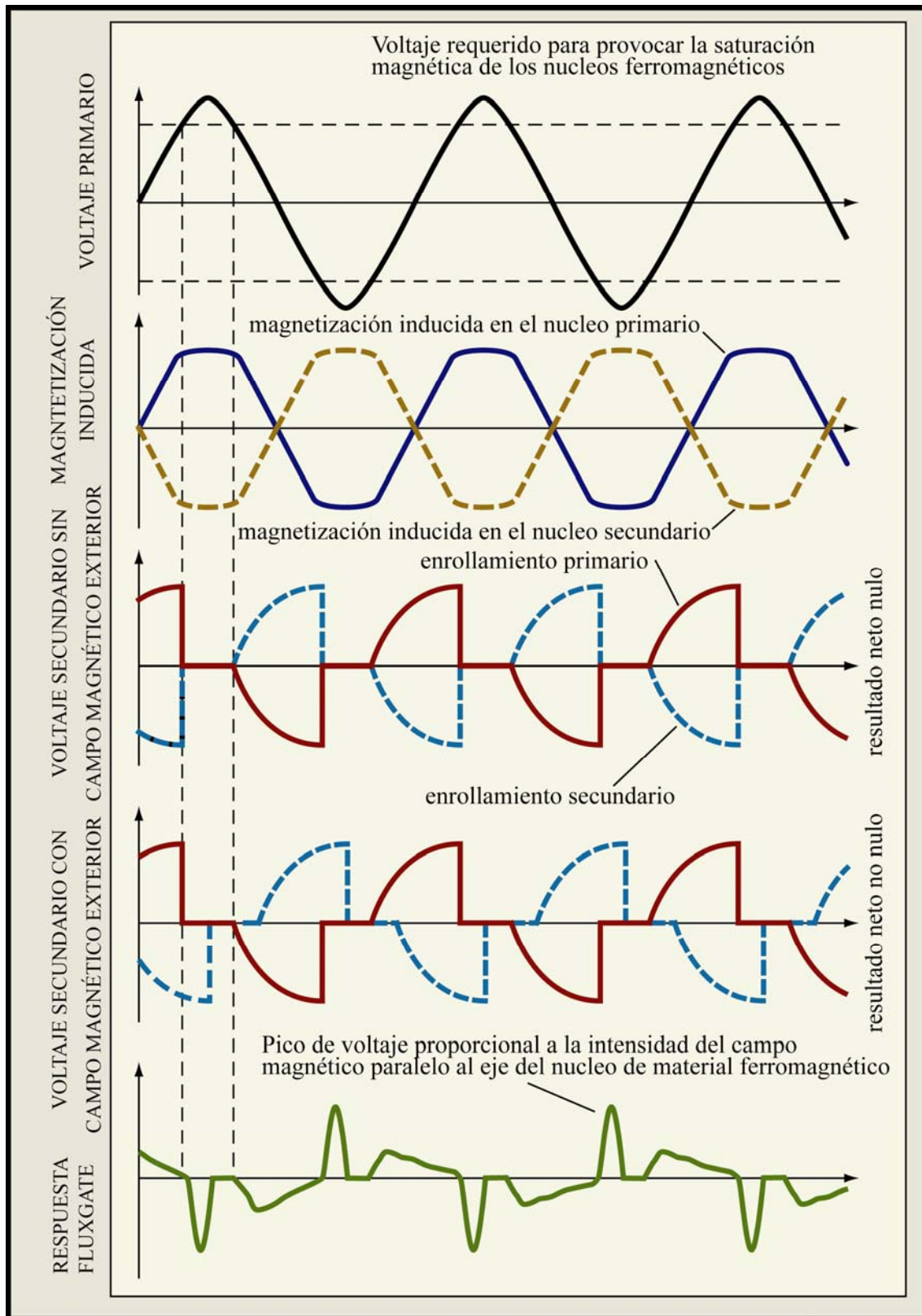


Figura 3. 26. Respuestas características en el circuito primario y secundario de un fluxgate (modificado de Reynolds, 1997).

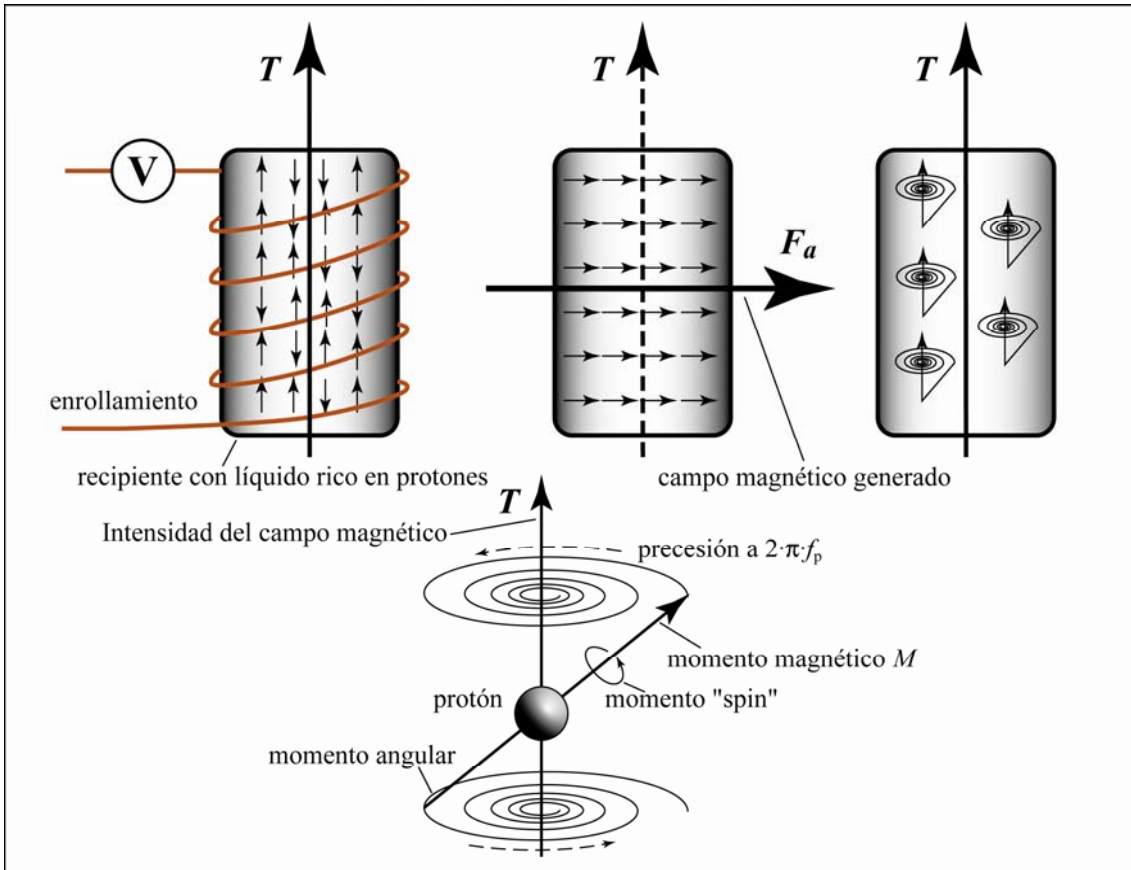


Figura 3. 27. Etapas seguidas por un magnetómetro de protones para realizar una medida (modificado de Reynolds, 1997).

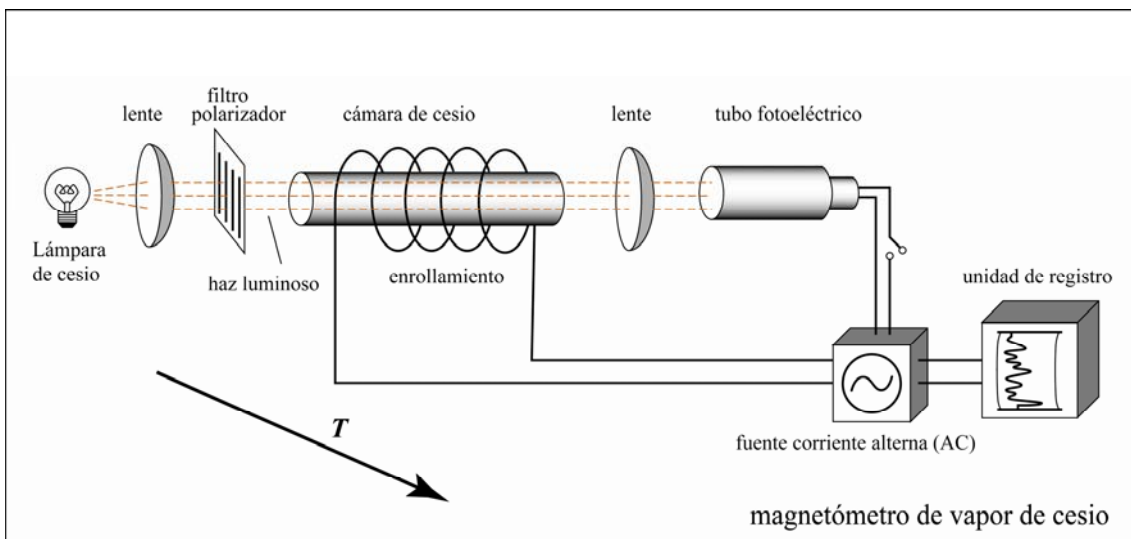


Figura 3. 28. Representación esquemática sobre los elementos principales de un magnetómetro de vapor de cesio (modificado de Robinson y Çoruh, 1988).

### Presentación, interpretación

Hinze (1990) hace una exhaustiva revisión del procesamiento, presentación e interpretación de los datos magnéticos, y también de los datos gravimétricos. Los datos

magnéticos son presentados habitualmente como mapas a color o en escalas de grises, pero también se pueden presentar en forma de perfiles.

Existe una amplia variedad de técnicas de filtrado para mejorar la calidad de los datos (Broome, 1991). Los perfiles individuales se comparan unos a otros para detectar artefactos antes de representar los datos en planta. La interpretación de las anomalías magnéticas, en su forma más simple, consiste en comparar la anomalía observada con la anomalía producida por formas geométricas simples (dipolos, láminas y cilindros) y conseguir el ajuste entre ambas a través de programas de ordenador.

Algunos de los paquetes informáticos existentes para llevar a cabo la interpretación de los datos magnéticos son MAGIX de Interprex, GM-SYS de Northwest Geophysical Associates, MAGMOD de Geosoft y MAGGRAV del Geological Survey of Canada.

### **3.2.8. Método Gravimétrico**

Las prospecciones gravimétricas miden la variación de la densidad existente en el subsuelo a través de la variación en la intensidad del campo gravitacional terrestre (expresado como aceleración en centímetros por segundo al cuadrado, o Gal). La principal aplicación de las investigaciones gravimétricas en zonas contaminadas es la delimitación de valles enterrados por material no consolidado o la localización de cavidades en formaciones cársticas, que pueden comprometer la integridad de la zona (Roberts *et al.*, 1989). Una exploración gravimétrica se puede llevar a cabo en zonas de ruido antrópico donde las investigaciones electromagnéticas, eléctricas e incluso sísmicas están impedidas por ello.

## **Principio**

Los cambios en los valores de la gravedad, después de ser corregidos por deriva, latitud, elevación y topografía, surgen debidos a los contrastes de densidad verticales y laterales existentes en el subsuelo (ver Apartado 3.1.5).

En la teoría, hay un número infinito de geometrías geológicas o secciones 2D del subsuelo que puede explicar una misma respuesta gravimétrica observada en superficie. Existe, por ello, una dificultad de no unicidad en la solución del problema planteado. En la práctica, la información geológica o geofísica disponible reducirá el rango de los numerosos modelos geológicos posibles.

## **Equipo**

Hasta no hace mucho el gravímetro LaCoste Romberg (Figura 3.29) ha sido la unidad gravimétrica estándar para la mayor parte de las investigaciones gravimétricas de alta calidad. Son equipos con elementos mecánicos que no incorporan electrónica. Scintrex ha introducido recientemente un gravímetro controlado por microprocesador, el modelo CG-3, que se caracteriza por lectura y adquisición de datos de forma automática, lo que resulta en un ahorro importante del tiempo requerido para las medidas.

Para la precisión de los datos de elevación, que será un requisito para obtener datos gravimétricos de alta calidad, se requerirá el empleo de niveles electrónicos. El error resultante de una inadecuada elevación puede valer 0.2 mGals/m para una densidad de la roca de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . Los sistemas *Geographic Positioning Systems* (GPS) se están aproximando rápidamente a la exactitud exigida por las correcciones gravimétricas de latitud y elevación (Greenhouse *et al.*, 1997).

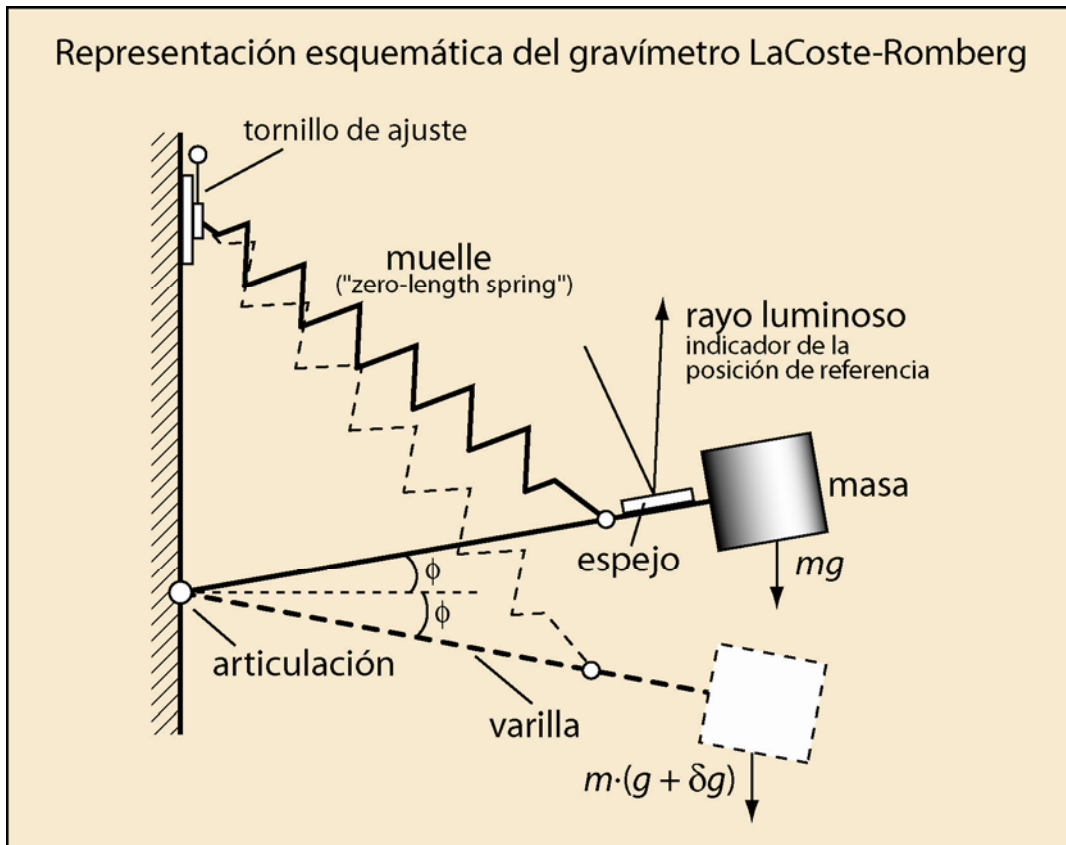


Figura 3. 29. Gravímetro estático LaCoste-Romberg (modificado de Reynolds, 1997).

### Penetración, resolución

Las anomalías gravimétricas de los objetos, cuya dimensión es pequeña comparada a la profundidad a la que se encuentran, disminuye proporcionalmente a  $r^{-2}$ , siendo  $r$  la distancia del objeto al gravímetro. Las anomalías gravimétricas son generalmente más anchas que sus anomalías magnéticas asociadas y mientras su penetración es mayor su resolución lateral es peor. En Hinze (1990) se da las fórmulas ampliamente aceptadas para la penetración y resolución de formas geométricas simples.

### Presentación, interpretación

Los datos gravimétricos son presentados como anomalías de Bouguer, después de una serie de correcciones que engloba el factor de calibración instrumental, los efectos de las mareas, la elevación de la estación por encima del *datum* (generalmente una estación base), cambios en latitud, densidad del material entre la estación y el *datum* y efectos del terreno en zonas de topografía significativa (Reynolds, 1997). La interpretación cualitativa de los datos gravimétricos, que estudia las discontinuidades o las tendencias presentes en los datos, es operada a través de mapas de contorno e

imágenes de color o de escala de grises. Los datos en forma de perfiles proporcionan la base para la interpretación cuantitativa, o modelado, de los datos gravimétricos. Hay numerosos paquetes informáticos para realizar la interpretación de los datos como son TERRAIN y GRAVRED de Geosoft, GMSYS de Northwest Geophysical Associates y MAGGRAV del Geological Survey of Canada.

### **3.2.9. Georadar o Ground Penetrating Radar (GPR)**

El GPR ha ido ganando aceptación dentro de la comunidad científica como técnica no invasiva para obtener imágenes de alta resolución (los radargramas) del subsuelo, y todo ello debido a su rapidez, fiabilidad, fácil transporte y bajo coste.

El GPR, en cierto sentido, es similar a los métodos de reflexión, pero mientras los métodos sísmicos de reflexión dan una información limitada para los primeros 10 metros y con peores resoluciones, el GPR por el contrario es adecuado para delinear objetivos someros y proporciona una resolución mucho más adecuada (Gilbert *et al.*, 1999).

#### **Principio**

El GPR es un método de exploración electromagnética, pero el principio que subyace en él es bastante diferente del que le es común a los otros métodos electromagnéticos. Emplea una antena que emite pulsos de energía electromagnética a elevada frecuencia (entre 10 MHz y 1 000 MHz) en el subsuelo y una antena que registrar las variaciones sufridas por la señal reflejada. El GPR opera a una frecuencia donde las corrientes eléctricas de desplazamiento, las cuales dependen de la permitividad dieléctrica, dominan, como oposición a los métodos electromagnéticos convencionales donde dominan las corrientes eléctricas por conducción.

Las aplicaciones del GPR incluyen el estudio de la estratigrafía del suelo, la determinación de la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico o basamento, localización de objetos metálicos o no metálicos enterrados e identificar cientos de contaminantes dentro de las aguas subterráneas. La antena, normalmente de 25

cm hasta 1 m de longitud y en contacto directo con el suelo, es desplazada a lo largo de la superficie para crear un perfil continuo que dará la mayor resolución de todos los métodos geofísicos. La onda electromagnética que se propaga a través del subsuelo perderá energía y se atenuará al mover cargas eléctricas (por conductividad y también por polarización) se reflejará ante contrastes de conductividad eléctrica y permitividad eléctrica.

## **Equipo**

Annan y Davis (1989) y Annan y Cosway (1991) describen el equipo empleado para el sistema GPR y el procedimiento a seguir para diseñar una campaña de medidas. Un sistema GPR consiste de cuatro módulos principales: una unidad emisora, una unidad receptora, una unidad de control y una unidad de visualización. El emisor genera un pulso corto de energía EM el cual es radiado a través de la antena al subsuelo como ondas de radio. La energía es reflejada hacia la superficie y es captada por la antena receptora y el receptor y su señal es amplificada, formateada, guardada y visualizada (Figura 3.30). La frecuencia de operación es elegida para obtener la mejor relación entre la profundidad de investigación y la resolución. La mayor parte de los equipos pueden operar a diferentes frecuencias pero las frecuencias dentro del rango 100 MHz-500 MHz son las más empleadas en estudios medioambientales y geotécnicos (Greenhouse *et al.*, 1997). Sensors and Software, OYO y GSSI son los principales proveedores de sistemas GPR.



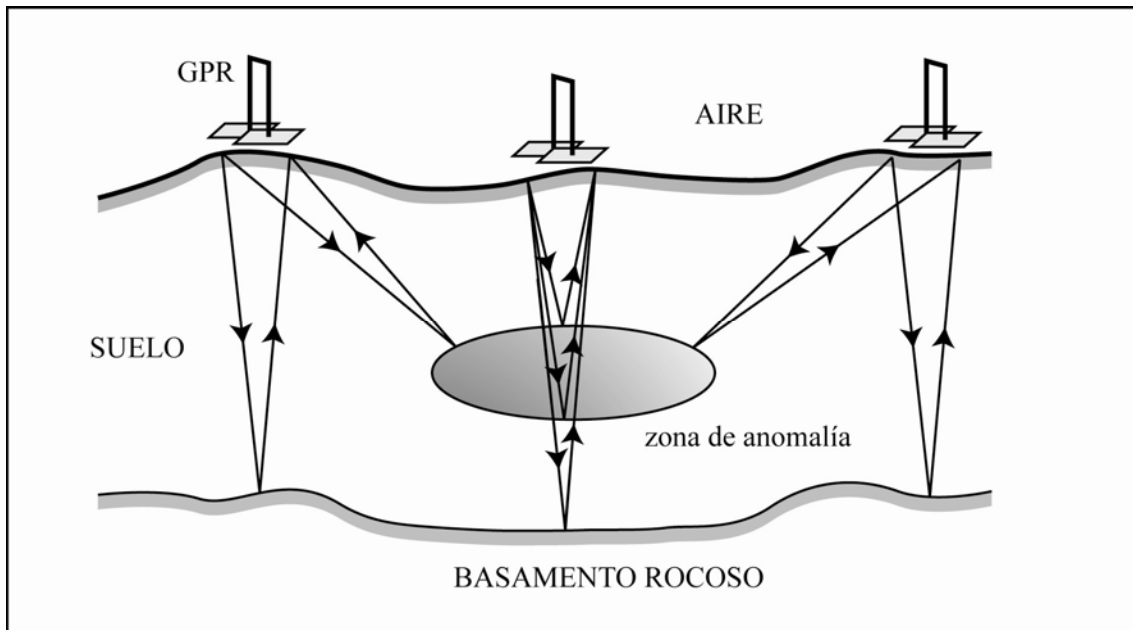


Figura 3. 30. Representación esquemática del tipo de reflexiones emitidas por un objeto anómalo y el basamento rocoso (modificado de Davis y Annan, 1989).

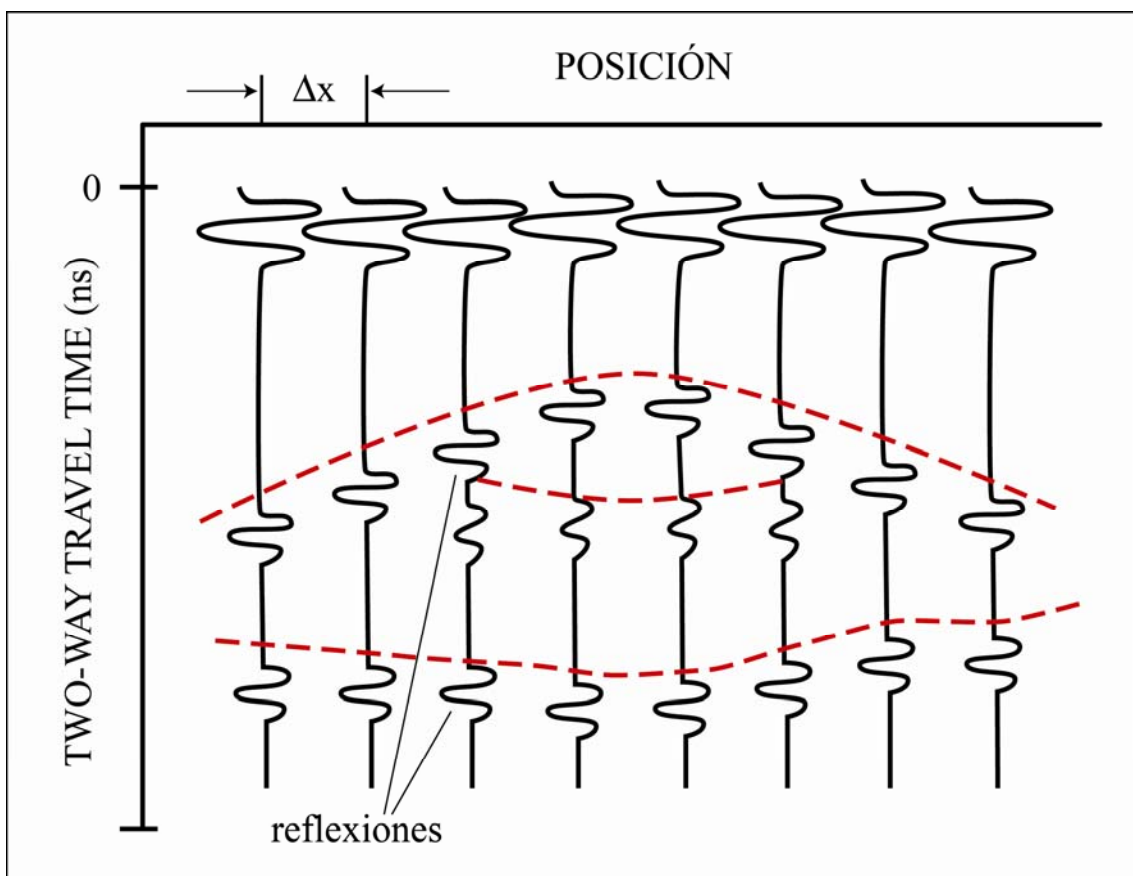


Figura 3. 31. Radargrama simplificado que se obtendría en el escenario de la Figura 3.30 (modificado de Davis y Annan, 1989).

## Penetración, resolución

La penetración del pulso radar en el subsuelo está condicionada significativamente por la atenuación, la cual a su vez está gobernada principalmente por la conductividad del terreno. En condiciones de baja conductividad, la penetración de la señal puede ser de más de 20 metros. Asumiendo condiciones ideales la profundidad de penetración será función de la frecuencia emitida. Ondas radar de baja frecuencia (de 12 a 200 MHz) alcanzan mayores profundidades de investigación que aquellas otras de alta frecuencia (de 200 a 2 500 MHz). Una arcilla conductora puede restringir la profundidad de investigación a menos de 1 metro. La resolución vertical de los métodos de reflexión está condicionada por la longitud de onda o anchura del pulso,  $\lambda$ . La longitud de onda esta relacionada a la frecuencia,  $f$ , y a la velocidad,  $V$ , a través de la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (3.22)$$

Más específicamente, el espesor mínimo de un estrato que puede ser identificado por el sistema GPR debe ser igual  $\lambda/4$ . La resolución horizontal es determinada por el patrón de radiación llevado a cabo por la antena. Este patrón es complejo pero en términos generales puede ser comparado a un cono vertical de 30° de pendiente, con su vértice en el emisor. Por lo tanto, la información que se reflejará en el receptor será una media de la superficie reflectora iluminada.

## Presentación, interpretación

Los datos son normalmente presentados en un formato similar al de los perfiles sísmicos de reflexión, donde se muestra el tiempo de trayecto hasta los reflectores y la posición, pero aquí en lugar de ser conocidos como sismogramas se les conoce como radargramas (Figura 3.31). Los datos también pueden ser adquiridos y presentados en CMP (del inglés, “*Common Mid Point*”) y en modo WARR (del inglés, “*Wide Angle Reflection and Refraction*”). Los objetivos de estos dos procedimientos tienden a obtener una estimación de la velocidad frente a la profundidad. Si la profundidad de un horizonte reflectante es conocida independientemente en varios emplazamientos o si la

velocidad es conocida como una función de la profundidad, entonces la sección radar o radargrama proporciona una sección de profundidad para el reflector.

El grado de procesado post-adquisición dependerá de los objetivos de la investigación. En algunos proyectos, un simple mapa de anomalías detectadas puede ser todo lo requerido como en el caso de investigaciones tipo “búsqueda y localización”. Las infraestructuras son identificadas, generalmente, por reflectores de tipo parabólico mientras que la rotura en reflectores continuos y superficiales, suele ser indicativo de una antigua excavación o de actividades de relleno.

La identificación estratigráfica a través de GPR, requerirá un mayor grado de interpretación y de procesado digital. Los proveedores de equipos GPR distribuyen paquetes informáticos para sus sistemas GPR. Algunos programas de procesado para datos sísmicos de reflexión también procesarán datos GPR. Etapas típicas de procesado para los datos sísmicos tales como corrección estática, filtrado, deconvolución y migración están introduciéndose para ser aplicadas en los datos GPR, para convertirse en rutinarias.

### **3.2.10. Método Sísmico de Refracción**

Los métodos sísmicos, aplicados en estudio sobre el terreno (no sobre medio acuático), son técnicas geofísicas que miden el tiempo empleado por una energía acústica que viaja a través del subsuelo, desde una fuente de energía situada en superficie, hasta una serie de receptores situados sobre el terreno, denominados geófonos. La energía es refractada o reflejada en interfases donde existe un cambio en la impedancia acústica (ver Apartado 3.1.6). Puesto que los cambios en la impedancia acústica están generalmente asociados a cambios de litología, los métodos sísmicos pueden ser empleados para obtener información estructural del subsuelo (Gilbert *et al.*, 1999).

Hay dos métodos básicos de exploración sísmica, el método de refracción y el método de reflexión. Lankston (1990) hace una revisión detallada del método de refracción y Steeples y Miller (1990) hacen dicha revisión sobre el método de reflexión.

En el método de reflexión los rayos incidentes son directamente reflejados hacia la superficie. En el método de refracción los rayos incidentes son refractados críticamente a lo largo de la interfase y a continuación reenviados a superficie.

## Principio

Los métodos sísmicos de refracción miden el tiempo de las primeras llegadas de energía sísmica a una serie de geófonos. La energía sísmica es producida a partir de fuentes sísmicas localizadas sobre la superficie o próximas a la superficie del terreno (golpeo de una maza sobre una placa metálica, caída de pesas, disparos en taladro y detonación de cargas explosivas). La energía será refractada en un refractor cuando exista un cambio en la velocidad sísmica (de  $V_1$  a  $V_2$ ) según la ley de Snell:

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \quad (3.23)$$

Siendo  $i_1$  el ángulo de la onda incidente con la normal a la interfase en el primer medio de velocidad  $V_1$ , y  $i_2$  el ángulo de la onda refractada que se propaga a velocidad  $V_2$  en el segundo medio. Cuando  $V_2$  es mayor que  $V_1$  existe un ángulo de incidencia crítico  $i_c$  donde el ángulo de refracción  $i_2$  es igual a  $90^\circ$  y por lo tanto la expresión (3.23) se transforma en la siguiente:

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.24)$$

Para ángulos de incidencia superiores a  $i_c$  la energía se reflejará totalmente en la capa superior. La energía críticamente refractada a velocidad de  $V_2$ , a lo largo de la interfase, es continuamente radiada hacia la superficie donde puede ser captada por los geófonos.

La mayor parte de los estudios medioambientales y geotécnicos estudian exclusivamente las ondas P, ya que todavía hay mucho por aprender de las ondas S y, además, éstas son más complicadas de generar y de registrar que las ondas P. Las ondas superficiales se emplean para ensayos del terreno en ingeniería civil.

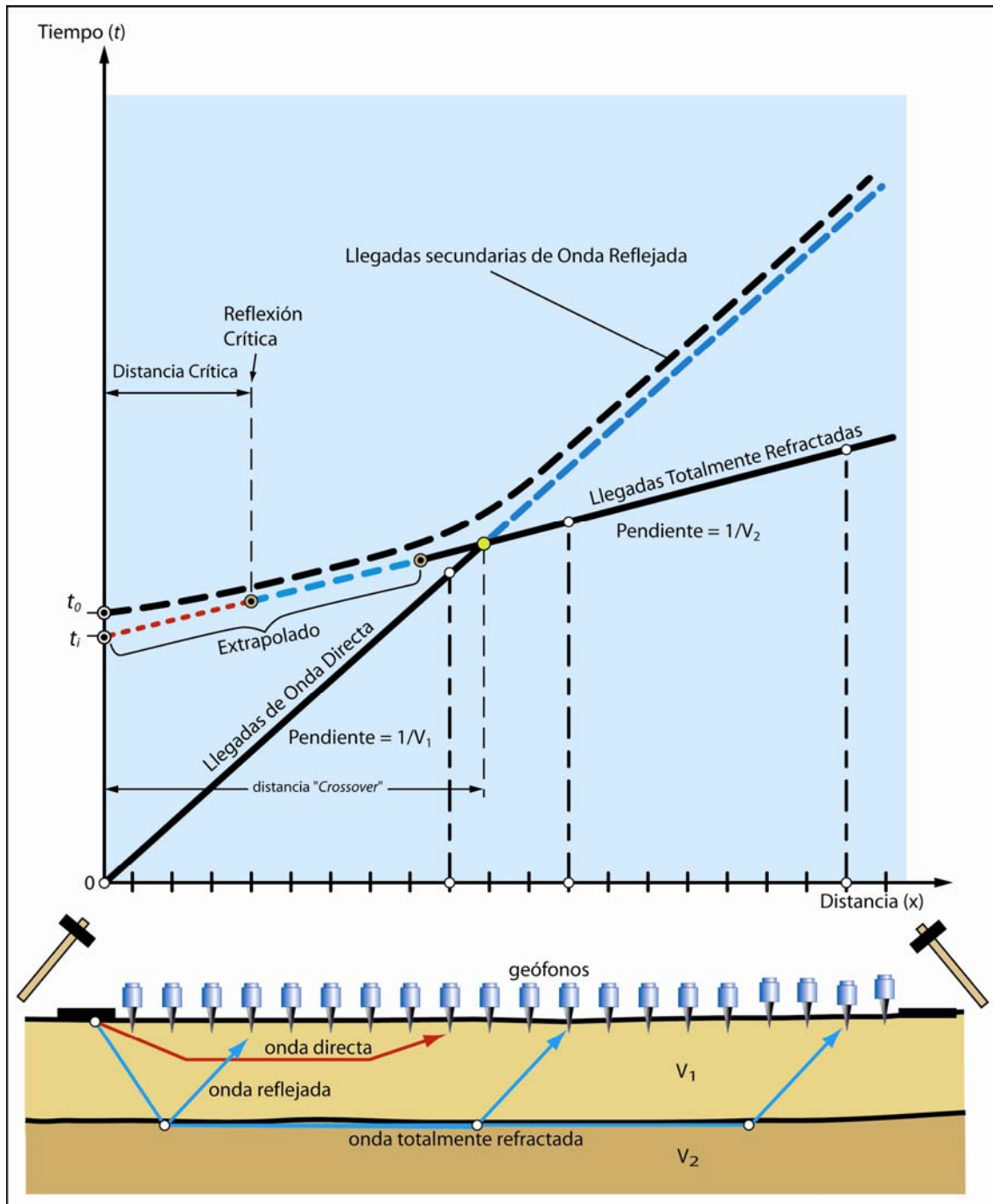


Figura 3. 32. Principales ondas sísmicas generadas por una fuente sísmica y su representación gráfica, denominada dromocrona (elaboración propia).

A través de los tiempos de llegada de la onda directa y de las ondas totalmente refractadas a los geófonos se construye una gráfica denominada dromocrona (Figura 3.32) que permitirá determinar las velocidades de propagación de las ondas en cada una de las capas y las profundidades de las capas. Cuando las capas sean ligeramente inclinadas habrá que realizar disparos en ambos extremos del perfil sísmico para obtener

las velocidades reales a partir de las velocidades aparentes y, si es necesario, se podrá completar la dromocrona con algún disparo central o exterior.

Tradicionalmente el método sísmico de refracción se ha empleado para determinar la topografía del basamento. Es un método más simple de llevar a cabo y más fácil de procesar y de interpretar que el método sísmico de reflexión.

El método sísmico de refracción tiene una limitación importante y es que para la mayor parte de los objetivos planteados, el método exige que la velocidad sísmica aumente con la profundidad. Para la mayoría de las aplicaciones esto no es un problema pero hay algunos escenarios geológicos, como por ejemplo la existencia de capas intermedias formadas por alternancias de gravas, arenas y arcillas, donde sí puede presentarse una dificultad.

## **Equipo**

Una simple investigación, con el objetivo de determinar la profundidad del basamento localizado bajo un metro o dos de sedimentos no consolidados, podría ser realizada con un mínimo equipo compuesto por un sismógrafo, un martillo y un único geófono. Aunque la productividad de la investigación no sería la óptima y la calidad de los datos no sería la mejor, el objetivo sería alcanzable.

Actualmente son posibles sofisticados sistemas digitales multicanal. Sistemas que ofrecen un número de canales que van desde 6, 12, 24 hasta 48 son ofrecidos por fabricantes como Bison Instruments, EG&G Geometrics, PASI, Scintrex y ABEM. Gracias al procesamiento avanzado de los datos multicanal está permitiendo la aplicación del método de refracción en ambientes que anteriormente estaban restringidos al método de sísmica de reflexión. Las investigaciones que se desarrollan con el empleo de sistemas multicanal y mayores espaciamientos entre geófonos, normalmente emplearán explosivos como fuente de energía sísmica.

## **Penetración, resolución**

Tanto la profundidad de investigación como la resolución de la sísmica de refracción, serán inferiores a la alcanzada por el método de sísmica de reflexión en idénticas condiciones. Por lo general la penetración con un martillo estará limitada a los 10 primeros metros, con una escopeta de cartuchos estará limitada a 20-30 metros. Se pueden alcanzar mayores profundidades de investigación con caída de pesos o generadores de onda elástica. La resolución lateral y la penetración están condicionadas por el espaciamiento entre geófonos; la resolución vertical de un estrato requiere que tenga un espesor que es una fracción de la profundidad hasta su techo.

## **Presentación, interpretación**

Los datos de refracción pueden ser representados de varias formas, dependiendo del grado alcanzado de procesamiento y de interpretación y del detalle de la investigación. La interpretación estará basada en el análisis de las primeras llegadas (en inglés, “*first breaks*”), de las ondas P. Los tiempos de llegada son ajustados por una serie de líneas rectas cuyas pendientes son las velocidades de las capas refractantes. El método “*intercept time*” y el método “*cross-over*” pueden ser usado para deducir la geometría de las capas, su profundidad y buzamiento. Hay disponibles paquetes informáticos de varios proveedores que emplean una variedad de algoritmos para el procesamiento de los datos sísmicos de refracción. Estos incluyen los métodos “*Time Intercept*” o TIM, “*Delay Time*”, “*Ray Tracing*” y “*Generalized Reciprocal Method*” o GRM. Habitualmente se utiliza el método TIM para obtener, en una etapa previa, información aproximada de velocidades y profundidades de una forma rápida, sin embargo el método GRM se emplea para un análisis final de los datos de refracción, puesto que permite el cálculo de la profundidad debajo de cada geófono.

Los datos sísmicos de refracción son presentados como secciones 2D, en las cuales se reflejan los tipos de capas presentes en función de las velocidades de propagación de las ondas P y las profundidades de los refractores. También se pueden representar mapas de contornos para visualizar, por ejemplo, la topografía de un basamento.

### **3.2.11. Método Sísmico de Reflexión**

El método sísmico de reflexión ha sido, con mucho, la técnica de exploración de hidrocarburos en los últimos 70 años. Sin embargo, la sísmica de reflexión es también el método más caro de los métodos geofísicos empleados en superficie y, por lo tanto, ha sido recientemente cuando ha comenzado a emplearse en aplicaciones geotécnicas, hidrogeológicas y medioambientales.

Principalmente, ha sido la aparición de nuevos sismógrafos, más baratos y adecuados para sísmica de reflexión somera, lo que ha permitido incrementar su empleo en estudios geotécnicos, hidrogeológicos y medioambientales. El empleo de esta técnica será adecuada cuando en superficie se tengan materiales de granulometría fina y en condiciones de saturación donde la técnica del georadar (ver Apartado 3.2.8) es desfavorable.

#### **Principio**

Como en el caso de la sísmica de refracción, en el método de sísmica de reflexión, básicamente consiste en medir el tiempo que toma una onda sísmica en viajar desde la fuente, atravesar el subsuelo, ser reflejada en un reflector y volver a la superficie donde será detectada por los geófonos. A este tiempo se le conoce por sus siglas en inglés TWTT (“*two-way travel time*”)

Las dos técnicas de sísmica de reflexión somera, conocidas por la comunidad geofísica internacional con los nombres de “*optimum offset*” y “*common-depth-point*” o CDP, son las que se emplean habitualmente. En Pullan y Hunter (1990) y en Steeples y Miller (1990) se puede encontrar una descripción detallada sobre estas dos técnicas de sísmica de reflexión y el concepto de *ventana óptima*, (en inglés, “*optimum window*”). La ventana óptima (Figura 3.33) es aquel rango de separación entre la fuente sísmica y el geófono, conocido como *offset*, que nos va a permitir observar las reflexiones de uno o varios reflectores con las mínimas interferencias de otros eventos sísmicos que causan “ruido” en el sismograma. En el método del “*optimum offset*” se aprovecha las ventajas de la ventana óptima, en el que la fuente sísmica y un geófono con el *offset* adecuado se irán desplazando lateralmente con cada nuevo disparo para obtener un sismograma de la



sección sísmica donde cada traza representa las posición intermedia entre la fuente de disparo y el geófono, puesto que se puede considerar a la trayectoria de la reflexión casi vertical, los registros prácticamente no necesitarán un elevado procesamiento ni corrección DMO (Reynolds, 1997). Esta técnica fue desarrollada para obtener una mayor resolución del material superficial y la topografía del basamento sobre el cual se asienta dicho material superficial, pero este método ha ido cayendo en desuso debido a la bajada de costes del método CDP y a la dificultad en el proceso de interpretación cuantitativa en la mayor parte de las veces (U.S.A.C.E., 1979).

En el método CDP (Figura 3.34), las fuentes sísmicas y los geófonos se colocan de forma que el sismograma obtenido representa las reflexiones que provienen del mismo punto del reflector o reflectores. Después de las correcciones estáticas, debido a diferencias entre las distancias fuente-geófono, y correcciones dinámicas por velocidad, los datos son sumados (en inglés, “*stacked*”) para mejorar la calidad de las reflexiones y así producir una traza que, convenientemente ubicada, se unirá al resto de trazas sumadas para producir un sismograma final listo para su interpretación geológica. El procesamiento CDP es considerablemente más complejo que el necesitado para el método de la ventana óptima.

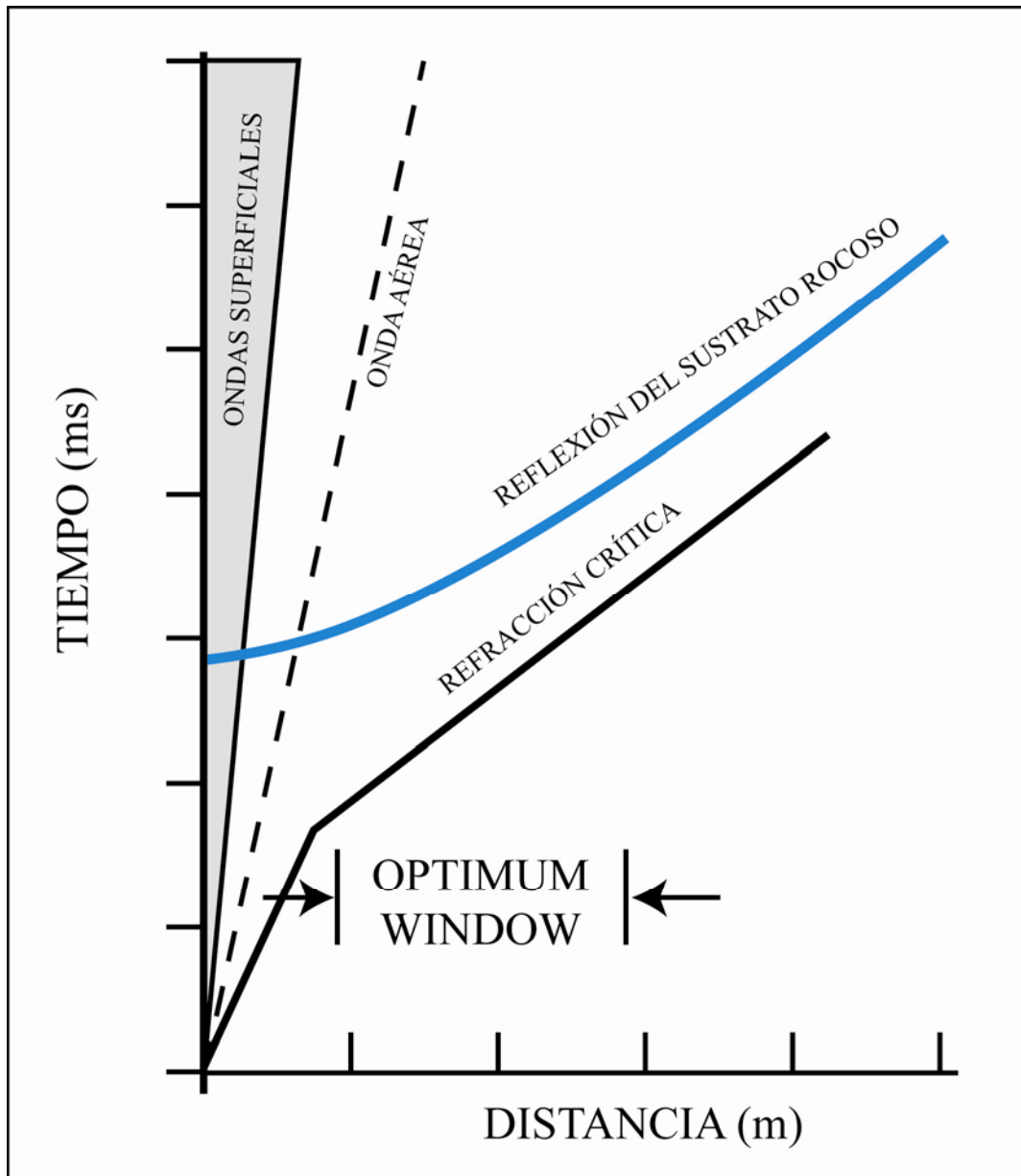


Figura 3. 33. Dromocrona indicando la ventana óptima (“*optimum window*”) que se debe elegir (modificado de Pullan y Hunter, 1990).

## Equipo

La mayoría de los equipos de sismica de reflexión para estudios medioambientales emplean un sismógrafo digital de 24 canales. Los sismógrafos modernos tienen un sofisticado programa interno que sirve para realizar un seguimiento del ruido, para controlar el intervalo de muestreo, el almacenamiento y el filtrado de los datos sísmicos. ABEM, Bison Instruments, OYO, EG&G Geometrics, PASI y Scintrex son, entre otros, quienes fabrican sismógrafos adecuados para trabajos de reflexión.

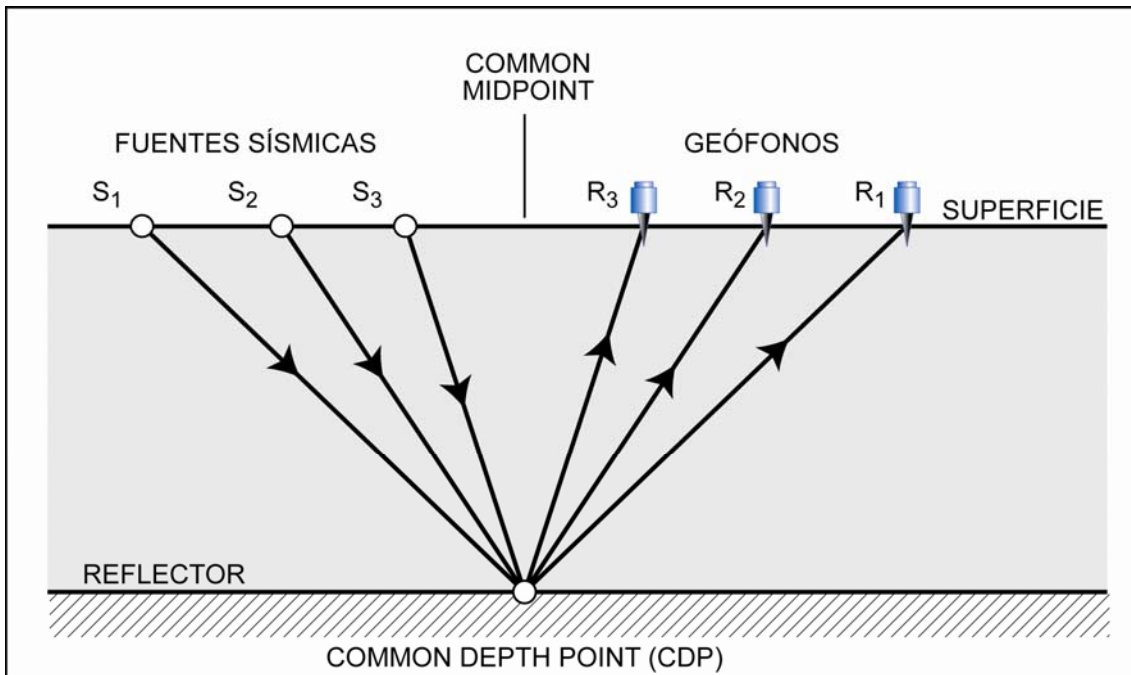


Figura 3. 34. Principio del método sísmico CDP (elaboración propia).

### Penetración, resolución

Los métodos sísmicos de reflexión han sido aplicados para el estudio de cuencas sedimentarias de miles de metros de espesor. La penetración del método está relacionada a la fuente de energía seleccionada. Para una investigación somera, como las investigaciones medioambientales, el golpeo de una placa con una maza puede ser suficiente, aunque también se emplean fusiles con disparo de cartuchos en barreno (en inglés, “*in-hole shotgun*”). Reynolds (1997) describe todos los tipos de fuentes sísmicas disponibles. La resolución vertical está en el orden del metro.

### Presentación, interpretación

Los datos procesados se presentan como secciones sísmicas de reflexión donde en ordenadas se facilita tanto la profundidad, en metros, como el tiempo TWTT, en milisegundos. Existen paquetes informáticos para el procesamiento, los cuales surgieron especialmente dirigidos a la exploración de hidrocarburos y actualmente están disponibles para estudios medioambientales a un coste razonable. Ejemplos de este tipo de paquetes informáticos son EAVESDROPPER de Kansas Geological Survey, QSEIS de OYO y SEISTRIX de Interprex.

### **3.2.12. Potencial Espontáneo**

El método del potencial espontáneo o SP (del inglés, “*Self Potential*”) es una técnica geofísica muy antigua y muy simple que sin embargo tiene aplicación para la caracterización de depósitos o vertederos de residuos. Básicamente el SP es un detector de voltajes generados por objetos, de una forma no inducida, o bien generados por una fuente externa. Los objetos metálicos o los minerales masivos enterrados son las fuentes primarias de estos voltajes, que son normalmente el resultado de diferentes partes del cuerpo siendo sometidas a diversos grados de oxidación o reducción. Los voltajes en la superficie pueden alcanzar varios cientos de milivoltios y se pueden medir fácilmente por un voltímetro compuesto por dos electrodos impolarizables, uno de los cuales estará fijo y el otro se irá desplazando dentro de una malla de estaciones. El resultado será un mapa de curvas de equipotencial el cual reflejará puntos de bajo voltaje situados sobre el cuerpo metálico. El tamaño de la anomalía SP que producirá un objeto metálico es difícil de predecir y requiere que el interpretador sea experimentado; por ello los métodos magnéticos y los conductivímetros son los métodos preferidos para la detección de cuerpos metálicos.

### **3.2.13. “Streaming Potential”**

Es conocido que el movimiento del agua a través de un poro produce un pequeño voltaje denominado potencial de corriente (en inglés, “*streaming potential*”). El desaguado es el efecto inverso, y probablemente más conocido, donde el agua es forzada a salir de un dique a través del empleo de un voltaje eléctrico aplicado transversalmente a dicha estructura. La técnica “*Streaming Potential*” se emplea para detectar fugas en balsas. El equipo que se utiliza es idéntico al empleado para el potencial espontáneo: un voltímetro, electrodos impolarizables y abundante cable. El método puede ser la principal opción para detectar fugas en balsas de almacenamiento a través del revestimiento (Figura 3.35) (Martínez-Pagán *et al.*, 2004). La logística requerida por esta técnica es simple y el equipo es relativamente barato. La interpretación puede ser problemática exigiendo un geofísico experimentado. En Butler y Llopis (1990) se da una descripción detallada de esta técnica.

### **3.2.14. Método Electrostático**

En los últimos años la comunidad geofísica ha visto la aparición de esta técnica que tiene similitudes con las técnicas geoelectricas convencionales en cuanto a su aplicación y a la presentación de los resultados (Benderitter *et al.*, 1994; Timofeev *et al.*, 1994). La idea básica de este método es la de emplear polos electrostáticos colocados en el aire, por encima del suelo, para medir las propiedades eléctricas de éste último (Tabbagh, 2005). Un polo de carga  $Q$  colocado en un medio homogéneo de permitividad  $\varepsilon$  (ver Apartado 3.1.2) crea, a una distancia  $r$ , un potencial  $V$  que viene dado por:

$$V = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r} \quad (3.25)$$

Si el polo se encuentra colocado próximo al suelo, el potencial se va a ver modificado. El método de las imágenes (ver Anexo B) permite calcular esta modificación teniendo en cuenta la permitividad dieléctrica compleja del suelo que dependerá a su vez de su conductividad y de su permitividad. Para un suelo suficientemente conductor y a una frecuencia suficientemente baja se tiene finalmente que:

$$V = \frac{Qi\omega}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r}, \quad (3.26)$$

Sea  $V$ :

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3.27)$$

Si se considera la corriente  $I = Qi\omega$  alimentando al polo electrostático. Se encuentra que la expresión (3.27) es la misma que para la prospección eléctrica luego el método electrostático es una generalización del método eléctrico.

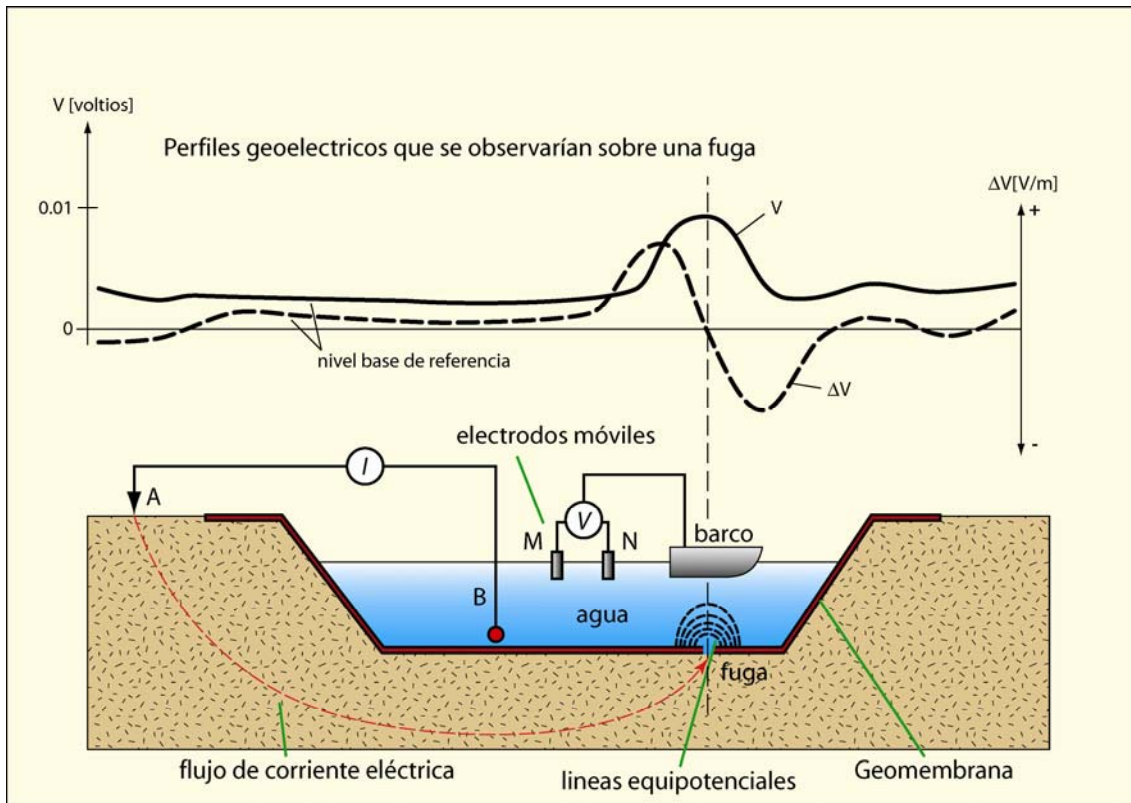


Figura 3. 35. Detección de fugas en un embalse con agua a través de la técnica “streaming potential” (según Martínez-Pagán *et al.*, 2004).

Este método tiene los mismos tipos de aplicación, calicatas, sondeos, pseudosecciones, etc., que el método eléctrico y los mismos métodos de interpretación y se emplea cualquiera que sea el estado del suelo. Tiene una limitación técnica: la frecuencia empleada no puede ser nula, pues sería imposible mantener cargas eléctricas sobre los polos de inyección y ella determina, con la superficie del polo, su impedancia. El empleo de este método está limitado por los efectos inductivos que aparecen en cuanto el número de inducción, que es igual a  $\sigma \cdot \mu \cdot \omega \cdot L^2$ , es superior a  $0.1 \cdot L$ , siendo  $L$  la dimensión característica del cuatripolo: separación entre los polos de inyección y los polos de medida. Este método presenta ventajas sobre los métodos electromagnéticos ya que responde mejor ante terrenos de alta resistividad. Para los suelos conductores, este método no permite explorar más allá de la primera decena de metros, pero esto representa una cualidad importante en problemas planteados en la ingeniería civil. Sin embargo, no está siendo empleado mucho para geofísica medioambiental pero conforme la experiencia y la tecnología sobre la que se basa, vayan aumentando, esto puede cambiar.

### 3.2.15. Método de Resonancia Magnética Nuclear o Protónica

El método de resonancia magnética protónica, en sus siglas en inglés NMR (del inglés, “*Nuclear Magnetic Resonance*”), también conocido como MRS (del inglés, “*Magnetic Resonance Sounding*”) cuando se aplica en forma de sondeo, fue inicialmente ideado por R.H. Varian (Varian, 1962) que transformó el magnetómetro de protones en una herramienta para la prospección de agua subterránea (Goldman, *et al.*, 1994). Sin embargo, fue posteriormente en Rusia donde esta idea se desarrolló más y se puso en práctica a través del Institute of Chemical Kinetics and Combustion of the Russian Academy of Sciences (ICKC), donde apareció la primera versión del equipo para la medida de las señales de resonancia magnética a partir de aguas subterráneas denominándose “*Hydroscope*”; (Legchenko *et al.*, 1997). El método NMR es una técnica geofísica relativamente reciente que ha demostrado su utilidad para la investigación de propiedades hidrológicas de los acuíferos (porosidad y conductividad hidráulica), puesto que está basada sobre su sensibilidad directa frente al hidrógeno libre del agua (Roy y Lubczynski, 2003; Plata y Rubio, 2006; Rubio y Plata, 2006) y, por tanto, a las aguas subterráneas.

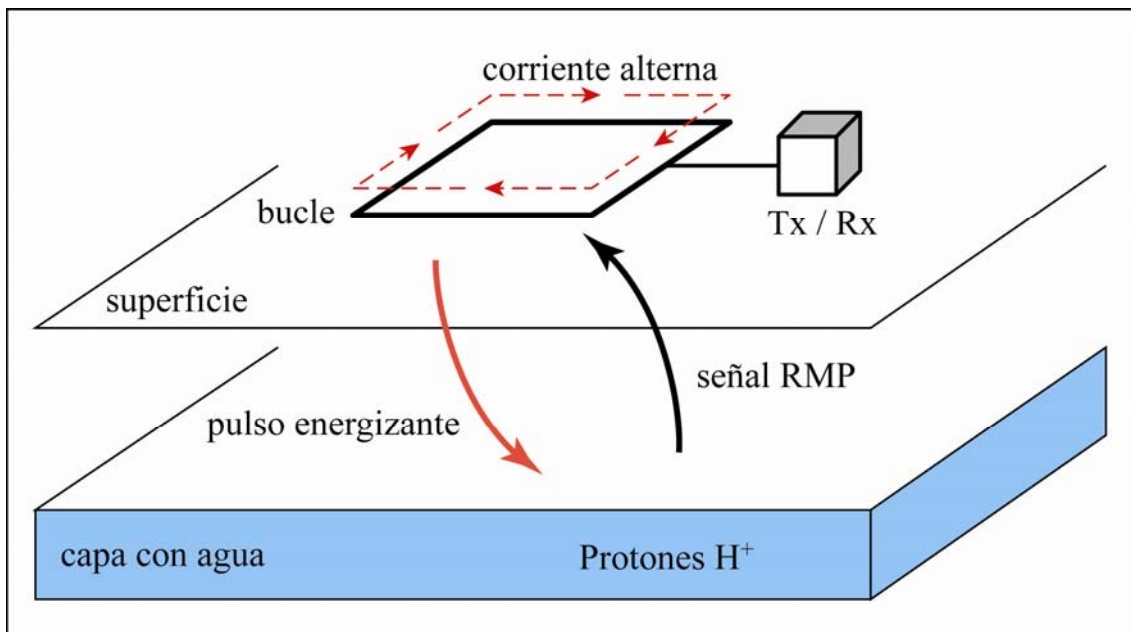


Figura 3. 36. Representación del procedimiento de medición con el NMR (modificado de IRIS Instruments, 2004).

## Principio

Una corriente alterna de amplitud  $I$  y frecuencia  $f$  (igual a la frecuencia de Larmor para los protones de hidrógeno de la zona) es pasada a través de un bucle de cable conductor durante un tiempo  $t$ , que se encuentra emplazado sobre la superficie del terreno (Figura 3.36). Al producto de  $I \cdot t$  (intensidad por duración), se le denomina momento de pulso  $q$  y viene dado en amperios por milisegundos (A·ms). El campo magnético oscilante que se genera es responsable de la desviación, a partir de su orientación de equilibrio, de los momentos magnéticos de los protones de hidrógeno (Figura 3.37). Una vez que la corriente es desconectada, la variación del campo magnético debida a la precesión de los protones a la frecuencia de Larmor, mientras recuperan su posición inicial de equilibrio, inducen en el bucle un campo eléctrico  $E(t)$  de la misma frecuencia, con una caída exponencial, cuyo máximo valor  $E_0$  y cuya constante de tiempo de decaimiento  $T_2^*$  son calculados por ajuste de una función exponencial a los valores medidos en campo. El resultado del NMR son las funciones  $E_0(q)$  y  $T_2^*(q)$  para varios pulsos de excitación  $q$  (Figura 3.38).

Debido a que, generalmente, los protones del hidrógeno que hay en el subsuelo están localizados en las moléculas del agua, la existencia de la señal  $E(t)$  es una indicación directa de la presencia de agua. El área del bucle empleado y la amplitud del pulso determinan la profundidad de investigación (Plata y Rubio, 2002).



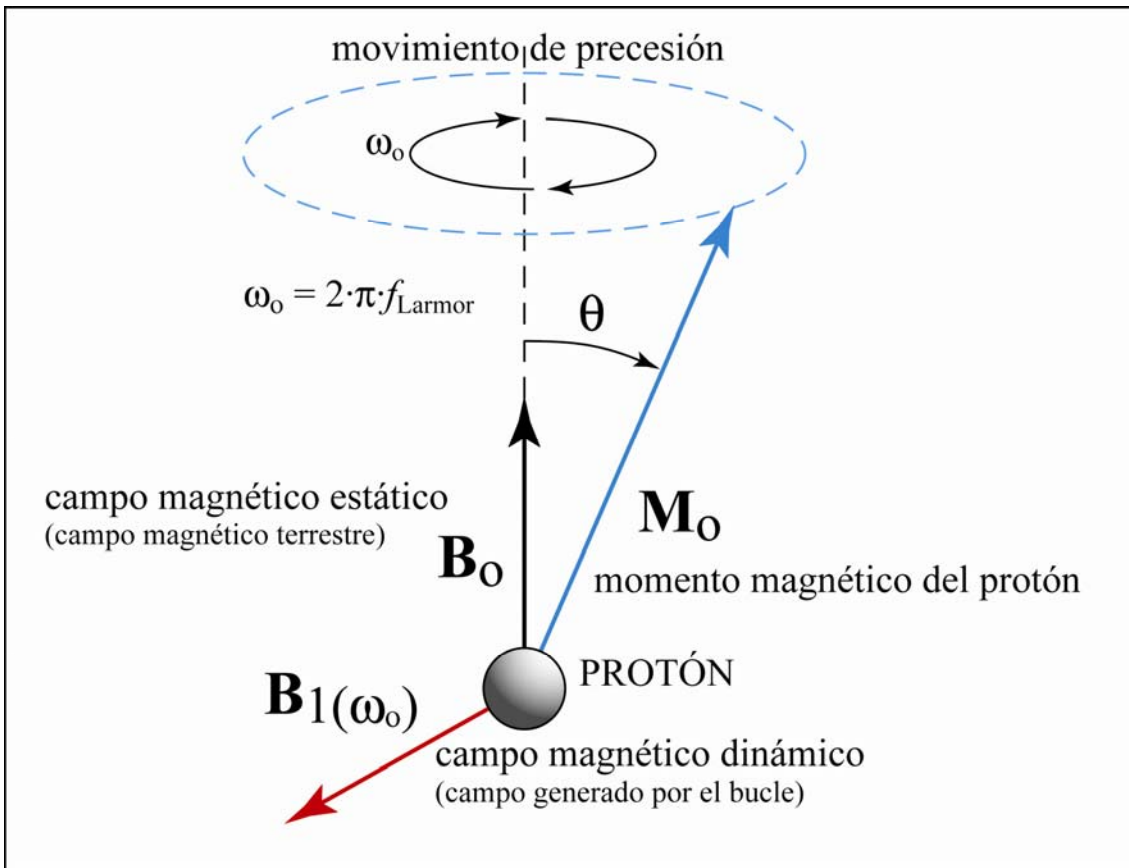


Figura 3. 37. Magnetización de un protón por un campo magnético dinámico generado por el bucle (modificado de IRIS Instruments, 2004).

La inversión de los datos permitirá la determinación del contenido de agua, que es proporcional a la amplitud de la señal. El tamaño de los poros del medio, que tiene relación con la permeabilidad, determina la constante de tiempo. Una vez invertidos los datos NMR, estos se facilitan en forma de porcentaje de agua frente a profundidad y de permeabilidad, en metros por segundo, frente a profundidad (IRIS Instruments, 2004).

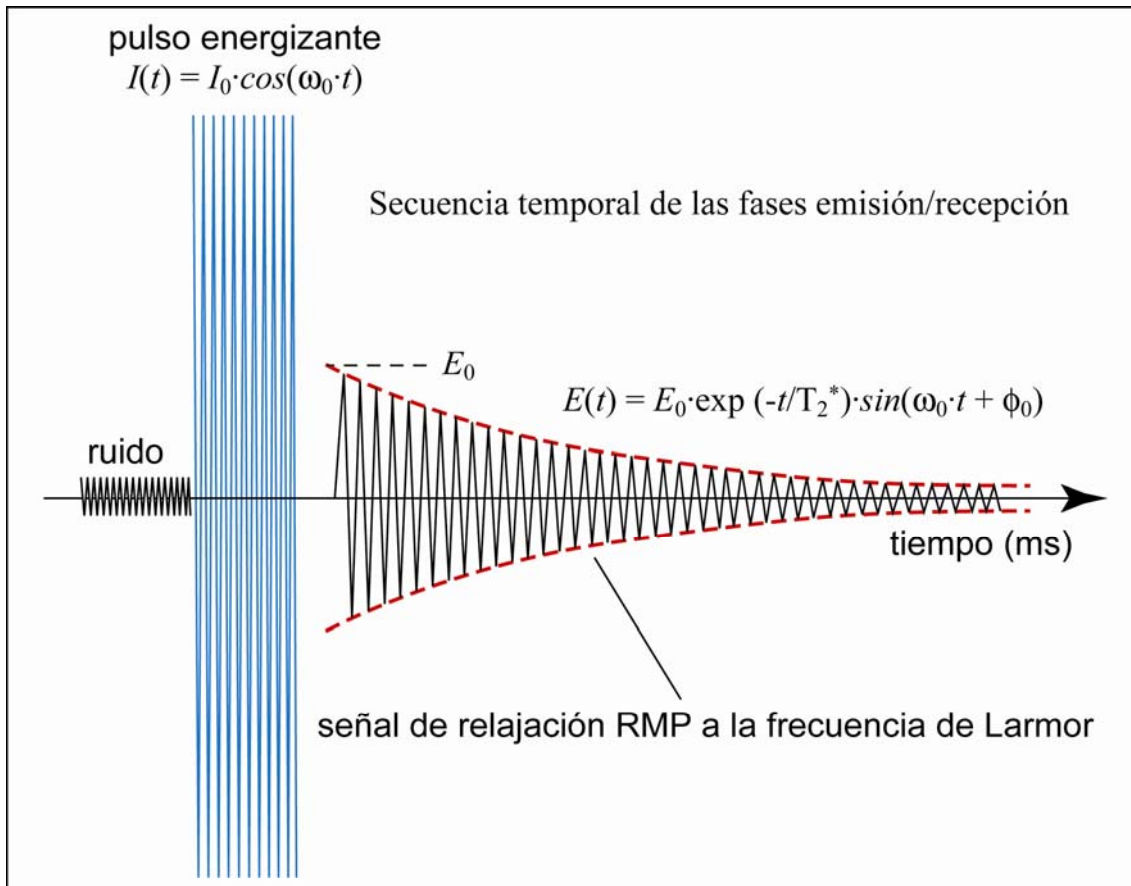


Figura 3. 38. Representación temporal de la secuencia de emisión/recepción (modificado de IRIS Instruments, 2004).

## Equipo

Para medidas en campo hay dos equipos principales: el equipo ruso HYDROSCOPE del ICKC (Rusia) y el NUMIS, que es un desarrollo más avanzado del HIDROSCOPE, y ha sido resultado de la investigación hecha por IRIS Instruments (Francia) en colaboración con el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, Francia) y el ICKC (Rusia) (Legchenko, *et al.*, 1997).

### 3.3 Técnicas geofísica en sondeos

Si bien en la Tesis Doctoral sólo aborda el empleo de técnicas geofísicas de superficie, debido a su importancia por la información que aportan las técnicas geofísicas de testificación de sondeos se describen brevemente. Las técnicas de testificación son aplicadas habitualmente para caracterizar litológicamente el subsuelo y

cartografiar indirectamente el penacho contaminante en estudios de contaminación de suelos (Figura 3.39). Estas técnicas pueden determinar propiedades físicas de las formaciones del subsuelo, tales como la permeabilidad y la porosidad e incrementar el radio de investigación de un simple sondeo mecánico. Una ventaja importante de estas técnicas frente a las técnicas geofísicas de superficie es que aquellas proporcionan valores de determinados parámetros obtenidos *in-situ*. Además, ofrecen información vital sobre las formaciones atravesadas por un sondeo cuando ha sido probable la pérdida de parte del testigo de perforación. Existen otras técnicas que se basan en las medidas geofísicas realizadas entre dos sondeos, y se las denomina “*cross-hole*”. Actualmente es bastante común, a partir del “*cross hole*”, del empleo de datos sísmicos, radar, y eléctricos para construir seudosecciones de la zona investigada.

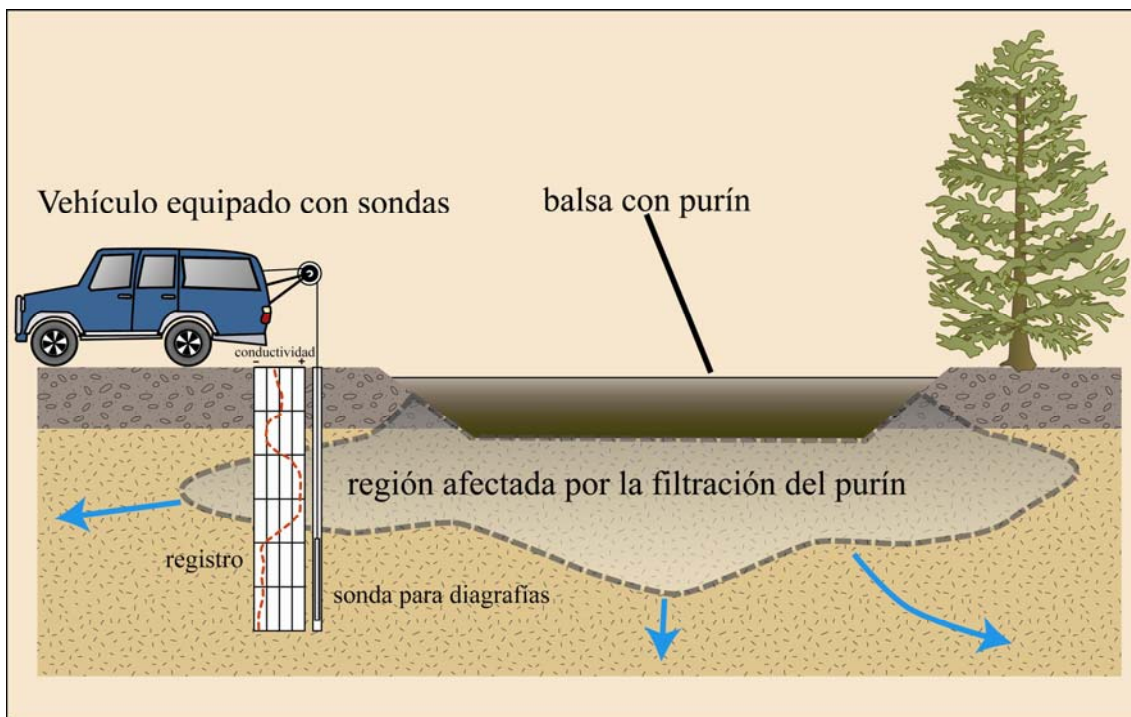


Figura 3. 39. Operación típica de testificación geofísica para estudios de contaminación de suelos (elaboración propia).

## Principio

Los principios sobre los que se basan las técnicas de testificación geofísica de sondeos son, generalmente, los mismos que para las técnicas geofísicas superficiales. Unos son desplegados horizontalmente y, los otros desplegados verticalmente (Figura 3.40). Básicamente, esta técnica consiste en la medición de diferentes parámetros geofísicos de los materiales del subsuelo atravesados por un sondeo mediante el empleo

de sondas que se introducen en dicha perforación (Rider, 2002). La representación gráfica de cada uno de esos parámetros medidos con respecto a la profundidad constituye el resultado de esta técnica, denominándose estos documentos registros geofísicos, diagrfías o *logs* (Figura 3.43). La interpretación de los datos de la testificación puede ser más complicada debido a la presencia de niveles de aguas subterráneas que producen cambios en las propiedades físicas (Daniels y Keys, 1990). El registro de radiactividad gamma natural es probablemente el único fiable por encima del nivel freático en todas las condiciones geológicas. Una complicación que puede limitar algunas campañas de testificación es el entubado del sondeo. Por ejemplo, SP, IP y las sondas de resistividad, no pueden ser empleadas con sondeos entubados, aunque se han empleado a veces con entubado perforado de plástico.

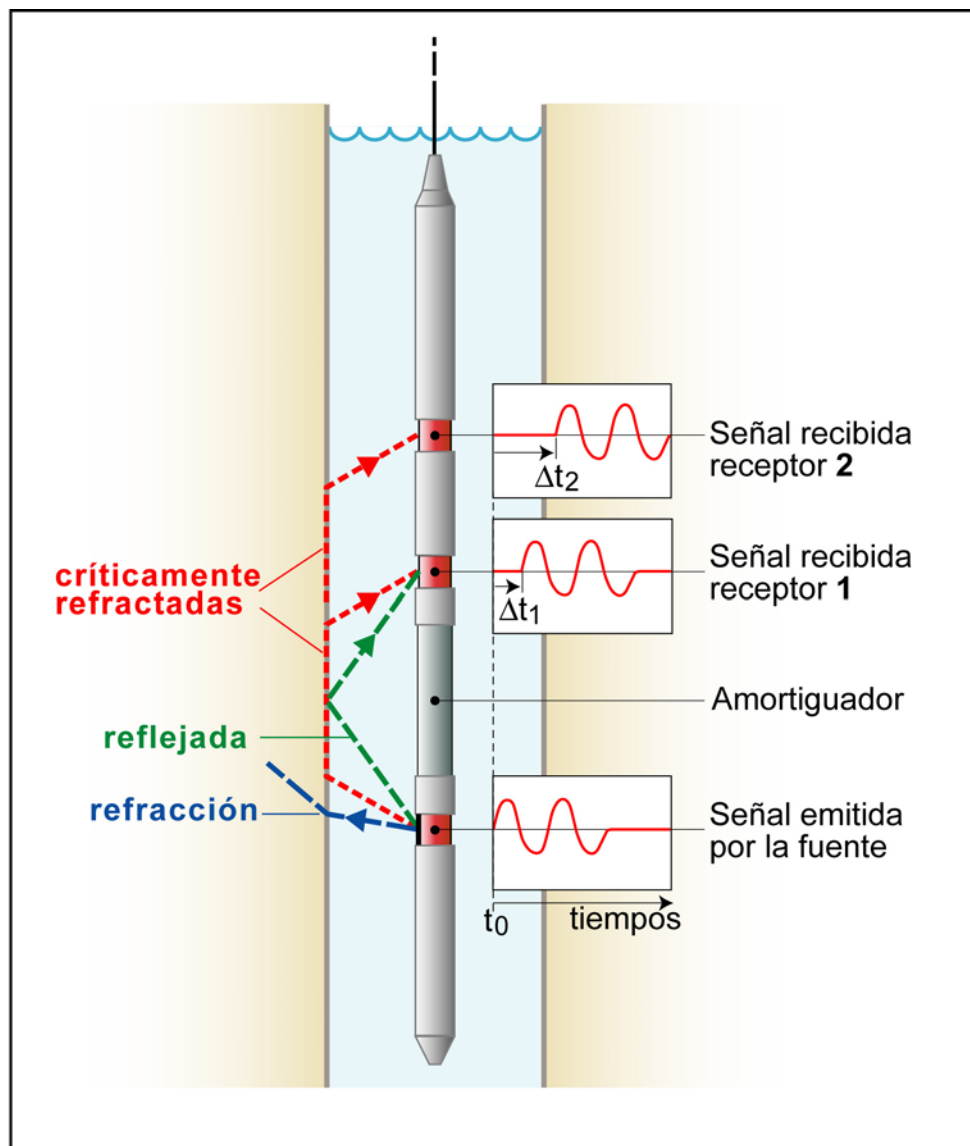


Figura 3. 40. Testificación con una sonda sónica (modificado de Chapellier, 1987).

La testificación geofísica puede ser empleada directa o indirectamente para:

- ▶ La selección de capas de interés
- ▶ La reconstrucción litológicas del sondeo
- ▶ La determinación de la extensión de la contaminación existente
- ▶ Seguimiento a largo plazo de la migración de los contaminantes

## Equipo

Daniels y Keys (1990) dan una descripción general de las diferentes sondas y sistemas de testificación. Entre los principales fabricantes de equipos de testificación están Geonics Ltd, Mount Sorpris Instruments, Century Geophysical Corporation, Robertson y Mineral Logging Systems.

Método Geofísico	sin entubación		con entubación	
	con aire	con fluido	plastico	acero
Rayos Gamma	X	X	X	X
Gamma Gamma densidad	X	X	X	X
Neutrón-neutrón	X	X	X	
Inducción EM	X	X	X	
TDR		X	X	
Resistividad		X		
SP		X		
Resistividad compleja		X		
Temperatura		X	X	X
Susceptibilidad magnética	X	X	X	
Magnetómetro 3 comp.	X	X		
Velocidad sónica		X		
Caliper	X	X		

X: Técnica aplicable    vacío: Técnica no aplicable

Figura 3. 41. Aplicabilidad de las técnicas de testificación según el tipo de sondeo (Mwenifumbo, 1991).

Tipo de Sonda	Propiedad medida	Aplicación determinación u obtención de:
Gamma natural	radiación gamma natural de los fluidos del sondeo y de la litología	separación en los registros de los horizontes de arcillas de las arenas contaminadas
Gamma-gamma	rayos gamma dispersos	densidad, porosidad y litología
Neutrón-neutrón	capturación de neutrones procedentes de procesos de fisión, termales o epitermales	porosidad, contenido de agua, litología y contenido en cloruro
Inducción EM	conductividad	litología, contenido de arcilla, penachos conductores
Resistividad	resistividad	litología, contenido de arcilla, penachos conductores
SP	voltaje natural del terreno	litología, separación arcilla/arena, flujos de agua
Temperatura	temperatura	fracturación, flujo de fluidos, oxidación, litología, corrección de otras medidas
Susceptibilidad magnética	susceptibilidad magnética	litología, susceptibilidad, zonas de alteración
Magnetómetro 3 comp.	componentes X, Y y Z del campo magnético terrestre	litología detallada, zonas de alteración
Velocidad sónica	velocidad de las ondas P	litología, porosidad y fracturación
Caliper	diámetro del sondeo	acabado del sondeo, fracturación, litología, corrección de otras medidas

Figura 3. 42. Aplicaciones típicas de las diagrfías (Glenn y Hohmann, 1981).

### Penetración, resolución

Algunas testificaciones directamente intersectan en la zona de interés, pero cuando esto no sea así, las sondas pueden proporcionar medidas de propiedades físicas de los materiales que se encuentran a cierta distancia del sondeo (Figura 3.42). La profundidad de investigación o penetración puede variar desde unas pocas decenas de centímetros, como en el caso de la radiactividad gamma natural, hasta decenas de metros, como en el caso de investigaciones del tipo “*cross-hole*”. La resolución de estas investigaciones geofísicas puede llegar al rango de los centímetros.

### Presentación, interpretación

Los datos de la testificación geofísica son presentados en unos gráficos denominados diagrfías (Figura 3.43). La interpretación puede llegar a ser compleja y hace necesaria la utilización de datos procedentes de muestras del sondeo (testigos, ripios), de la comparación de todos los registros geofísicos y de otras informaciones geoquímicas y geológicas que se disponga (Hacini *et al.*, 2006).

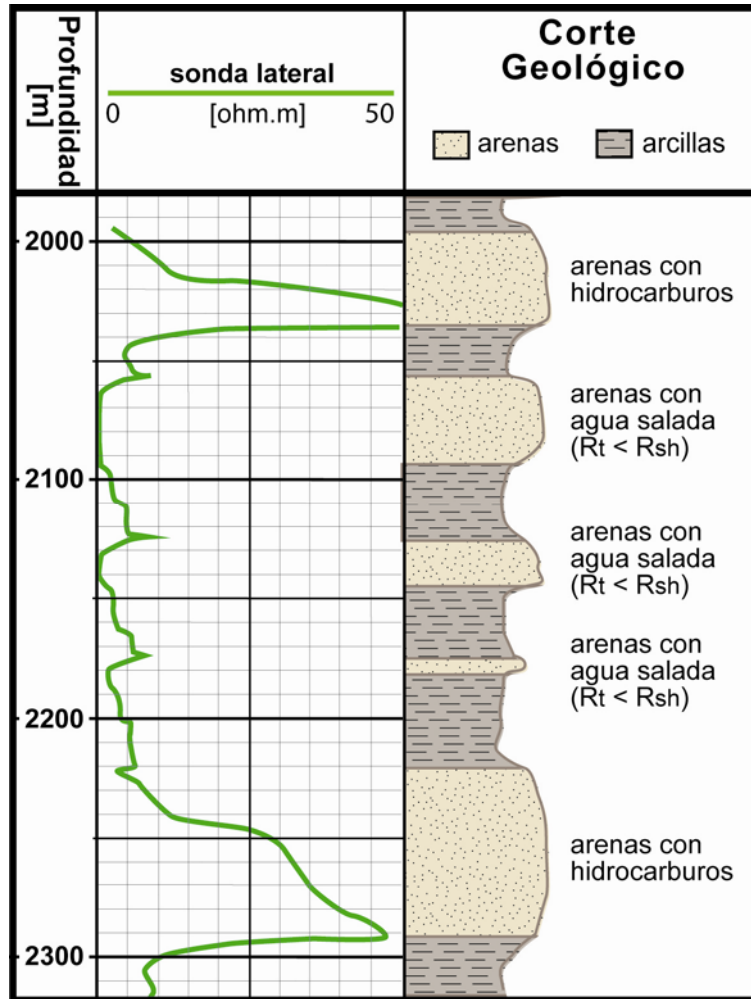


Figura 3. 43. Registro obtenido con una sonda de resistividad y su interpretación geológica (modificado de Chapellier, 1987).

### 3.4 Conclusiones

En esta Sección se han descrito las principales técnicas y equipos geofísicos que se emplean para la investigación medioambiental de suelos contaminados por DNAPLs (del inglés, “*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*”), estudios de vertederos, seguimiento de la posible contaminación de acuíferos someros, detección de objetos metálicos enterrados conteniendo sustancias tóxicas o nocivas, etc.: conductivímetros, método Slingram, método VLF-R, polarización inducida, sísmica de refracción, sísmica de reflexión, georadar, magnetometría, gravimetría, TDEM, potencial espontáneo, NMR, *streaming potential* y métodos eléctricos. Algunas de ellas tienen un empleo, en medioambiente, aún limitado pero con un gran potencial, como el caso del NMR en el estudio de acuíferos contaminados (ver Apartado 3.2.14), y otras tienen un uso muy

común, como los conductivímetros y resistivímetros (ver Apartados 3.2.1 y 3.2.2). También se han descrito brevemente los métodos de prospección en sondeos, o testificación geofísica, ya que complementan enormemente a las técnicas geofísicas de superficie aportando una información más *in-situ* y que permite delimitar con mayor grado resolución los horizontes litológicos presentes y, por ello, vendría a reducir ambigüedades inherentes en las fases de interpretación con las técnicas geofísicas de superficie. Aunque la mayoría de las veces es deseable, sin embargo, desgraciadamente no siempre es posible aplicar testificación geofísica por motivos presupuestarios o por no estar contemplada la realización de algún sondeo durante las fases de interpretación de las técnicas de geofísica superficial.

Se han visto algunas técnicas que por si solas pueden llegar a solucionar de forma fiable el problema que se les plantea en estudios de contaminación antrópica, sin tener en cuenta, en principio, los posibles problemas que surgen a la hora de elegir el modelo más adecuado a los valores medidos (problemas de equivalencia), ya que la propiedad física que miden está directamente relacionada con el tipo de fluidos o de sustancias que contiene el subsuelo, o bien, su presencia va a suponer un contraste importante de la propiedad física que se va a medir. Así por ejemplo, las técnicas que se basan en la medida de la conductividad eléctrica, o de su inversa, la resistividad eléctrica, son técnicas muy adecuadas para estudios de contaminación antrópica, ya que la presencia de fluidos va a provocar un contraste elevado sobre el valor de dichas variables.

Aunque lo anterior es cierto, es importante subrayar que la información obtenida con una determinada técnica geofísica, para que tenga validez, ha de ser corroborada con las informaciones obtenidas de otras técnicas geofísicas o a través de conocimientos geológicos precisos, de datos de sondeos, de análisis físico-químico sobre las muestras obtenidas, etc. Los métodos sísmicos de refracción y de reflexión y el método georadar no son adecuados para el seguimiento de penachos contaminantes o para delimitar su extensión ya que no suponen un contraste importante en el valor de la variable que miden (velocidad sísmica de las ondas P, en el caso de los métodos sísmicos, y la permitividad dieléctrica, en el caso del georadar); no obstante, son técnicas que permiten obtener una información precisa de la estructura geológica del subsuelo



(morfología de los estratos, presencia de fallas, posición del nivel freático, etc.) y esto sí puede ser importante para determinar posibles vías naturales de migración de los lixiviados contaminantes producidos por un depósito de residuos, para analizar la estanqueidad natural de un basamento rocoso, o bien para determinar la morfología de un paleocauce colmatado con material no consolidado que actúa como vía preferente de fluidos.

Al método gravimétrico le ocurre algo similar que a los métodos sísmicos, al tratarse de una técnica por sí sola poco interesante para estudios de contaminación antrópica pero que puede ayudar a conocer, de forma cualitativa, la morfología del subsuelo si hay un importante contraste lateral de los materiales allí presentes. La magnetometría, puesto que mide, al igual que la gravimetría, campos potenciales naturales, en este caso el campo magnético terrestre y su influencia en la magnetización de los materiales del subsuelo, tiene una aplicación muy específica y residual en estudios de contaminación antrópica; sólo en aquellos casos en los que se esté investigando la presencia de objetos metálicos enterrados con un tamaño adecuado para que su presencia sea detectada desde superficie con los magnetómetros. El método del potencial espontáneo o SP, sólo tendrá cierto éxito cuando se investiguen la presencia de objetos metálicos masivos que están enterrados y presentan importantes procesos electroquímicos de oxidación-reducción; por ello, debido a la dificultad de obtener interpretaciones fiables sobre la causa de la anomalía, este método no es de uso habitual en estudios de contaminación antrópica sino más bien su uso prácticamente se restringe, salvo pocas excepciones, al campo de la exploración minera para la búsqueda de depósitos masivos de mineral. El método del “*streaming potential*”, antes que para la delimitación de zonas afectadas por contaminantes, se aplica para la detección de posibles fugas en estructuras de almacenamiento con impermeabilización artificial (embalses, depósitos, vertederos, etc.).

Hay que destacar que el valor de resistividad eléctrica de los materiales y fluidos que conforman el subsuelo se mueve en amplios rangos en comparación con otros parámetros geofísicos (ver Apartado 3.1.7). Así por ejemplo, los valores de la densidad empleada en el método gravimétrico normalmente varían en factores menores de 2, y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas normalmente varía para factores

mayores de 10. Por esta razón, la resistividad y otros métodos eléctricos y electromagnéticos basados en esta propiedad, permiten desarrollar técnicas geofísicas muy versátiles y adecuadas para estudios de contaminación de suelos (Porres, 2003).

Por tanto se puede concluir que las técnicas más idóneas para la investigación, a profundidades someras, de los problemas relacionados con la contaminación antrópica son aquellas que se basan en la medida de la conductividad eléctrica, o la resistividad eléctrica, o sus formas complejas (ver Apartado 3.1.1); es decir, los métodos geoelectrónicos de corriente continua, los métodos electromagnéticos en el dominio frecuencial y temporal, los métodos electrostáticos y los métodos de resistividad compleja (IP). La elección de un método u otro va a depender de la disponibilidad y coste del equipo, de la profundidad de investigación deseada, de la mínima resolución exigida, del tipo de sustancias presentes en el subsuelo y de su tamaño y dispersión.

En esta Tesis Doctoral, la técnica seleccionada, para el estudio de los problemas relacionados con la contaminación antrópica de la Región de Murcia, es la tomografía eléctrica 2D/3D (ver Capítulo 4), que constituye un desarrollo reciente de las técnicas geoelectrónicas clásicas de corriente continua. Se ha seleccionado porque es un método que ha ofrecido informaciones concluyentes de forma precisa en otros estudios de contaminación con un grado de resolución bastante bueno, aportando la información de forma cuantitativa (seudosección resistiva); además, la forma que tiene este equipo de operar permite obtener resultados de forma rápida, a bajo coste y con un mínimo de operadores. Igualmente, tiene la capacidad de poder llevar a cabo un seguimiento temporal del problema.

## 4 Tomografía Eléctrica 2D/3D

La palabra *tomografía* proviene del griego *tomos*, que significa corte o sección. De esta forma la tomografía está basada sobre la premisa de que el conjunto de datos observados o medidos están relacionados a integrales lineales a lo largo de líneas o proyecciones de alguna cantidad física; en el caso abordado en la presente Tesis Doctoral se trata de la resistividad eléctrica. La tomografía es empleada para reconstruir un modelo del objeto físico buscado en el que los datos proyectados de dicho modelo están en concordancia con los datos medidos (Lines y Newrick, 2004).

Este método geofísico es relativamente reciente y su principal desarrollo se debe a los importantes avances logrados en el campo de la informática y en el tratamiento matemático de los datos, que aún hoy continúan. Desde hace cinco o seis años, la tomografía eléctrica ha venido a convertirse en una herramienta casi indispensable para estudios de problemas relacionados con el medio ambiente, de hidrogeología, de ingeniería civil, de geología, de prospección minera o de arqueología (Marescot, 2003). Las principales ventajas de este método son su relativo bajo coste y la rapidez en el tratamiento de los datos, que permiten la posibilidad de observar los resultados *in situ*.

La sección final que proporciona la tomografía eléctrica es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos. Aunque hay un cierto parecido, la técnica de la tomografía eléctrica es diferente a la técnica de las calicatas eléctricas (ver Apartado 3.2.3) puesto que ésta última ofrece únicamente una información cualitativa sobre la variación lateral de la resistividad aparente del subsuelo, basada en muy pocas medidas, a diferencia de aquella que proporciona un modelo teórico del subsuelo gracias al procesado de un gran número de medidas a través de una serie de algoritmos matemáticos (Granda y Cambero, 2000).

El método de tomografía eléctrica es conocido en la literatura técnica como “*electrical imaging survey*”, o también como “*electrical resistivity tomography*” (ERT). En este capítulo se describe de forma más detallada este método debido a que es el empleado en esta Tesis Doctoral, tanto para obtener seudosecciones geoeléctricas 2D como para bloques de resistividad eléctrica 3D.

## **4.1 Tomografía eléctrica 2D**

### **4.1.1. Introducción**

Una de las limitaciones de los sondeos eléctricos verticales surge del hecho de que no tienen en cuenta las variaciones laterales de la resistividad del subsuelo. El método de tomografía eléctrica 2D fue puesto a punto con el principal objetivo de obtener un modelo del subsuelo donde la distribución de las resistividades varíe verticalmente y horizontalmente a lo largo del perfil (Figura 4.1). Es necesario considerar en este caso que la resistividad no cambia en sentido perpendicular al perfil. Esta suposición es bastante razonable para la mayoría de los cuerpos geológicos y por ello el método podrá tener aplicación real. Será recomendable, por tanto, colocar el perfil perpendicularmente al cuerpo a estudiar, lo que permitiría conocer sus dimensiones reales. En teoría, una investigación 3D debería ser aun más precisa. De este modo, si para un sondeo eléctrico vertical se emplean algunas decenas de puntos de medida, para un perfil 2D serán necesarias entre 100 y 1000 puntos de medida y varios

miles para una adquisición 3D. Esta evolución ha permitido, como consecuencia, una sustanciosa mejora en el conocimiento del subsuelo.

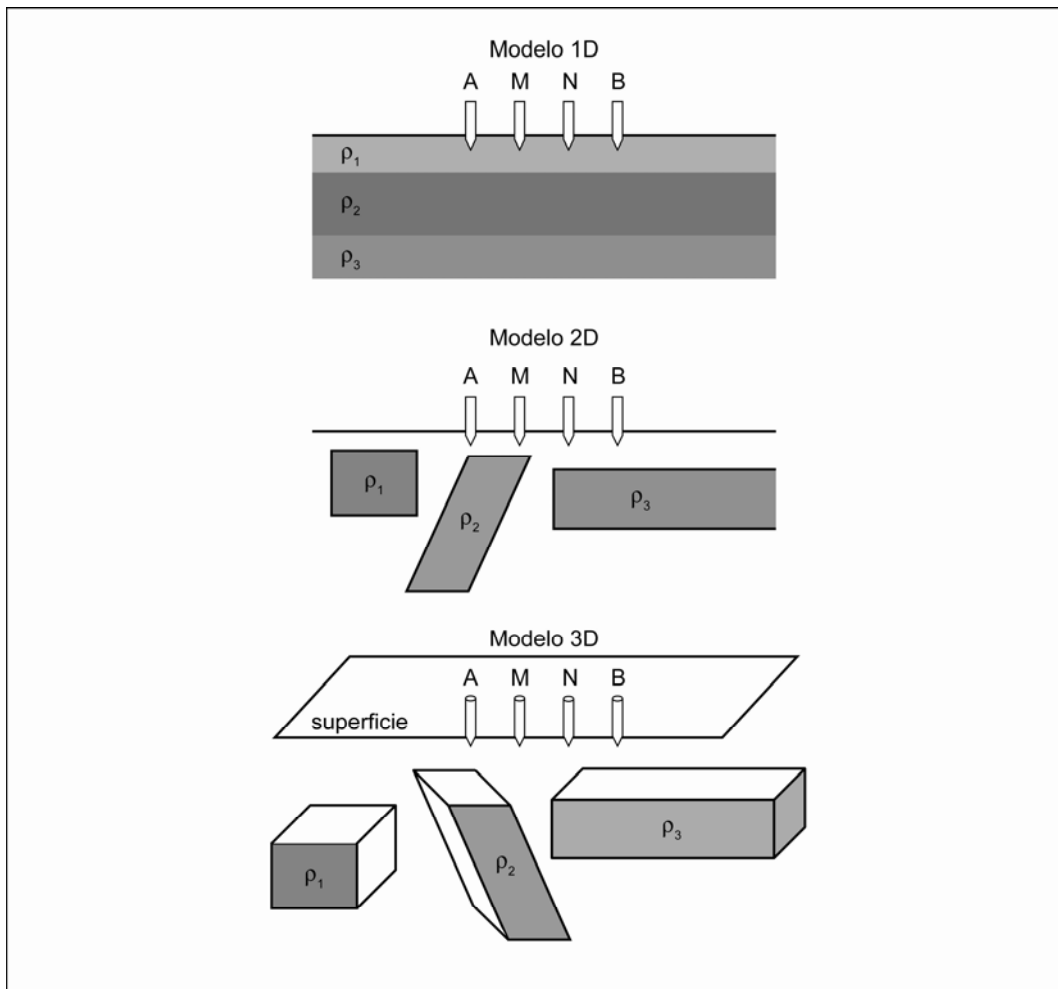


Figura 4. 1. Los tres modelos diferentes empleados en la interpretación de medidas de resistividad (Loke, 2000)

#### **4.1.2. Procedimiento de adquisición 2D**

Una adquisición 2D emplea en general un gran número de electrodos conectados a un cable multiconductor, colocados según un perfil. Un ordenador portátil, en el cual está programada la secuencia de medidas (o un resistivímetro que posee un disco duro), está conectado a una unidad de conmutación y selecciona automáticamente los electrodos empleados para la inyección de la corriente y la medida del potencial. La secuencia de medidas, para trabajar con resistivímetros en modo multielectródico, se lleva a cabo con el empleo del programa ELECTRE II (Figura 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5).

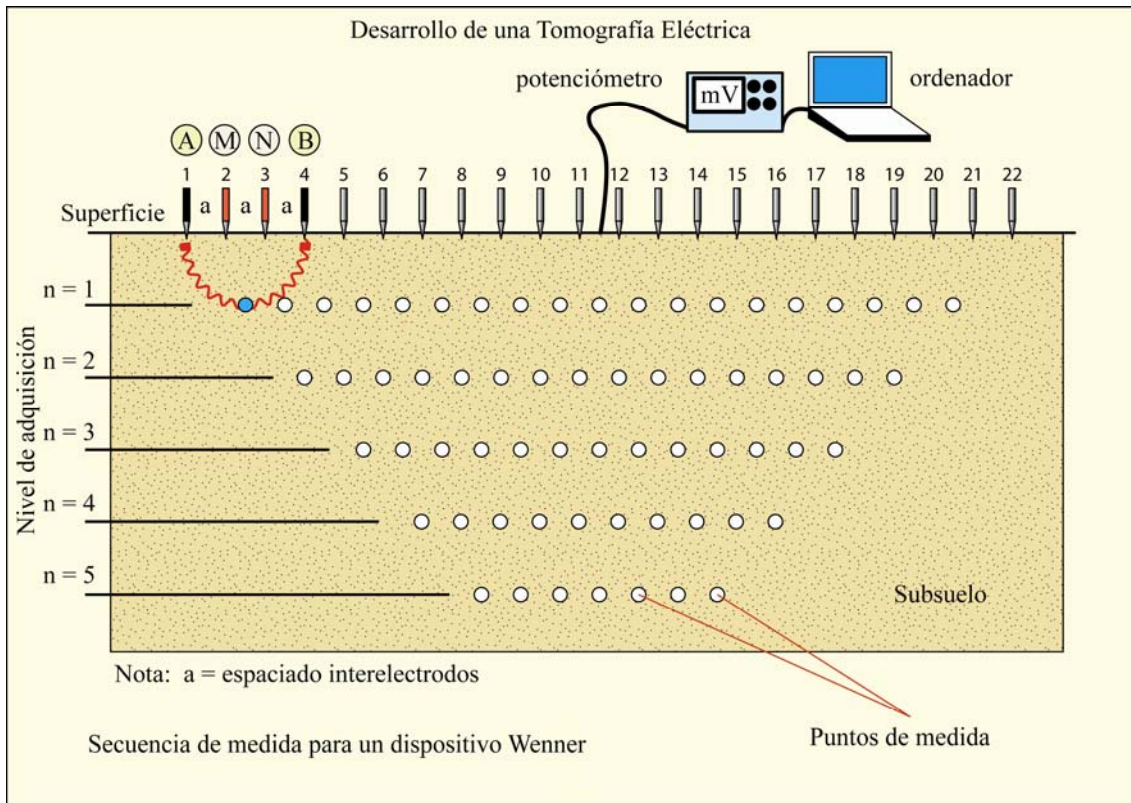


Figura 4. 2. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el primer nivel de adquisición.

Cada electrodo posee una dirección numérica única dentro del dispositivo de medida, lo que le permite ser identificado por el ordenador. La secuencia de medida es generalmente creada bajo la forma de ficheros de texto, los cuales contienen diversa información sobre el tipo de dispositivo empleado. Se asegura un contacto galvánico con el terreno a través del empleo de picas metálicas de acero inoxidable o de electrodos especiales que eliminen la generación de la polarización inducida. Lo habitual es emplear un espaciamiento constante entre un electrodo y el siguiente.

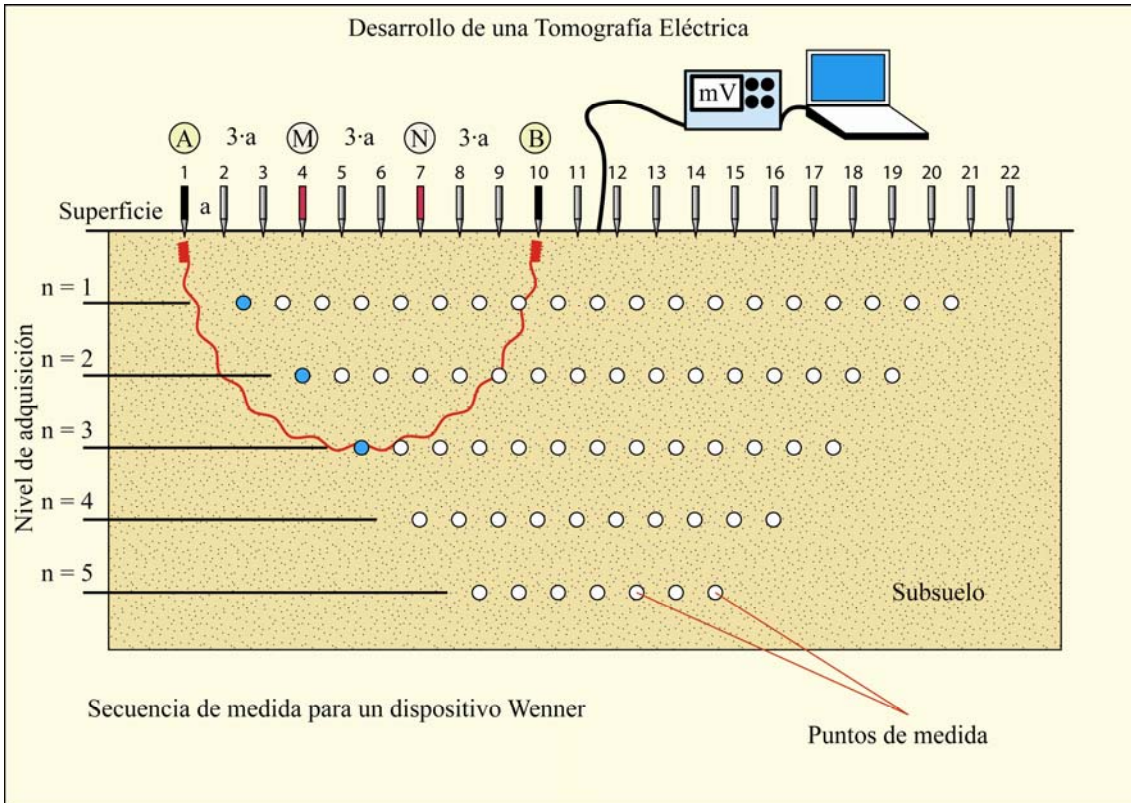


Figura 4. 3. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el tercer nivel de adquisición.

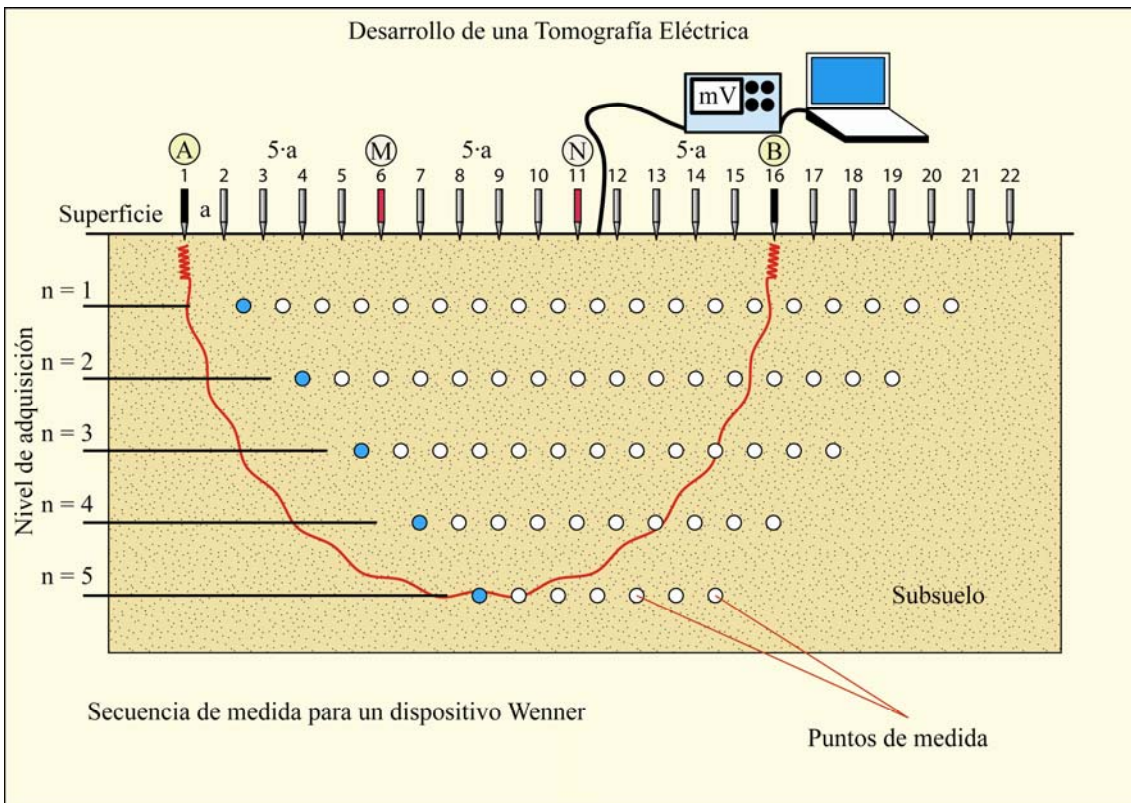


Figura 4. 4. Representación esquemática de la secuencia de medida, para un dispositivo Wenner, en el quinto nivel de adquisición.

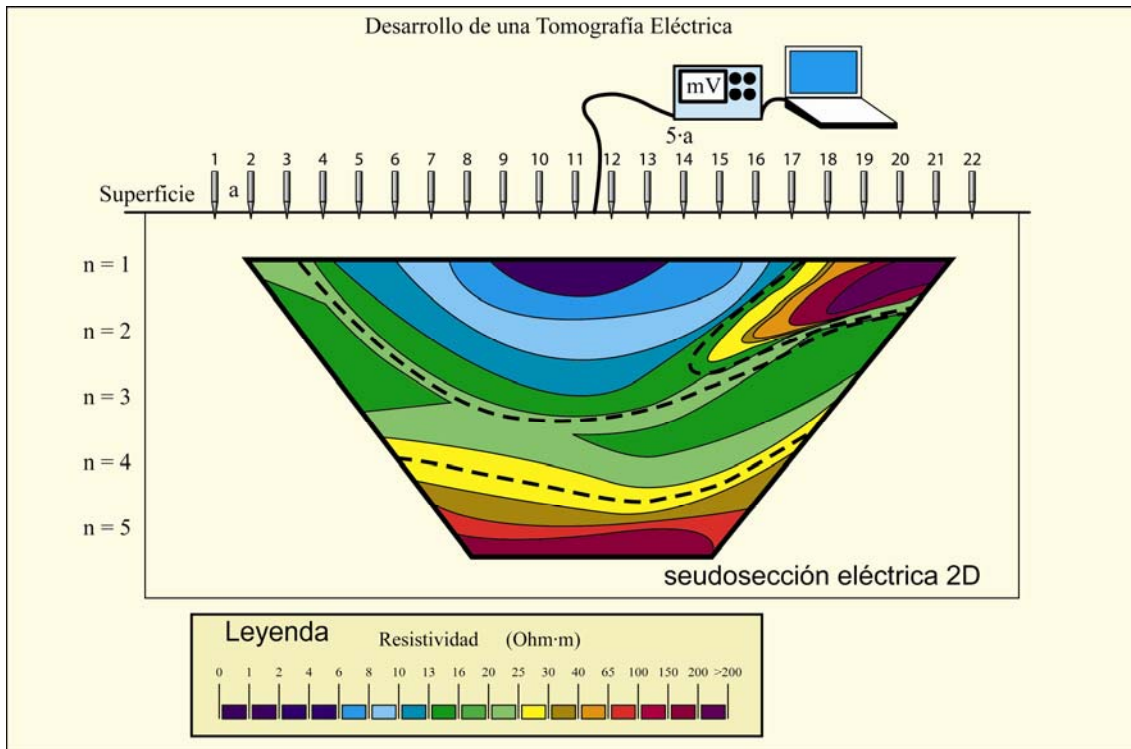


Figura 4. 5. Representación de lo que sería una seudosección eléctrica 2D obtenida al interpolar los valores de resistividad aparente de los diferentes niveles de adquisición.

Cuando comienza la adquisición de medidas, el programa selecciona automáticamente los electrodos empleados para la inyección de la corriente eléctrica y la medida del potencial eléctrico. La medida es almacenada inmediatamente en la memoria del ordenador o del resistivímetro.

Para obtener una buena imagen 2D del subsuelo, es necesario que la cobertura de las medidas sea igualmente 2D y uniforme. Por ejemplo, para un dispositivo Wenner con 22 electrodos, se obtendría lo siguiente (Figura 4.2): En este dispositivo la primera medida del fichero de adquisición se va a hacer con ayuda de los electrodos 1, 2, 3 y 4, si bien los electrodos 1 y 4 servirán de electrodos de inyección de corriente (A y B) y los electrodos 2 y 3 servirán de electrodos de medida de potencial (M y N). Todo el dispositivo va a desplazarse inmediatamente una distancia “a”. Así, en esta nueva posición los electrodos 2 y 5 servirán de electrodos de inyección de corriente y los electrodos 3 y 4 de medida de potencial. El proceso se repite hasta el electrodo 22. Se tienen así, para el primer nivel de adquisición, 19 combinaciones de medidas (22-3). El dispositivo Wenner se caracteriza por el mantenimiento de una distancia constante entre todos los electrodos.



Para el nivel de adquisición siguiente se tomará una distancia entre electrodos igual a  $2x_a$ . La primera medida del segundo nivel de adquisición implicará, por consiguiente, a los electrodos 1 y 7 para la inyección de corriente y a los electrodos 3 y 5 para la medida de potencial. El proceso se repite de nuevo hasta el electrodo 22. Este segundo nivel de adquisición comprenderá 16 posibilidades ( $22-2 \times 3$ ). Se efectúan así las medidas de cada nivel de adquisición con espaciamentos de  $3x_a$ ,  $4x_a$ , etc. (Figura 4.3 y 4.4). Es evidente que, conforme aumenta la distancia entre los electrodos, el número de combinaciones de medida disminuye. Por lo tanto, el número de medidas va a depender del tipo de dispositivo empleado. Para tener buenos resultados, es fundamental efectuar medidas sistemáticas de forma que se eviten las zonas sin medidas. El dispositivo Wenner es el que presenta menor número de medidas comparativamente con otros dispositivos empleados.

Para el dispositivo Polo-polo, se emplea un dispositivo similar al empleado para el dispositivo Wenner. Para un sistema de 22 electrodos, 21 medidas son efectuadas con una distancia de  $1x_a$  entre A y M, a continuación  $2x_a$  y así sucesivamente.

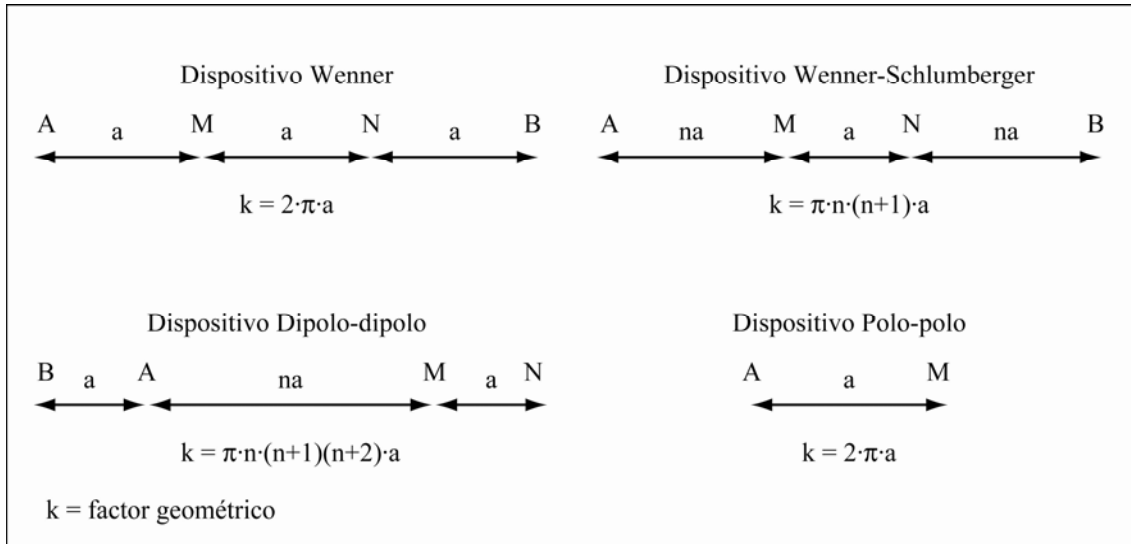


Figura 4. 6. Dispositivos tetraelectródicos comúnmente utilizados.

Para los dispositivos Dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger o Polo-dipolo, la secuencia de medidas es ligeramente diferente (Figura 4.6). Para un dispositivo Dipolo-dipolo, por ejemplo, las medidas comienzan habitualmente con una distancia de  $1x_a$  entre los electrodos de inyección de corriente (A y B) y los electrodos de medida de potencial (M y N). La primera secuencia de medidas se efectúa dándole un valor de 1 al

factor  $n$  (que es la relación entre  $AM/AB$ ). Esto es seguido por  $n$  igual a 2, manteniendo a los electrodos de inyección de corriente A y B a un espaciamiento constante de valor  $1x_a$  (igual para los electrodos de potencial M y N). Así; cuando  $n = 2$ , la distancia entre el electrodo de corriente A y el electrodo de potencial M es el doble de la distancia existente entre los electrodos de inyección de corriente A y B. Para las siguientes medidas, el valor de  $n$  es incrementado hasta un valor de 6. A partir de  $n = 6$ , el valor del potencial obtenido ya no será muy fiable. Para aumentar la profundidad de investigación, se aumenta la distancia AB a  $2x_a$ , y otra serie de medidas comienza con diferentes valores de  $n$ . Si fuera necesario se puede repetir esta operación con espaciamientos más grandes entre A y B (y entre M y N).

Para los dispositivos Wenner-Schlumberger y Polo-dipolo, son utilizadas diferentes combinaciones de  $a$  y  $n$ . Resulta evidente que para un dispositivo Wenner-Schlumberger, el dispositivo exacto es un dispositivo híbrido entre un Wenner en su sentido estricto y un dispositivo gradiente, es decir, aquel que posee una distancia MN suficientemente pequeña como para respetar la hipótesis matemáticas y suficientemente grande como para que la medida del potencial pueda ser realizada.

### **4.1.3. Representación de la tomografía en pseudosecciones**

Los perfiles de tomografía eléctrica aún no invertidas se representan habitualmente bajo la forma de pseudosecciones (secciones eléctricas del subsuelo expresadas en resistividades aparentes) con la ayuda de un programa informático que permite representar los contornos de los isovalores de resistividad aparente. La situación horizontal de los puntos se lleva sobre la vertical que pasa por el punto medio del dispositivo tetraelectródico empleado en la medida. La situación vertical de los puntos se realiza según una distancia vertical que es proporcional a la separación entre electrodos (Figura 4.2). Por ejemplo, en investigaciones de tomografía eléctrica empleando la configuración Dipolo-dipolo, una tradición heredada de los métodos de polarización inducida (ver Apartado 3.2.4) es la de colocar los puntos de medida en el punto de intersección de dos líneas que parten a  $45^\circ$  de los centros de los segmentos AB y MN (Figura 4.7). No obstante, esto no es del todo fiable, ya que es una convención

establecida para representar, de forma sencilla, valores de resistividad aparente; sin embargo, no es un valor de resistividad real.

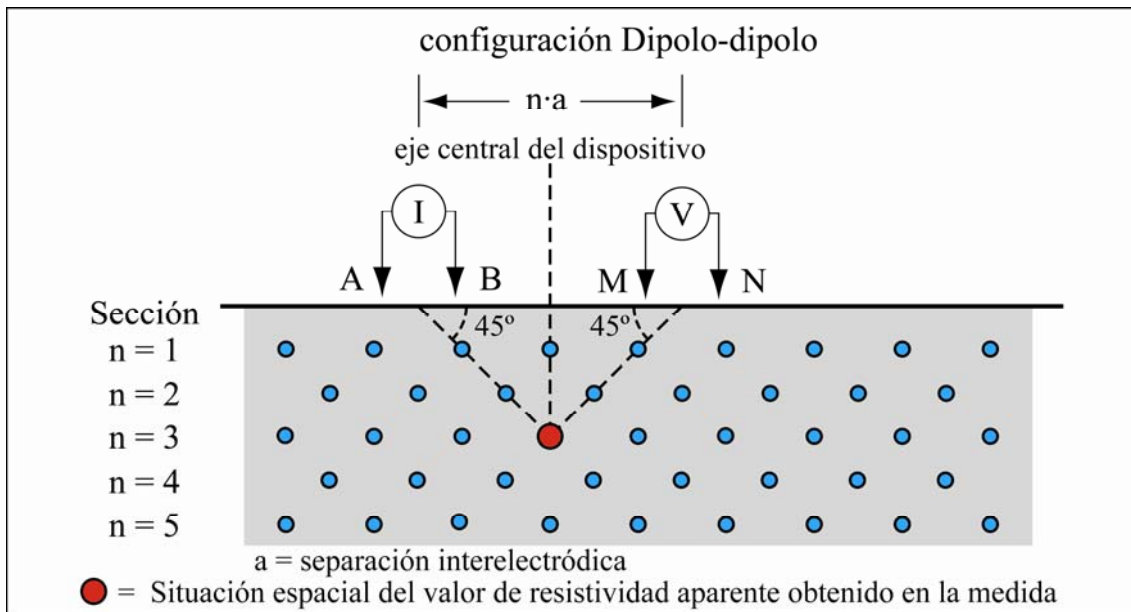


Figura 4. 7. Procedimiento para la situación de los puntos de medida con la configuración Dipolo-dipolo en una seudosección de resistividades aparentes.

Otro método para colocar los puntos de medida sobre una posición vertical está basado en la profundidad media de investigación (Edwards, 1977), o seudoprofundidad, del dispositivo electródico empleado. Este valor de seudoprofundidad está basado en los valores de sensibilidad de la derivada de Frechet para un semi-espacio homogéneo (Loke, 2000), y puesto que este método parece tener una base matemática, es el método que se emplea para representar seudosecciones de los valores de resistividad aparente obtenidos en campo.

Una seudosección proporciona una imagen muy aproximada de la distribución de resistividades reales del subsuelo. Sin embargo esta imagen es una distorsión del subsuelo ya que depende, además de la distribución de las resistividades también del dispositivo de medida empleado. Una seudosección es una forma cómoda de representar las resistividades aparentes con el fin de ayudar a obtener hipótesis sobre la distribución de las resistividades reales del subsuelo. Por ello, es importante no emplear la seudosección de resistividades aparentes como una imagen fina de la resistividad real del subsuelo.

En la Figura 4.8 se muestran las seudosecciones obtenidas con tres dispositivos diferentes (Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-dipolo) para un modelo constituido por dos cuerpos idénticos, de 1000 ohm.m de resistividad real, y siendo infinitamente largos, perpendicularmente al dispositivo. Según la Figura 4.8 se puede apreciar como las formas generadas por un mismo objeto difieren significativamente según el dispositivo de medida empleado. Esta es la razón por la cual es casi imposible interpretar correctamente una seudosección de resistividades aparentes no invertida.

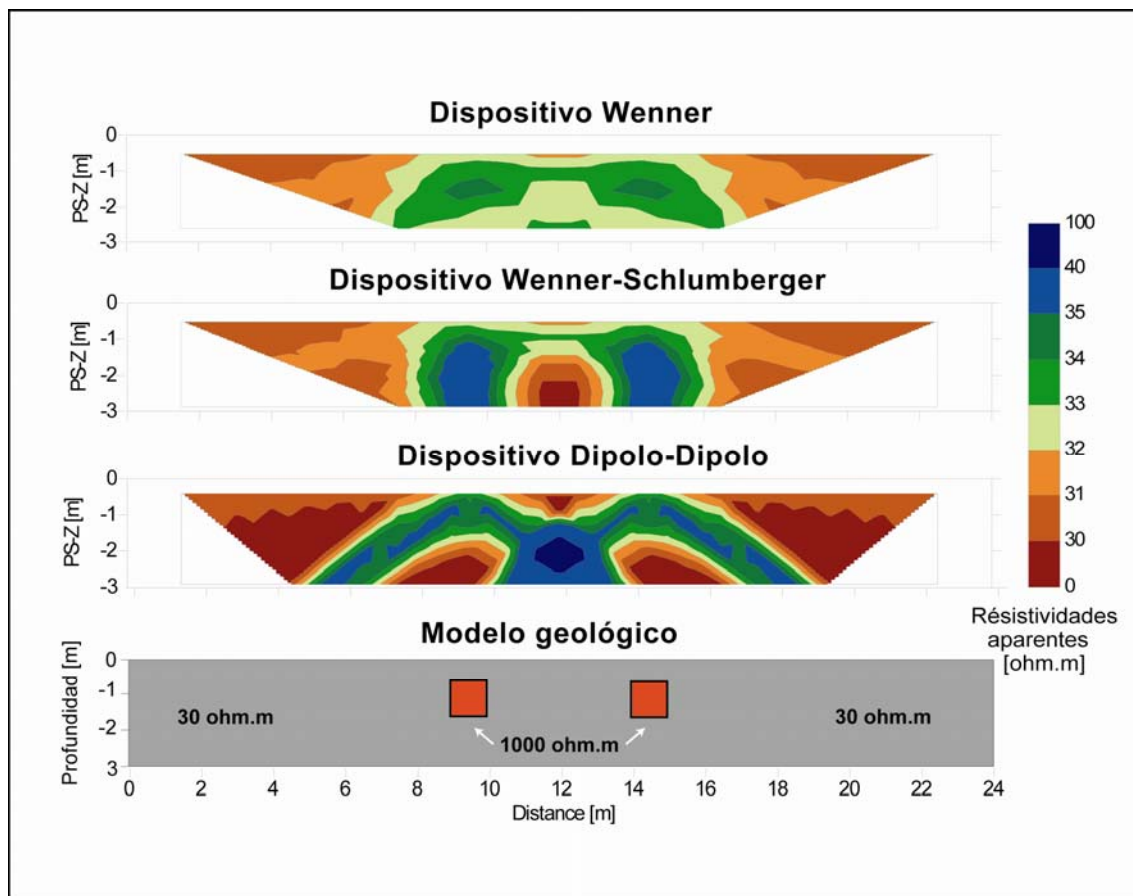


Figura 4. 8. Valores calculados de las resistividades aparentes provocadas por un modelo para tres dispositivos diferentes de medida (Marescot, 2003)

Es interesante el empleo del programa libre, RES2DMOD.EXE (Loke, 2000), el cual está basado en el problema directo; es decir calcula las seudosecciones de resistividades aparentes que se obtendrían con un dispositivo de medida determinado ante un modelo 2D del subsuelo al que se le han aplicado diferentes valores de resistividad real. De esta forma, el programa permite diagnosticar las seudosecciones que obtendríamos ante un determinado subsuelo o conocer el tipo de anomalías

resistivas que provocarían determinados objetos según el tipo de dispositivo empleado, su emplazamiento en el subsuelo y sus resistividades reales (Figura 4.9).

Para el cálculo de los valores de resistividad aparente se puede emplear un método de diferencias finitas (Dey y Morrison, 1979) o un método de elementos finitos (Silvester y Ferrari, 1996).

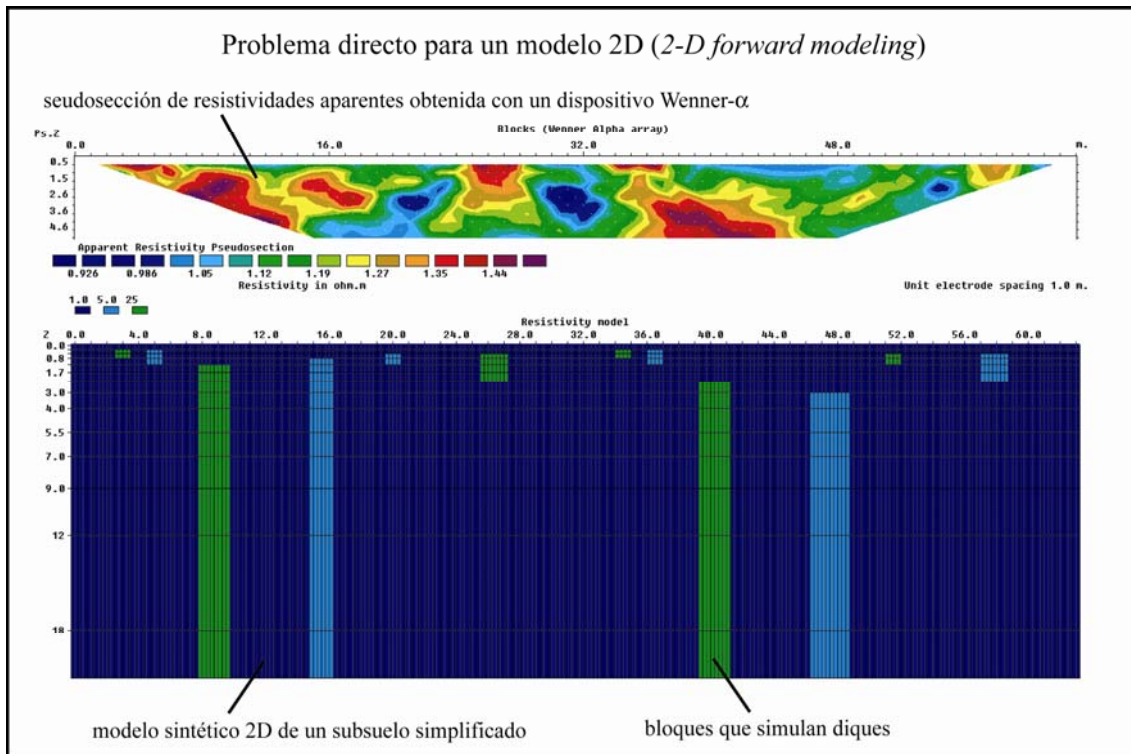


Figura 4. 9. Seudosección obtenida a partir de un modelo 2D del subsuelo empleando el programa RES2DMOD (Loke, 2001).

#### **4.1.4. Ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos**

Uno de los principales problemas en resistividad es la elección del dispositivo de medida adecuado según el tipo de estructura a estudiar, la sensibilidad del resistímetro y el ruido de fondo (corrientes parásitas, telúricas). En tomografía eléctrica 2D superficial, los principales dispositivos comúnmente empleados son el Wenner, el Wenner-Schlumberger, el Dipolo-dipolo, el Polo-dipolo y el Polo-polo. Entre las características que deben ser consideradas se encuentran la sensibilidad de los dispositivos a las variaciones verticales y horizontales, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal y la fuerza de la señal.

Las características de la información que se recoge varían según la colocación de los electrodos (Dahlin y Loke, 1998; Dahlin y Zhou, 2004). Las propiedades de un dispositivo dado pueden ser analizadas evaluando la sensibilidad (función de sensibilidad) de la medida en un punto dado en relación a una variación de las propiedades eléctricas del terreno (Barker, 1979). Es posible evaluar analíticamente las diferentes sensibilidades para un subsuelo homogéneo de resistividad  $\rho$  siguiendo la formulación de Park y Van (1991). Loke y Barker (1995) han demostrado que una variación del campo de resistividad de un modelo provocaría una variación del campo de potencial  $V$  pudiendo ser expresado por:

$$\frac{\delta V}{\delta \rho} = \frac{1}{\rho^2} \int_{\Omega} \nabla V \cdot \nabla V' d\Omega \quad (4.1)$$

Siendo,  $V'$  el potencial resultante de una fuente de corriente de intensidad 1 situada en la posición de un receptor y  $\Omega$  el dominio estudiado. Esta situación analítica no puede ser evaluada nada más que para un semi-espacio homogéneo con los electrodos en la superficie. Para un modelo no-homogéneo, o con una geometría más compleja, puede ser necesario el empleo de diferencias finitas para obtener los valores de sensibilidad (Spitzer y Kümpel, 1997).

La Figura 4.10 representa los valores de la función de sensibilidad para diferentes dispositivos y para un semi-espacio homogéneo (Roy y Apparao, 1971). Esta función permite conocer hasta que punto las variaciones de la resistividad de una determinada región van a influir en la medida de la diferencia de potencial. Se puede decir que cuanto mayor es el valor de esta función, como es el caso de la región próxima a los electrodos, mayor es su influencia sobre la medida del potencial. Según la Figura 4.10, la función de sensibilidad es diferente para cada uno de los dispositivos electródicos, lo que significa que cada uno de ellos tiene sus propias características. Esto es válido para grandes distancias a los electrodos y la forma de la función ayudará a conocer la respuesta de los diferentes dispositivos frente a diferentes tipos de estructuras.

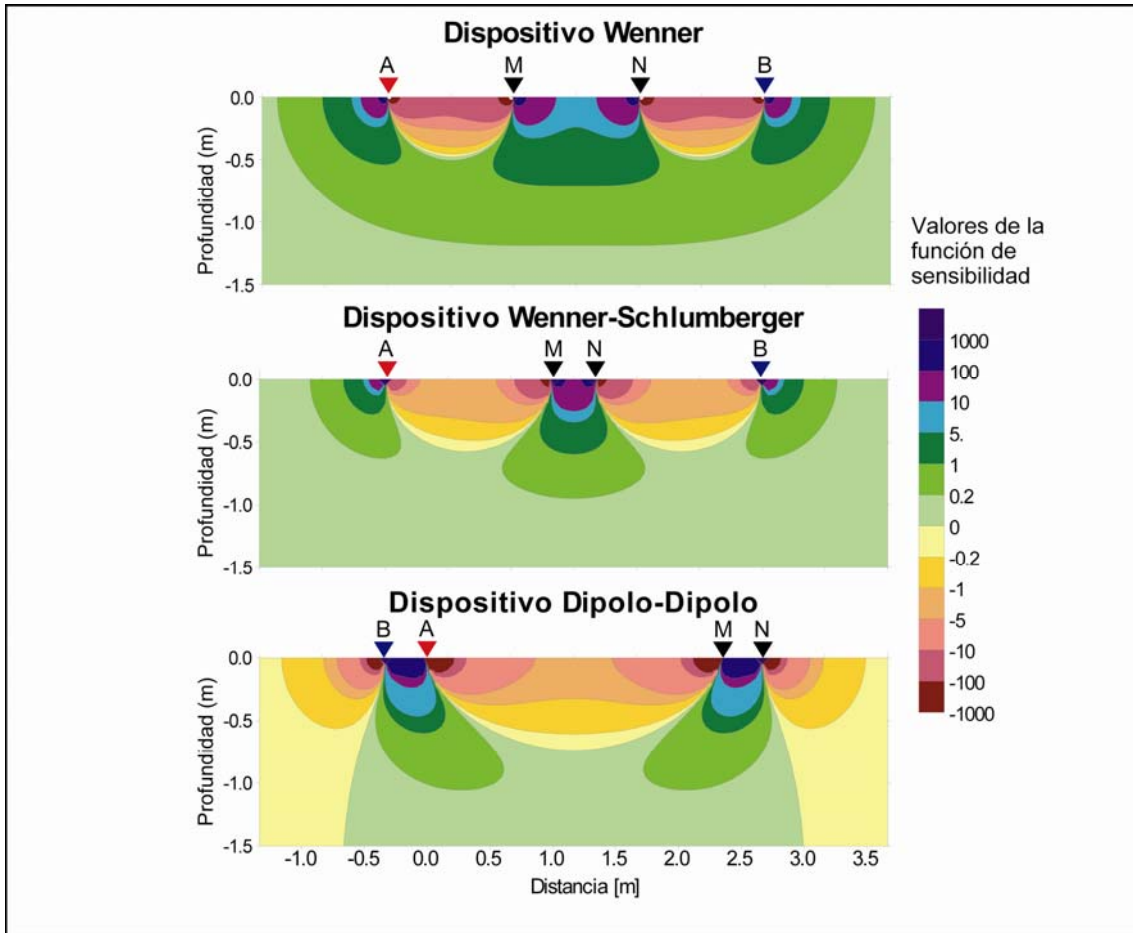


Figura 4. 10. Función de sensibilidad para dispositivos Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-dipolo sobre un semi-espacio homogéneo (Roy y Apparao, 1971).

La contribución de un elemento de volumen de terreno homogéneo a la diferencia de potencial es dada por Roy y Apparao (1971). Ellos definen la diferencia de potencial,  $\Delta V$ , debida a un elemento de volumen colocado en  $x$ ,  $y$  y  $z$ . La diferencia de potencial entre dos electrodos de potencial en la superficie de un semi-espacio homogéneo de resistividad  $\rho$  viene dada según la siguiente expresión (Apparao, 1997):

$$\Delta V = \frac{\rho l}{4\pi^2} dz \left( \begin{aligned} & \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3} \cdot \sqrt{((x-a)^2 + y^2 + z^2)^3}} - \\ & \frac{(x-a)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\sqrt{((x-a)^2 + y^2 + z^2)^3} \cdot \sqrt{((x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2)^3}} + \\ & \frac{x(x-a-b) + y^2 + z^2}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3} \cdot \sqrt{((x-a-b)^2 + y^2 + z^2)^3}} + \\ & \frac{(x-a-b)(x-a-b-c) + y^2 + z^2}{\sqrt{((x-a-b)^2 + y^2 + z^2)^3} \cdot \sqrt{((x-a-b-c)^2 + y^2 + z^2)^3}} \end{aligned} \right) dx \cdot dy \quad (4.2)$$

En esta función, la superficie viene representada por el plano  $xy$  y la profundidad por  $z$ . El electrodo de inyección de corriente  $+I$  (A) se encuentra en la posición  $(0, 0, 0)$ ; el primer electrodo de potencial se encuentra en la posición  $(a, 0, 0)$  y el segundo en la posición  $(a + b, 0, 0)$ . El otro electrodo de inyección de corriente  $-I$  (B) se encuentra en la posición  $(a + b + c, 0, 0)$ .

Con esta función es notoria la influencia de un volumen unitario del subsuelo sobre la medida de la diferencia de potencial. Integrando la Ecuación 4.2 en función de la profundidad ( $dz$ ), se pueden calcular los coeficientes que permiten obtener las profundidades medias de investigación (Edwards, 1977). La Figura 4.11 representa estos coeficientes para los cinco dispositivos de medida más utilizados.

La profundidad media de investigación puede ser considerada como la profundidad a la cual una porción de terreno situada por encima de este límite tiene la misma influencia que aquella otra porción de terreno situada por debajo. Esta profundidad media de investigación no tiene el significado de la profundidad de investigación (señal máxima) como es definida por Apparao (1997); sin embargo para el propósito de esta Tesis Doctoral será considerada como profundidad máxima de investigación (Bernard, 2003) (Figura 4.12).

La profundidad media de investigación  $z_e$  que nos interesa depende de  $n$  (Figura 4.6) y de  $a$  (espaciamiento entre electrodos), o bien de  $L$  (longitud total del dispositivo). En Wenner, se determina la profundidad media de investigación del dispositivo ( $z_e$ ) multiplicando la mayor distancia entre electrodos  $a$  o la longitud máxima del dispositivo ( $L$ ), con el coeficiente dado en la tabla de la Figura 4.11. Para un dispositivo Wenner-Schlumberger o un dispositivo Dipolo-dipolo, es preferible emplear el valor de la longitud total del dispositivo ( $L$ ) multiplicado por el coeficiente correspondiente (Figura 4.11)



Tipo de dispositivo	n	$z_e/a$	$z_e/L$
Wenner - $\alpha$	-	0.519	0.173
Polo-polo	-	0.867	-
Dipolo-dipolo	1	0.416	0.139
	2	0.697	0.174
	3	0.962	0.192
	4	1.220	0.203
	5	1.476	0.211
	6	1.730	0.216
	7	1.983	0.220
	8	2.236	0.224
Wenner-Schlumberger	1	0.520	0.173
	2	0.930	0.186
	3	1.320	0.189
	4	1.710	0.190
	5	2.090	0.190
	6	2.480	0.190
Polo-dipolo	1	0.520	-
	2	0.930	-
	3	1.320	-
	4	1.710	-
	5	2.090	-
	6	2.480	-

Figura 4. 11. Tabla de coeficientes para determinar la profundidad media de investigación ( $z_e$ ) para los principales dispositivos (Edwards, 1977).

Según la Figura 4.11 para dispositivos Wenner-Schlumberger, Wenner alfa o Dipolo-dipolo, la profundidad media de investigación es del orden de 0,2 veces la longitud total del perfil (Loke, 2000). Así, para un perfil de 265 metros de longitud con dispositivo de medida Wenner-Schlumberger, como el empleado en esta Tesis, es esperable una profundidad de investigación de 53 metros.

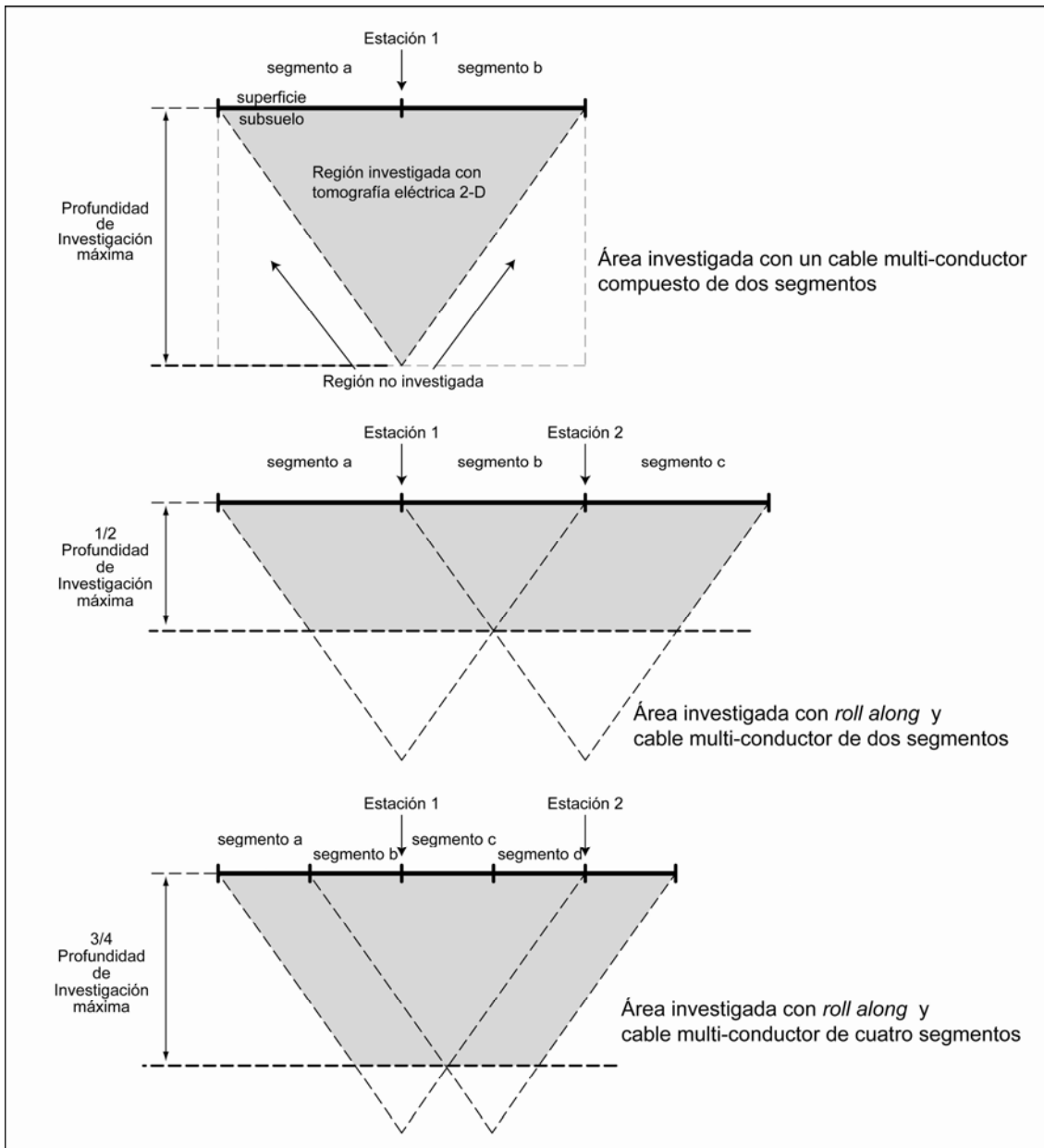


Figura 4. 12. Ejemplos de profundidades máximas de investigación obtenidas con un sistema multi-electrodo para un dispositivo Wenner o un dispositivo Dipolo-dipolo (Bernard, 2003).

Empleando un sistema *roll along*, para conseguir mayor cobertura lateral (Figura 4.12), la máxima profundidad de investigación, que permite una continuidad lateral del fondo de la pseudosección, viene dada por  $(n-1)/n$  veces la profundidad máxima obtenida con la secuencia inicial, donde  $n$  es el número de segmentos del perfil de tomografía eléctrica (Bernard, 2003).

Desde un punto de vista práctico la profundidad de investigación va a depender también de la capacidad de medir el potencial entre M y N, así según la expresión siguiente:

$$V_{MN} = \rho \cdot \frac{I_{AB}}{k} \quad (4.3)$$

Siendo  $I_{AB}$  la intensidad de corriente que se introduce en el terreno,  $k$  el factor geométrico,  $\rho$  la resistividad del terreno y  $V_{MN}$  el potencial medido entre M y N. Estos parámetros pueden facilitar una buena medida para grandes profundidades de investigación si se cumple una o varias de las siguientes premisas (Bernard, 2003):

- Un terreno de resistividad alta. Un terreno de roca dura de una resistividad de 1000 ohm.m produce una señal para el potencial  $V_{MN}$  que es diez veces mayor que la de un terreno formado por materiales sedimentarios de resistividad 100 ohm.m y esa misma señal será 100 veces mayor que la de un terreno arcilloso de 10 ohm.m. Este parámetro está fuera del control que tiene el operador sobre el equipo. Además terrenos muy resistivos puede ser un obstáculo para la penetración de corriente en profundidad.
- Una elevada intensidad de corriente. Para cumplirse esto o bien el terreno debe presentar una baja resistencia eléctrica, lo que puede conseguirse incrementando el número de picas clavadas o añadiendo agua salada en el suelo, o bien se incrementa el voltaje  $V_{AB}$ .
- Un voltímetro altamente sensible con capacidad de filtrado. Incluye sistemas de apilamiento o *stacking*, sistemas para el promedio de la señal medida, etc. Ello permite poder medir una baja señal  $V_{MN}$  en periodo de tiempo lo más corto posible.

## Dispositivo Wenner

En el dispositivo Wenner, se puede ver según la Figura 4.10 que los contornos de los valores de la sensibilidad son casi horizontales en la vertical del dispositivo. Por esta propiedad, un perfil con dispositivo Wenner será más sensible a los cambios verticales que a los horizontales de la resistividad. Esto implica que el dispositivo Wenner está recomendado para detectar estructuras horizontales (buena resolución

vertical), pero desaconsejado para detectar estructuras verticales (poca resolución horizontal). Comparando los datos de la Figura 4.11, se destaca que este dispositivo tiene la profundidad media de investigación más baja y que la fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico  $k$  (Figura 4.6). El factor  $k$  del dispositivo Wenner es de lejos el más pequeño en comparación a otros dispositivos convencionales. Por esta razón, el dispositivo Wenner posee la señal más fuerte. Esta propiedad puede convertirse en determinante en terrenos con fuerte ruido de fondo. Un problema de este dispositivo es la baja densidad de puntos de medida.

### **Dispositivo Dipolo-dipolo**

Este dispositivo es muy utilizado en la medida de la resistividad y en la medida de la polarización inducida ya que permite obtener un bajo acoplamiento electromagnético entre los circuitos de corriente y de potencial (esto es un gran problema en el método de polarización espectral inducida).

Observando los contornos de la función de sensibilidad de la Figura 4.10, se constata que este dispositivo es muy sensible en la vertical de los dos dipolos y que los contornos de esta función son básicamente verticales. Esto implica que este dispositivo es muy sensible a los cambios horizontales de la resistividad lo que lo hace ideal para detectar estructuras verticales. La profundidad de investigación depende fuertemente de los parámetros  $a$  y  $n$ . Para valores bajos de  $n$ , la profundidad de investigación es inferior a la de un dispositivo Wenner, mientras que para valores altos de  $n$ , ésta llega a ser superior. En cualquier caso, la densidad de puntos de medida es netamente superior a la del dispositivo Wenner. Desgraciadamente, este dispositivo posee un inconveniente importante: los electrodos de medida del potencial ( $M$  y  $N$ ) se encuentra situados fuera de los electrodos de corriente y esto hace que la fuerza de la señal sea muy débil, especialmente para valores elevados de  $n$ . En efecto, el voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor  $n$ . Es posible superar este problema si se aumenta la distancia  $a$  entre los dipolos cuando se desee aumentar la profundidad de investigación, de modo que aumentará la fuerza de la señal.

Para emplear este dispositivo es necesario buenas condiciones para la adquisición (poco ruido de fondo), un circuito bien aislado del ruido, un resistivímetro muy sensible y un muy buen contacto con el suelo.

En la Figura 4.10 se destaca que el punto donde se representa la medida (en el centro del dispositivo) no corresponde a una zona de fuerte sensibilidad (ésta se encuentra situada bajo los dipolos). La distribución de los puntos de medida sobre la pseudosección no refleja por tanto la realidad representada por los valores de resistividad aparente. En algunos programas de inversión los bloques del modelo se construyen según la distribución obtenida a través del método de las profundidades medias de investigación. Si este método es válido para dispositivos tales como el Wenner o el Wenner-Schlumberger, no lo es tanto para el dispositivo Dipolo-dipolo donde el punto de medida cae en una región de muy baja sensibilidad; por ello los programas de inversión deberán tener en cuenta este fenómeno y emplear un método más sofisticado de inversión (Loke, 2000).

### **Dispositivo Wenner-Schlumberger**

Este dispositivo es un híbrido entre el dispositivo Wenner y el dispositivo Schlumberger (Pazdirek y Blaha, 1996), creado para la tomografía eléctrica superficial. La Figura 4.6 ofrece una representación sobre el despliegue de los electrodos de este tipo de dispositivos. El coeficiente  $n$  es simplemente la relación entre la distancia  $MN$  ( $a$ ) y la distancia  $AM$  o  $NB$ . Observando la forma de los contornos de los valores de la función de sensibilidad bajo el centro del dispositivo (Figura 4.10) se comprueba que no son ni horizontales ni verticales. Comparativamente a un dispositivo Wenner, la zona entre  $M$  y  $N$  es más sensible mientras que la zona entre  $A$  y  $M$  o entre  $B$  y  $N$  es netamente menos sensible. Esta forma implica que este dispositivo es, en una menor medida, sensible a las variaciones verticales y horizontales. Es por tanto, un buen compromiso entre el dispositivo Wenner y el dispositivo Dipolo-dipolo. Este dispositivo tiene también una profundidad de investigación un 10 % superior a la del dispositivo Wenner. La fuerza de la señal es inferior a éste último, pero superior a la del Dipolo-dipolo. La cobertura horizontal es superior a la proporcionada por el dispositivo Wenner y muy ligeramente inferior a la del dispositivo Dipolo-dipolo. La distribución de los

electrodos en el dispositivo Wenner-Schlumberger permite, con un número igual de electrodos, efectuar un número superior de medidas.

### **Dispositivo Polo-polo**

Este dispositivo posee únicamente un electrodo de inyección de corriente y un electrodo de medida de potencial, es muy poco utilizado en tomografía eléctrica 2D, pero se emplea frecuentemente en tomografía eléctrica 3D.

Para crear un dispositivo Polo-polo, el segundo electrodo de corriente y de potencial deben estar situados, teóricamente, en el infinito. Como el efecto del electrodo en el infinito (N o B) es aproximadamente proporcional a la relación  $AM/BM$ , es necesario colocar el electrodo B o N a una distancia que como mínimo sea 20 veces la distancia AM máxima empleada con el fin de que el error sea inferior al 5 %. Si las distancias entre electrodos son grandes, lo anterior puede convertirse en un problema.

Otra desventaja de este dispositivo viene de la gran distancia existente entre M y N. Este dispositivo es muy sensible a los ruidos de fondo y a las corrientes telúricas que pueden degradar severamente los datos. Este dispositivo, es por tanto, empleado con distancias muy pequeñas entre electrodos (< 10 metros) en 2D y en 3D.

Este dispositivo tiene la mayor cobertura horizontal y la mayor profundidad de investigación, pero tiene la resolución más baja.

### **Dispositivo Polo-dipolo**

El dispositivo Polo-dipolo tiene una buena cobertura horizontal y una fuerza de señal más grande que el dispositivo Dipolo-dipolo. Es menos sensible que el dispositivo Polo-polo a las corrientes telúricas. El principal problema viene del hecho de que es un dispositivo asimétrico (un electrodo de inyección de corriente en el infinito). Para evitar el efecto de la asimetría sobre las seudosecciones de resistividad aparente suelen repetirse las medidas con los electrodos dispuestos en sentido directo e inverso. Así

combinando los dispositivos Polo-dipolo directo e inverso, cualquier artefacto creado por la asimetría del dispositivo es eliminado.

La fuerza de la señal (que disminuye con el cuadrado del factor  $n$ ) es más débil que en un dispositivo tipo Wenner o Wenner-Schlumberger pero más fuerte que en un dispositivo Dipolo-dipolo. Este dispositivo es particularmente apreciado en polarización inducida por su gran fuerza de señal y su bajo acoplamiento electromagnético.

#### **4.1.5. Conclusiones para la tomografía eléctrica 2D**

Para esta Tesis Doctoral se ha seleccionado la tomografía eléctrica 2D debido a que es una técnica geofísica no destructiva, cuyo coste es relativamente bajo en comparación con otras técnicas geofísicas, reduce la necesidad de efectuar un gran número de sondeos mecánicos con el ahorro que ello implica, necesita muy pocos operadores para la toma de medidas en campo, de hecho con sólo dos operadores se pueden hacer en un día siete perfiles conteniendo cada uno de ellos centenares de puntos de medida, lo que sería imposible aplicando sondeos eléctricos verticales (SEV) o calicatas eléctricas. Además, mide también la resistividad eléctrica del subsuelo el cual es un parámetro muy versátil y concluyente para la investigación de suelos contaminados o de estructuras para el almacenamiento de residuos mineros como ha quedado demostrado en numerosas investigaciones (Paterson, 1995; Moyle *et al.*, 1994; Yaramanci, 2000). Este parámetro, además, se ve generalmente menos afectado por efectos externos, lo cual lo hace tremendamente operativo en situaciones muy diversas y para cubrir objetivos muy variados.

Con la tomografía eléctrica 2D se resuelve en gran medida el inconveniente que tienen las técnicas geoelectricas convencionales (sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas), en cuanto a que es capaz de ofrecer una imagen invertida (algoritmos iterativos de mínimos cuadrados) de las resistividades reales del subsuelo, aunque éste posea una geología compleja (fallas, fluidos, cambios de facies, etc.) con cambios laterales y verticales de resistividad. Esta pseudosección de resistividades reales va a facilitar enormemente la interpretación de las estructuras geológicas o de los contactos que han originado los datos de resistividad aparente medidos. Además la

tomografía eléctrica es de las herramientas más adecuadas para realizar un seguimiento de la migración de contaminantes en el subsuelo.

El dispositivo de medida empleado en esta Tesis Doctoral para la tomografía eléctrica 2D ha sido el Wenner-Schlumberger, debido a su adecuada sensibilidad para detectar variaciones en horizontal y vertical de la resistividad, su elevada densidad de puntos de medida, su mayor poder de penetración en relación al dispositivo Wenner y a una buena cobertura lateral. Además existen estudios recientes que destacan la idoneidad de este dispositivo para el estudio de la contaminación de acuíferos a través de tomografía eléctrica (Sánchez *et al.*, 2006; Casas *et al.*, 2005). Comparaciones numéricas realizadas sobre diversos dispositivos de tomografía eléctrica han revelado que el dispositivo Schlumberger, junto con los Dipolo-dipolo y Polo-dipolo, da mejores resoluciones de imágenes que el resto de los dispositivos (Polo-polo, Wenner, Gradiente y Bipolo-bipolo) (Dahlin y Zhou, 2001).

## **4.2 Tomografía eléctrica 3D**

### **4.2.1. Introducción**

Debido a que las estructuras geológicas son realmente objetos 3D (Figura 4.1) y, no una simplificación de la naturaleza en 2D, cabe pensar que la aplicación de la tomografía eléctrica 3D debería ofrecer mejores resultados que una tomografía 2D. Este tipo de adquisiciones todavía no ha alcanzado el grado equivalente de desarrollo que tiene la tomografía eléctrica 2D (Marescot, 2003) siendo por ello, que ésta última se emplee aún en mayor medida. Además, una adquisición 3D demanda la adquisición y procesado de muchísimos más datos y, ello conlleva un coste y un consumo de tiempo más elevados.

No obstante, investigaciones realizadas por Dahlin y Loke (1997) y Bernstone *et al.* (2000) han demostrado como a partir de perfiles de tomografía eléctrica 2D, adyacentes entre sí o intersectándose, se es capaz de fusionar los modelos de resistividad 2D para dar lugar a casi-modelos 3D de las estructuras del subsuelo. El empleo de la tomografía eléctrica 3D ha estado muy limitado hasta hace poco por la



falta de adecuados algoritmos de inversión (Li y Oldenburg, 1992; Sasaki, 1994; Loke y Barker, 1996) y al gran consumo de tiempo necesario para poder procesar los conjuntos de datos 3D. A pesar de esto, unos cuantos estudios han mostrado el uso de esta relativamente reciente técnica para investigar el subsuelo. Dahlin y Bernstone (1997) describen una investigación con tomografía eléctrica 3D empleando un dispositivo Polo-polo sobre un vertedero de residuos. Brunner *et al.* (1999) aplicaron una tomografía eléctrica 3D para la investigación de una estructura geológica terciaria, empleando anillos concéntricos de electrodos. Chambers *et al.* (1999) y Ogilvy *et al.* (1999) describen el empleo de tomografía eléctrica 3D con dispositivo Dipolo-polo para investigar un depósito enterrado de residuos industriales. Estos pocos ejemplos demuestran que la tomografía eléctrica 3D tiene que jugar un papel cada vez más importante en la investigación de vertederos o depósitos de residuos, ya que son estructuras de origen antrópico donde existe una fuerte heterogeneidad en sus propiedades, debido a la variedad de sustancias y objetos que contienen y, a la presencia de diferentes tipos de contaminantes. Consecuentemente estos sitios son difíciles de investigar adecuadamente empleando técnicas geofísicas convencionales 2D y menos aún técnicas geofísicas 1D (Figura 4.1).

Teniendo en cuenta los resultados y las conclusiones de los anteriores trabajos, en esta Tesis Doctoral también se ha optado por aplicar la tomografía eléctrica 3D para evaluar su idoneidad en el estudio de diferentes tipos de contaminación de suelos por origen antrópico. Por ello, a continuación se describirá brevemente el procedimiento de adquisición de una tomografía eléctrica 3D y las ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos de medida que puede emplear.

#### **4.2.2. Procedimiento de adquisición 3D**

El procedimiento descrito para las adquisiciones de tomografía eléctrica 2D se mantiene válido para la tomografía eléctrica 3D. No obstante, en esta ocasión los electrodos se disponen siguiendo una malla cuadrada o rectangular (aunque esto no es totalmente una obligación). La forma y dimensiones de la malla pueden variar en función del objeto a estudiar. El espaciamiento interelectródico es idéntico según los ejes x e y del dispositivo (Figura 4.13). En tomografía eléctrica se emplea básicamente

los dispositivos Polo-polo, Dipolo-polo y Dipolo-dipolo; los otros dispositivos presentan una cobertura inferior de los datos hacia los bordes del mallado (zonas de sombras).

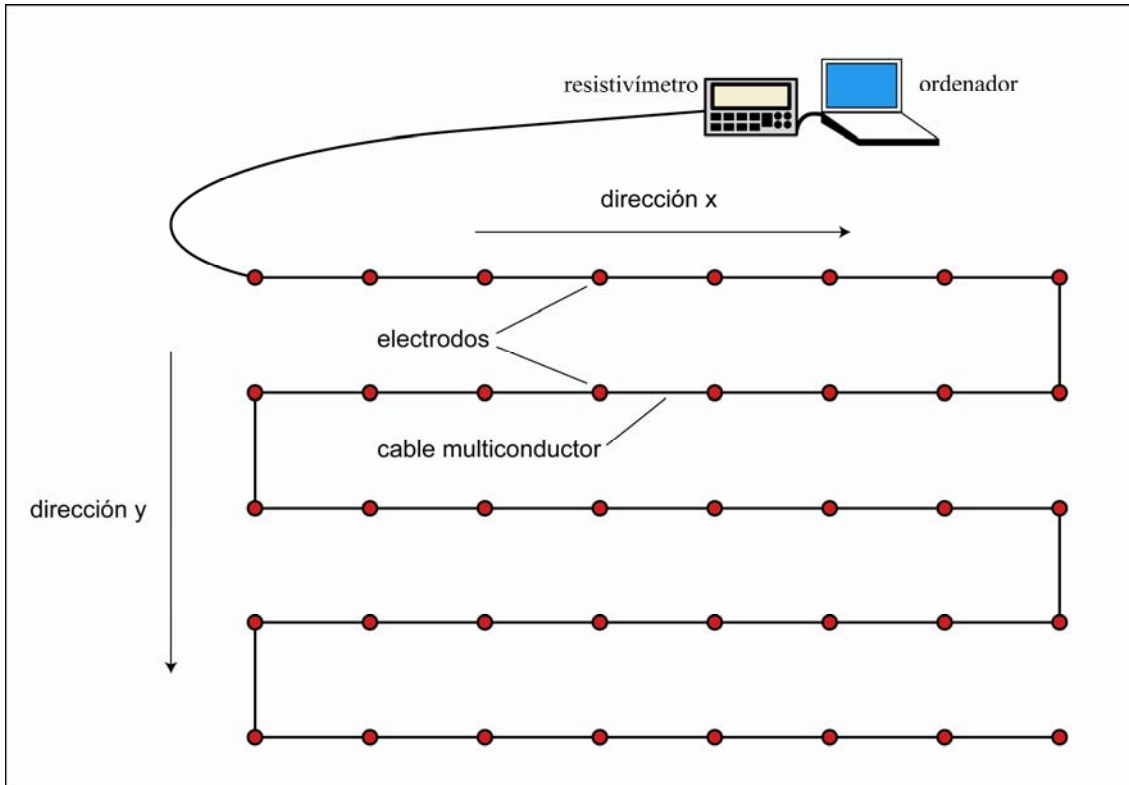


Figura 4. 13. Distribución de los electrodos para una adquisición de tomografía eléctrica 3D (Loke, 2000).

Para estudios de tomografía eléctrica 3D en los que sea necesario extenderse con el dispositivo sobre una zona amplia pero con un número limitado de electrodos se puede proceder, como indica la Figura 4.14, con el empleo de un sistema “roll-along” que permite el solapamiento entre mallados contiguos. En la Figura 4.14 se muestra que se puede realizar una primera adquisición generando una malla de 8 por 5 donde las medidas se realizan principalmente siguiendo la dirección “x”, con posibilidad de realizar medidas en direcciones diagonales. La malla es desplazada a continuación en la dirección “y” de forma que cubra la segunda mitad del área y así poder crear una malla de 8 por 10 (Figura 4.14). A continuación se inicia de nuevo la secuencia de medidas. La malla de 8 x 5 es, a continuación, orientada según la dirección “y” (Figura 4.15). Con esta forma de proceder, la profundidad de investigación alcanzada es inferior a la que se obtendría con una verdadera malla de 8 por 10, pero se pueden abordar grandes áreas sin necesidad de implantar inicialmente una gran cantidad de electrodos.

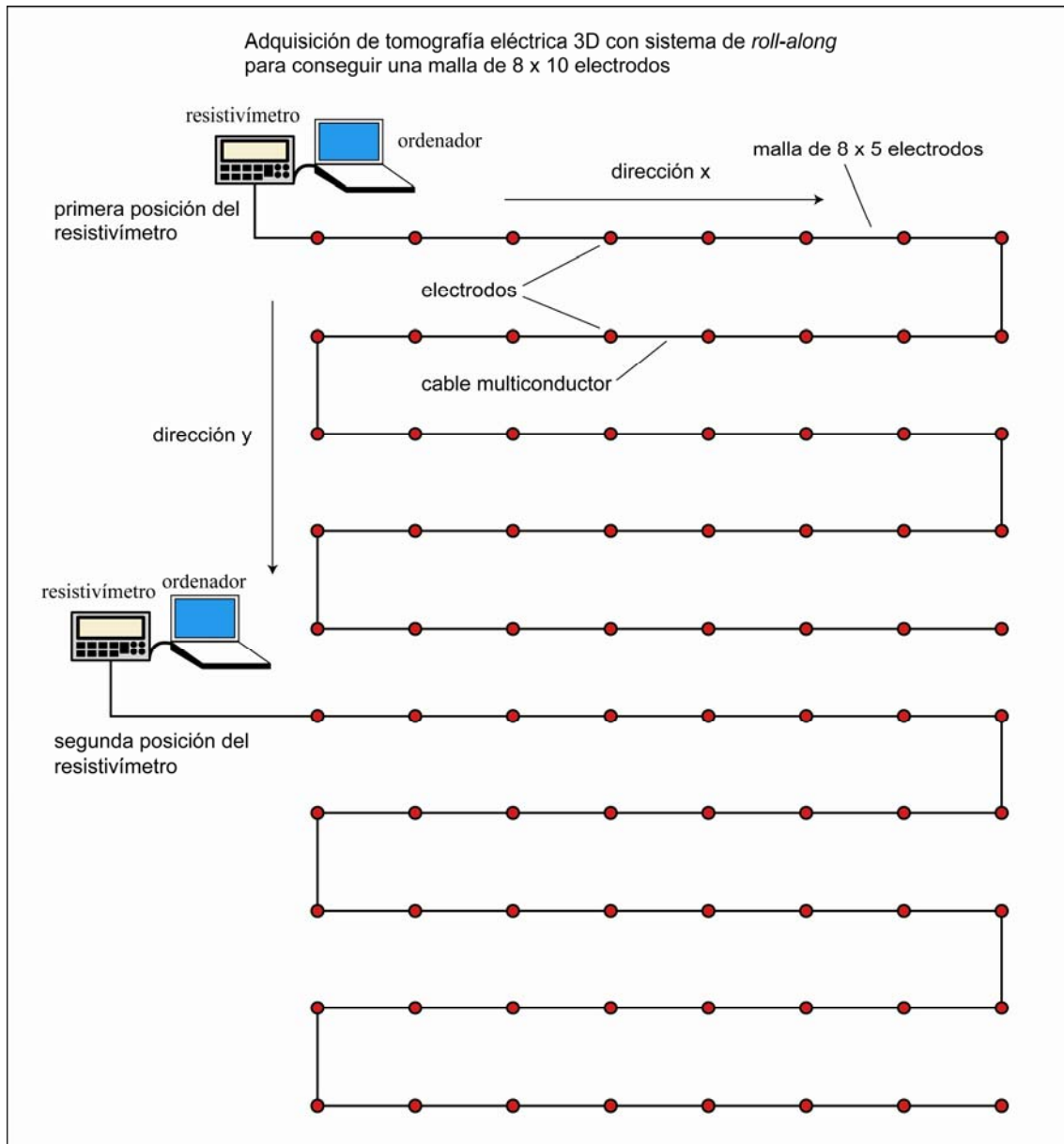


Figura 4. 14. Empleo del sistema “*roll-along*” para una malla de 8 x 5 en la dirección x (Loke, 2000).

Es también posible el hecho de obtener modelos 3D a partir de una combinación de perfiles paralelos de tomografía eléctrica 2D, cuya separación será igual al espaciamiento entre los electrodos, que posteriormente serán combinados con el programa RES3DINV de Geotomo Software (2004) para obtener un bloque 3D de resistividad (Figura 4.18). El inconveniente es que se produce una pérdida de resolución puesto que no hay posibilidad de efectuar medidas en diagonal.

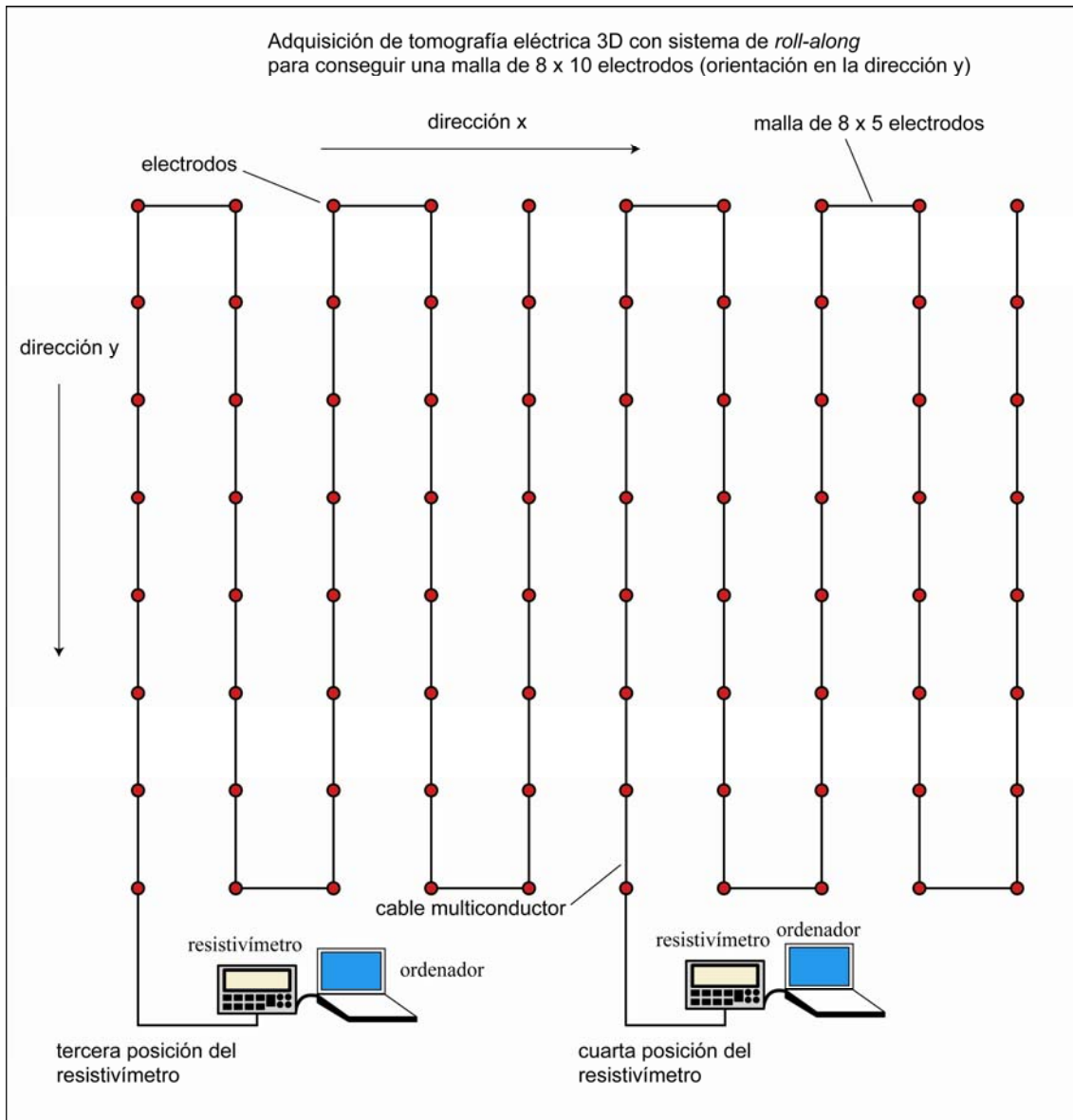


Figura 4. 15. Investigación con las líneas orientadas según la dirección y (Loke, 2000)

### **4.2.3. Ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos**

Las características de los dispositivos descritos para la tomografía eléctrica 2D (ver Apartado 4.1.4) siguen válidas para el caso de la tomografía eléctrica 3D. Únicamente es necesario realizar algunas puntualizaciones sobre las ventajas e inconvenientes de los principales dispositivos que se emplean en tomografía eléctrica 3D.

## Dispositivo Polo-polo

En el dispositivo Polo-polo, cada electrodo puede ser utilizado como electrodo de inyección de corriente o como electrodo de medida de potencial. En base al principio de reciprocidad, únicamente los electrodos que poseen una dirección numérica superior a la del electrodo de inyección serán empleados para la medida del potencial (Figura 4.16). A pesar de eso, una malla de 10 electrodos por 10 (es decir, 100 electrodos en total) tomará 4 950 puntos de medida, lo que consumirá mucho tiempo. Esto hace necesario reducir el número de puntos de medida sin disminuir la calidad de los datos. Para ello, existe un procedimiento de toma de datos denominado en inglés “*cross diagonal survey*” que es comúnmente utilizado para este objetivo (Loke, 2000). Un “*cross diagonal survey*” sólo medirá los potenciales de los electrodos situados en los ejes que pasan por el electrodo de inyección (eje x, eje y, eje a 45° que pasa por el electrodo de inyección) (Figura 4.17). Con este sistema el número de puntos de medida se reduce a una tercera parte del que se obtendría inicialmente.

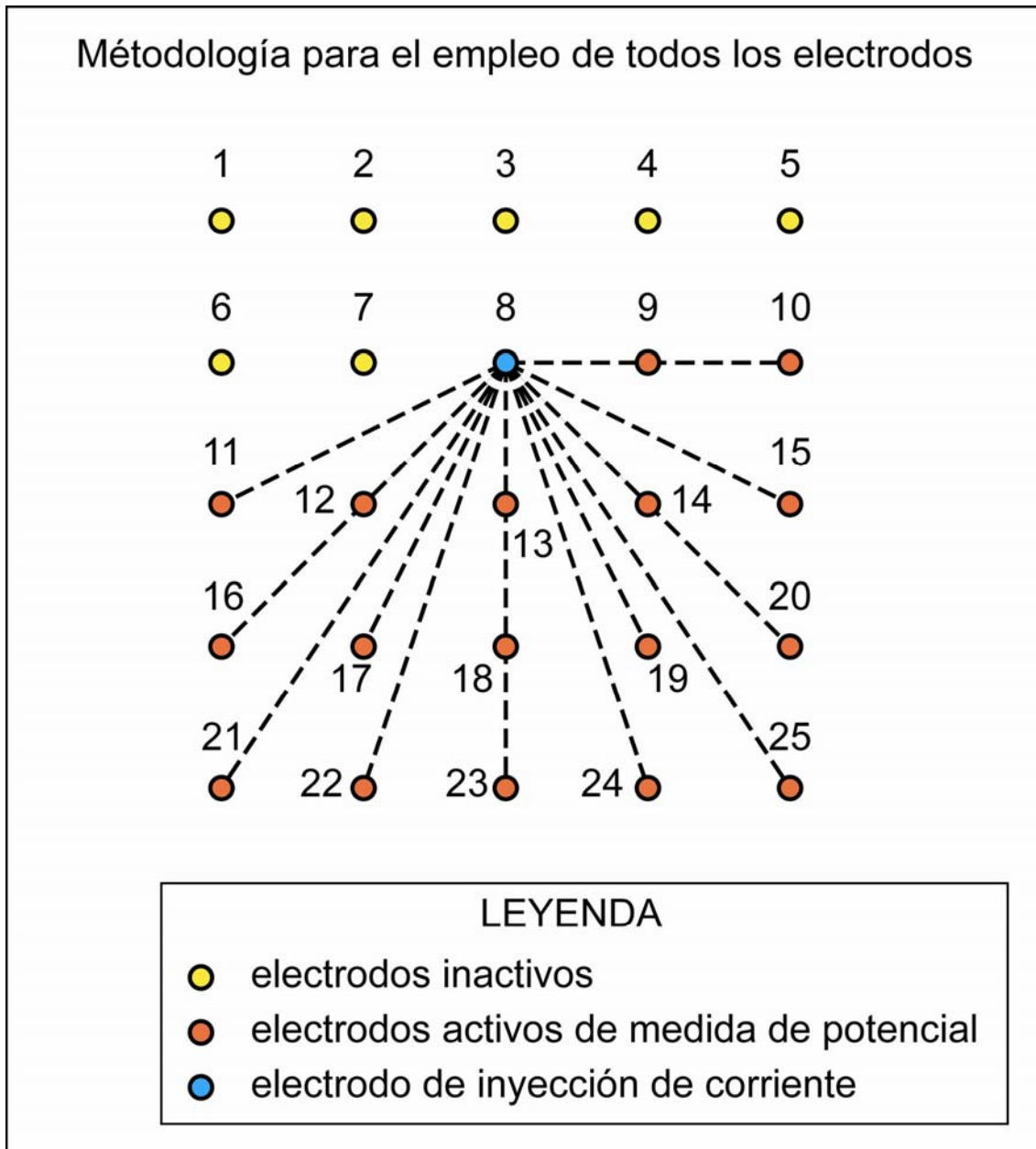


Figura 4. 16. Empleo de todos los electrodos en un dispositivo Polo-polo (Loke, 2000).

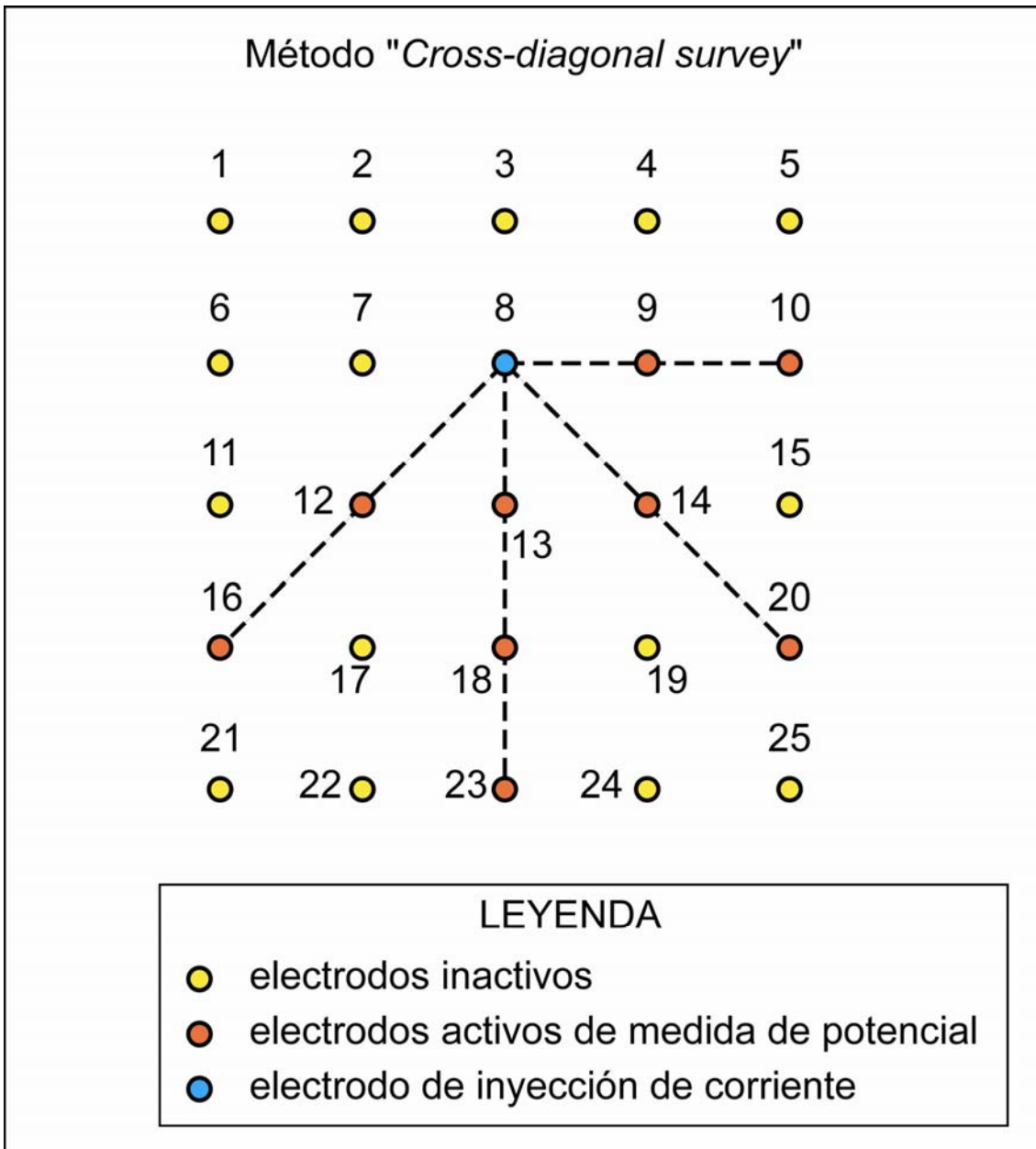


Figura 4. 17. Dispositivo Polo-polo empleando el método "cross-diagonal survey" (Loke, 2000).

Los principales inconvenientes de este dispositivo son su baja resolución y la necesidad de colocar un electrodo en el infinito.

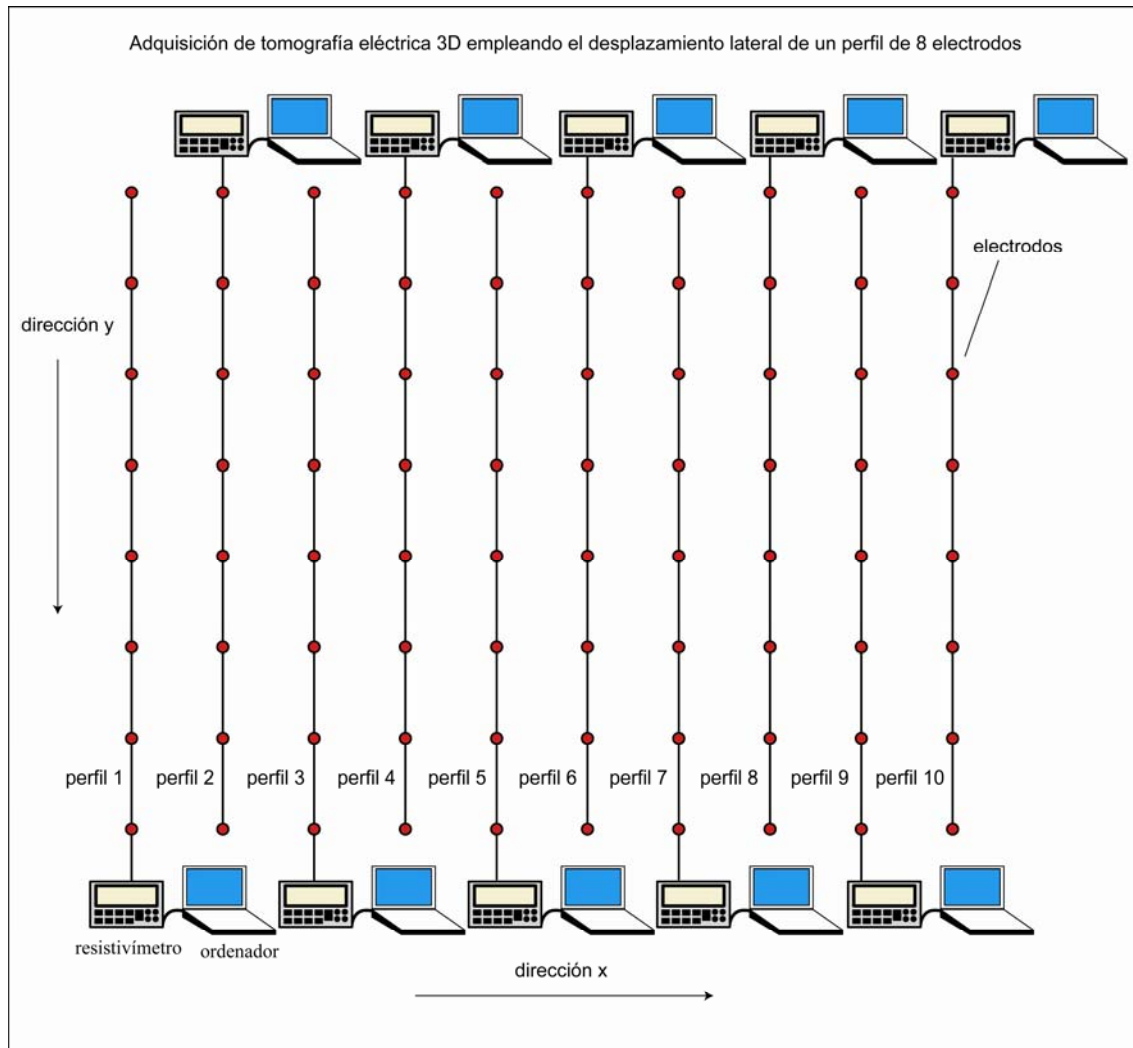


Figura 4. 18. Tomografía eléctrica 3D a través de perfiles paralelos.

## Dispositivo Polo-dipolo

Este dispositivo es una mejor alternativa que el dispositivo Polo-polo, ya que tiene una mayor resolución y además los dos electrodos de potencial están situados dentro de la malla de electrodos (menos sensible al ruido). Un dispositivo Polo-dipolo posee una fuerza de señal superior al dispositivo Dipolo-dipolo. Será necesario efectuar una adquisición directa (“*forward*”) y una adquisición inversa (“*reverse*”) con el fin de solucionar posibles problemas de asimetría. Se debe aumentar la distancia  $a$  entre los electrodos de potencial con el fin de alcanzar mayores profundidades de investigación sin una disminución importante de la fuerza de la señal para grandes valores de  $n$  ( $> 10$ ). A veces se combina un dispositivo Polo-dipolo y dispositivo Polo-polo para tener mayor densidad de puntos de medida y mejorar la resolución del modelo invertido.



## **Dispositivo Dipolo-Dipolo**

Es un dispositivo que se emplea para mallados que cubren grandes áreas ya que hay una pérdida de cobertura en los puntos de los bordes (zonas oscuras de información) y eso es un inconveniente importante cuando la malla es demasiado pequeña. Se debe incrementar la distancia “a” entre los dipolos para superar una baja fuerza de señal y además conseguir aumentar la profundidad de investigación.

## **Dispositivo Wenner-Schlumberger**

Cuando se obtiene una tomografía eléctrica 3D a través del empleo de perfiles de tomografía eléctrica 2D (Figura 4.18), un dispositivo de medida que se puede emplear es el Wenner-Schlumberger cuyas propiedades y características han sido comentadas en el Apartado 4.1.4. Este ha sido el dispositivo empleado para la tomografía eléctrica 3D realizada en esta Tesis Doctoral. El programa empleado para el procesamiento de los perfiles ha sido el RES3DINV, de Geotomo Software (2001), el cual emplea un modelo para interpretar los conjuntos de valores 3D como el mostrado en la Figura 4.19 en el cual el subsuelo es dividido en un mallado 3D compuesto por bloques a los cuales el proceso de inversión le asigna un valor de resistividad.

### **4.2.4. Conclusiones para la tomografía eléctrica 3D**

Debido que todas las estructuras geológicas son de naturaleza 3D, una investigación de tomografía eléctrica completamente en 3D, en teoría, debería dar resultados más fiables que una tomografía eléctrica 2D. Además, esa naturaleza 3D del subsuelo se hace más patente cuando existen contaminantes que se propagan por el subsuelo siguiendo trayectorias irregulares. En esta Tesis Doctoral se ha aplicado tomografía eléctrica 3D para estudiar los depósitos de estériles mineros y las balsas de almacenamiento de purín.

La aplicación de la tomografía eléctrica 3D ha sido posible gracias al desarrollo de los resistivímetros que han hecho posible la medida de grandes cantidades de puntos

en poco tiempo y la aparición de avanzados algoritmos de inversión para el tratamiento de los conjuntos de datos 3D (Loke, 2000).

En cuanto a la metodología de trabajo, se puede concluir que se considera muy correcta e indicada para abordar los objetivos perseguidos; en concreto, la tomografía eléctrica 3D se llevó a cabo a través de la ejecución de perfiles paralelos de tomografía (Figura 4.18) que posteriormente eran procesados con el programa RES3DINV de Geotomo Software (2001). El dispositivo de medida empleado fue el Wenner-Schlumberger y la separación entre electrodos fue de 5 metros para los perfiles realizados sobre los depósitos mineros y de 2,5 metros para los perfiles realizados sobre las balsas de purín. Una vez procesados los datos, éstos han sido enviados al programa SLICER DICER, de PIXOTEC, para la visualización 3D de la resistividad del subsuelo.

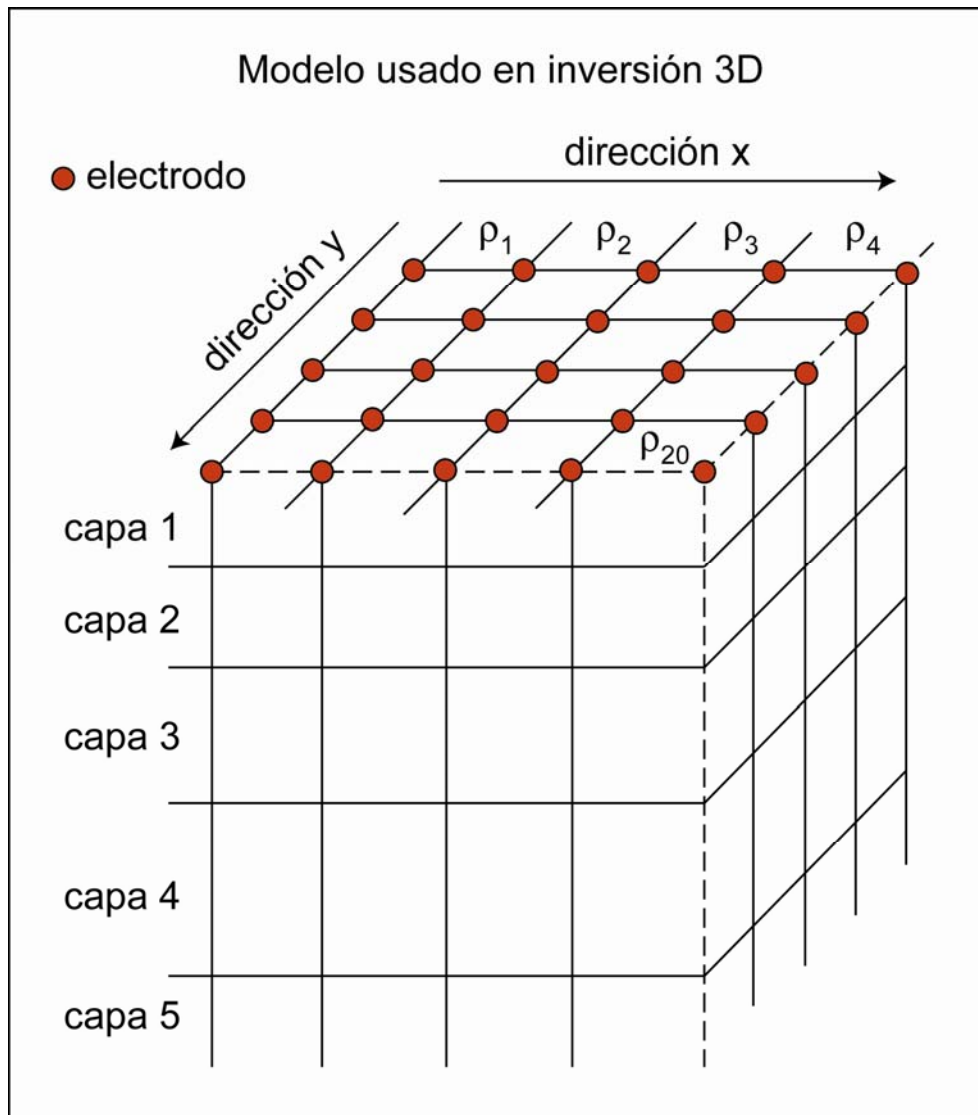


Figura 4. 19. Modelo empleado para interpretar los conjuntos de datos con el RES3DINV (Loke, 2000).

## 5 Descripción de las Zonas de Estudio

En este capítulo se va a describir las zonas de estudio, desde un punto de vista geológico, hidrogeológico, climático, biótico, histórico, etc., para tener un conocimiento preciso del medio sobre el cual se sitúan los depósitos mineros y las balsas de purines.

Una descripción geológica e hidrogeológica es importante en el contexto de esta Tesis Doctoral, pues al tratarse de una investigación sobre fuentes antrópicas de contaminación, el tipo de geología va a ser determinante en lo relativo a la migración de los fluidos contaminantes en el subsuelo y su posible afección sobre los acuíferos superficiales. La descripción de las características climáticas contextualizará las zonas y dará una visión del grado de importancia que tienen las escorrentías y los fenómenos de erosión en el arrastre y transporte de metales pesados de los depósitos mineros o del nivel de desecación que se producirá sobre las balsas de purines, minimizando la filtración de efluentes líquidos al subsuelo. La descripción del medio biótico analizará el tipo de flora que ha sido capaz de adaptarse en estos ambientes agresivos (suelos ácidos o suelos altamente salinos, etc.), creando un completo sistema biológico.



Figura 5. 1. Situación de las zonas de estudio: A, B, C y D (elaboración propia).

### **5.1 Localización geográfica**

Las zonas de estudio se ubican en el extremo sur de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Administrativamente incluyen el Término Municipal de Cartagena, el Término Municipal de La Unión, el de Fuente-Álamo y el Término Municipal de Lorca (Figura 5.1).

Concretamente el depósito de estériles mineros “El Lirio” se encuentra en el Término Municipal de Cartagena, el depósito de estériles mineros “Brunita” pertenece al Término Municipal de La Unión, mientras que las balsas de purines estudiadas se encuentran en los Términos Municipales de Fuente-Álamo y Lorca.

Puesto que los depósitos mineros y las balsas de purines son estructuras completamente diferentes tanto por sus características constructivas, como por el tipo de sustancias que almacenan y el tipo de materiales sobre el que se sitúan, todo ello ha

incidido en la forma de abordar su estudio. Por esta razón, este capítulo se ha dividido en dos bloques, uno para los depósitos mineros y otro para las balsas de purines. Para cada una de las estructuras se describirán los aspectos generales y particulares, relativos a la geología, la hidrogeología, la vegetación, la climatología, etc., con el fin de tener un conocimiento general del entorno natural de las diferentes estructuras estudiadas en esta tesis.

## 5.2 Depósitos de almacenamiento de estériles mineros

### 5.2.1 Sierra Minera Cartagena-La Unión

Los depósitos de estériles mineros se encuentran en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Esta Sierra se sitúa en el extremo suroriental de las Cordilleras Béticas que corresponden a la cadena montañosa que se extiende a través de Andalucía, Murcia y Sur de Valencia (Figura 5.2).

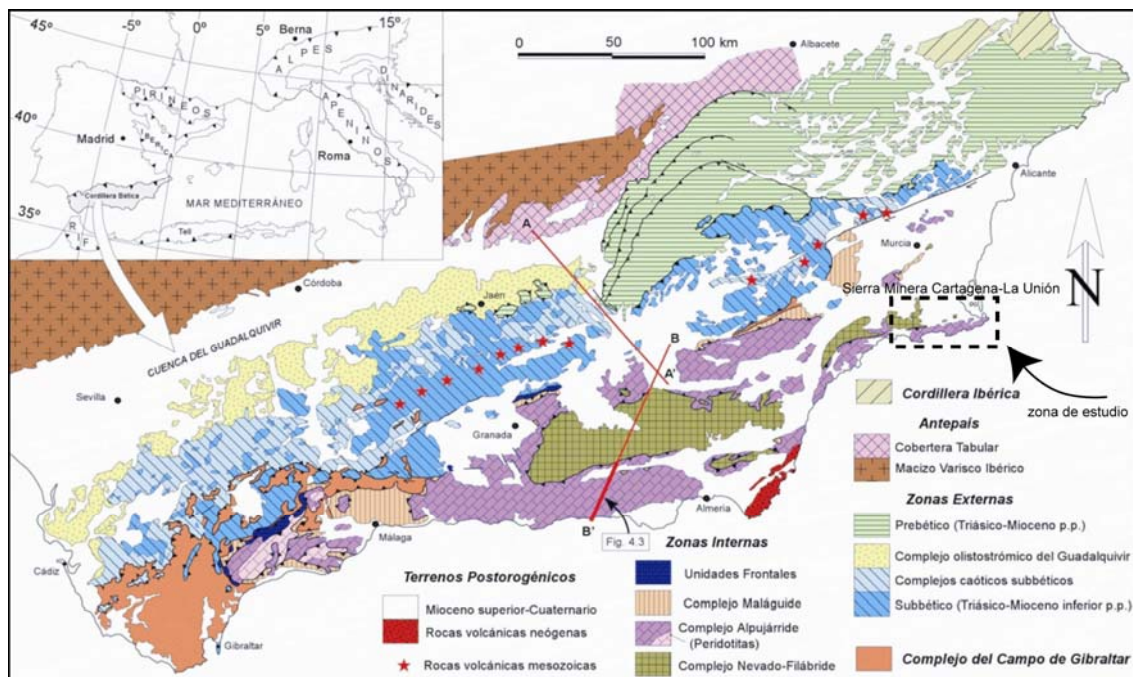


Figura 5. 2. Extensión de la Cordilleras Béticas. (Vera, 2004).

## Geología

En la Región de Murcia aparecen representadas las dos grandes unidades en las que se ha dividido esta Cordillera: las Zonas Internas (Figura 5.2), que han sufrido con mayor intensidad los efectos de la Orogenia Alpina y han desarrollado alteraciones de bajo grado de este metamorfismo, y las Zonas Externas, en las que la intensidad de las alteraciones experimentadas en su periodo de formación fue poco relevante, no superando la etapa de la diagénesis. El periodo más intenso de formación de los materiales coincide con la Fase Alpina, pero la configuración actual del territorio es consecuencia de una evolución continua en el tiempo, en la que posteriormente se formaron las grandes fosas tectónicas como la de la cuenca neógena del Campo de Cartagena. En épocas geológicas más recientes se han originado depósitos pliocuaternarios debidos a fenómenos erosivos, formándose depósitos aluviales en los valles de ríos y ramblas (Figura 5.5). También ha habido episodios de vulcanismo geogénico (Figura 5.6).

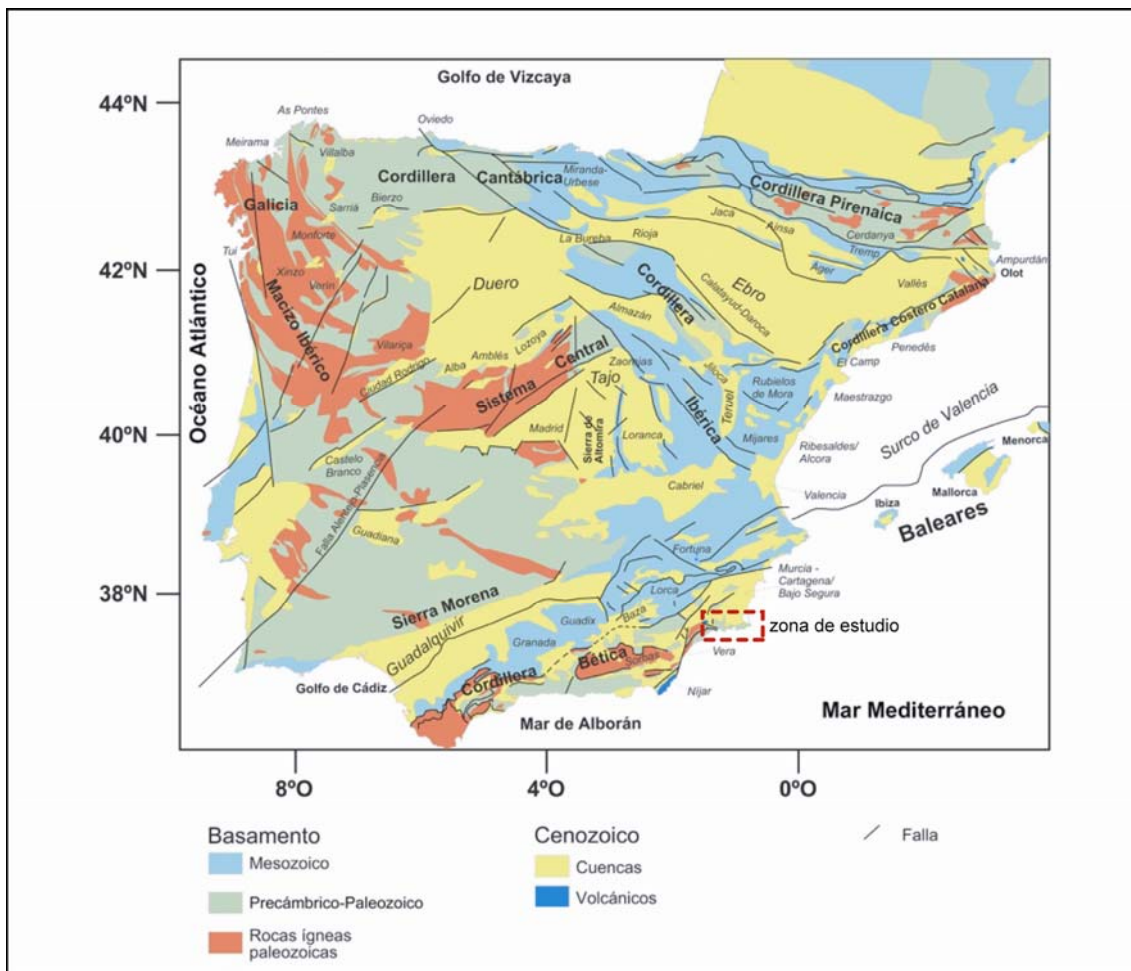


Figura 5. 3. Basamento de la Sierra Minera Cartagena-La Unión (Vera, 2004).

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión pertenece al dominio geológico de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Figura 5.4), concretamente a la Zona Bética, que se caracteriza por estar constituida por una serie de secuencias metamórficas superpuestas por diversos mantos de cabalgamiento originados durante la Orogenia Alpina, afectados de un metamorfismo decreciente de abajo a arriba, que de acuerdo a su intensidad se divide en tres complejos: Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide, aunque en la Sierra Minera sólo están representados los dos primeros (Conesa, 2005).

El Complejo Nevado-Filábride es el más profundo del edificio interno y lo forman series paleozoicas (Figura 5.3; Figura 5.5) y triásicas de gran potencia de materiales metamórficos de micaesquistos grafitosos, gneises con turmalina, etc.

El Complejo Alpujárride lo forman materiales paleozoicos y triásicos que han sido sometidos a un metamorfismo de intensidad variable. Destacan los esquistos, cuarcitas, filitas y, principalmente, calizas y dolomías, presentándose con frecuencia las intrusiones de diabasas. Estos materiales conforman las alineaciones montañosas litorales del Sur de la Región de Murcia, que van desde La Unión hasta Águilas. La formación carbonatada representa uno de los litotipos más importantes de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión.

Todos estos complejos se estructuran a modo de mantos apilados, los cuales sufrieron una importante erosión durante el Terciario, para ser posteriormente recubiertos por una formación margosa-detrítica del Mioceno. Tras el Mioceno, se produjo una fase de fracturación seguida de fenómenos volcánicos y una fase preactual de desmantelamiento erosivo.

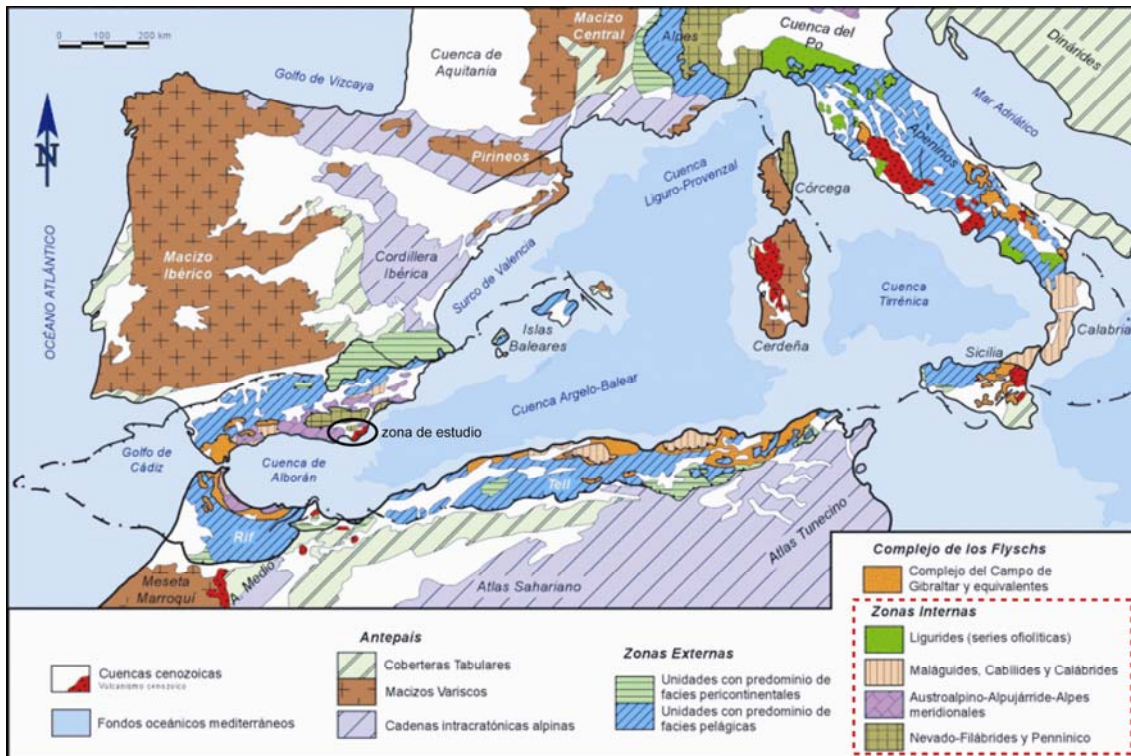


Figura 5. 4. Extensión de las Zonas Internas (Vera, 2004).

Debido a que los dos depósitos de estériles mineros estudiados se encuadran en este marco geológico de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión se va a realizar una descripción algo más detallada de estos Complejos.

**Complejo Nevado-Filábride.** Lo forman rocas metamórficas, en las que se distingue un zócalo de edad Paleozoica, o de más antigüedad, y una cobertera triásica, presentando una estructura interna en mantos de corrimiento (Ovejero *et al.*, 1976). En el Complejo Nevado-Filábride se distinguen varias formaciones superpuestas, que de muro a techo son:

Nevado-Filábride Inferior (Paleozoico). Es la formación más profunda de la Sierra Minera, con un espesor que puede superar los 500 metros. Representa el “muro” y está constituida por sucesiones de gran potencia de micaesquistos grafitosos, esquistos y cuarcitas (Manteca y Ovejero, 1992). Debido a la gran cantidad de grafito que contienen, el color predominante de estos materiales suele ser el color negro o gris oscuro, aunque a veces, debido a la presencia de óxido de hierro, presentan un tono pardo rojizo. Se concentran en plano de esquistosidad y en las fracturas de las rocas.



Nevado-Filábride Superior (Permo-Triásico). Con una potencia que no supera los 100 metros, representa una gran variedad litológica. Esta formación la constituyen micaesquistos de colores blanco, verdoso o plateado, cuarcitas, rocas verdes de anfibolitas, metabasitas y esquistos cloríticos a menudo con albita, yesos y, en la parte superior, mármoles calcíticos y dolomíticos muy cristalizados, a veces fajeados en colores gris y blanco, a veces amarillentos, sobre los que se sitúan esquistos claros, micáceos y cuarcitas (Manteca y Ovejero, 1992). La litografía es muy compleja: sedimentos arcillosos, materiales subvolcánicos y rocas carbonatadas sufrieron un metamorfismo progresivo y retrógrado (rocas ígneas) que ocasionó una gama de rocas metamórficas muy variadas. Es denominado “Segundo Manto”, y contenido en este Nevado-Filábride Superior, ha sido extraído en las cortas mineras de Brunita, Gloria, Gloria Este, San José, San Valentín, Tomasa, Navidad, Emilia y Los Blancos. También está presente en otras minas de la zona sur: Las Lajas, El Descargador, Tábano, Pajarillos, Rosa, La Linterna, Cabezo Rajao, etc.

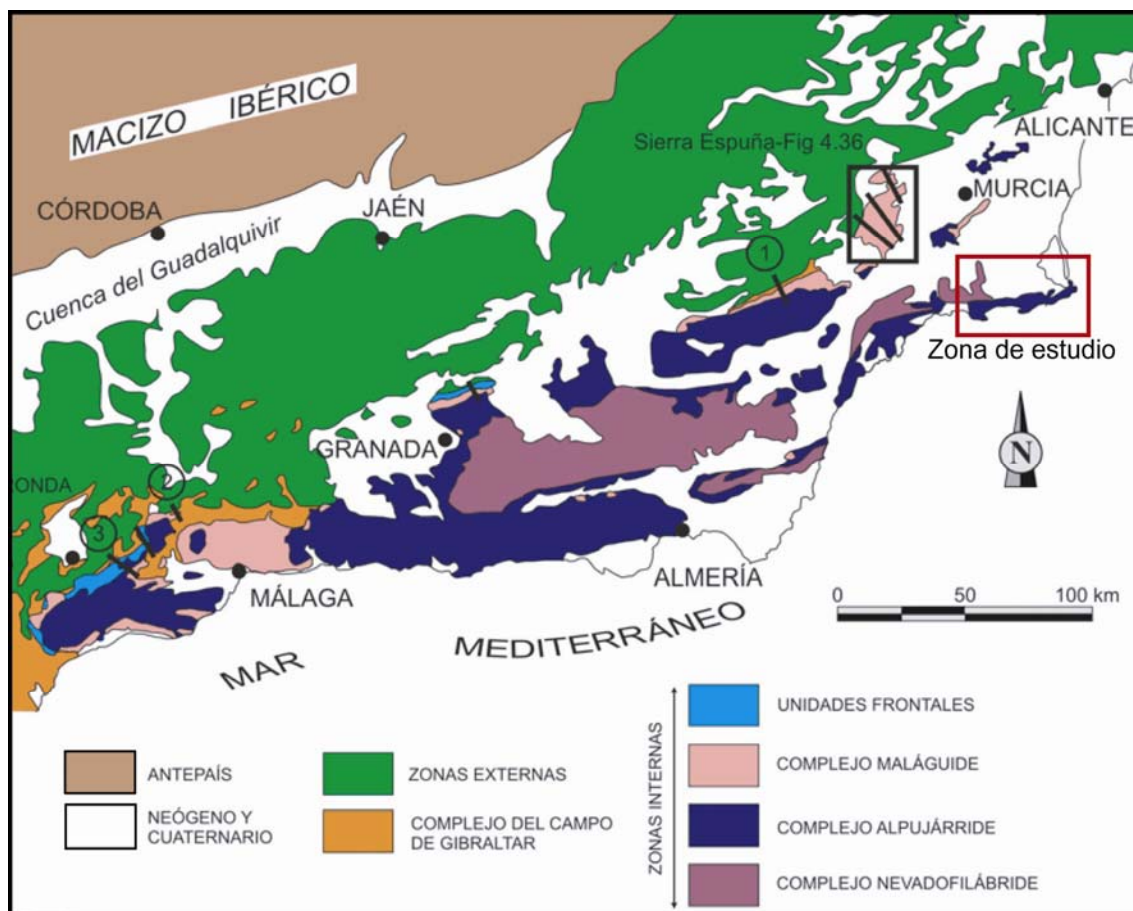


Figura 5. 5. Principales Complejos en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. (Vera, 2004).

**Complejo Alpujárride.** Se encuentra cabalgando sobre el Nevado-Filábride y está constituido, a su vez, por varios mantos de cabalgamiento superpuestos. Lo forma un zócalo pretriásico integrado por rocas metamórficas intensamente recrystalizadas durante la Orogenia Alpina y afectadas por un metamorfismo prealpino, cuyas trazas tienen poca entidad. La cobertera la constituyen rocas carbonatadas, con una cristalización variable provocada por el metamorfismo alpino dependiendo de las unidades y de los sectores, de edad triásica y de facies alpinas, depositándose en una extensa plataforma carbonatada de poca profundidad. Se distinguen tres grupos de mantos en este Conjunto Alpujárride: inferiores, intermedios y superiores. El entorno de la zona de estudio se puede englobar en el grupo de los alpujárrides inferiores, donde se distinguen tres unidades o mantos de cabalgamiento superpuestos (Fundación Sierra Minera, 2001)

Unidad de San Ginés o Emilia. Presenta una potencia de entre 60 y 80 metros, con una base de filitas de tonos azulados o violáceos, con pequeñas intercalaciones de areniscas y cuarcitas de color claro y grisáceo. Sobre esta secuencia se encuentra un paquete carbonatado de 225 metros de potencia perteneciente al Trías Medio y Superior y que contiene, de muro a techo, los siguientes materiales: calizas recrystalizadas de tonos amarillentos o gris pálido con abundantes *sills* y diques de rocas verdes intraformacionales, denominadas “doleritas”, calizas tableadas localmente masivas, separadas por lechos arcillosos amarillentos en pequeños bancos centimétricos, con algunas intercalaciones de *sills* y diques de rocas verdes y un paquete dolomítico grisáceo. Esta Unidad está depositada en el eje de la Sierra Minera y contiene hacia la base del paquete carbonatado importantes mineralizaciones estratiformes denominadas “Primer Manto”, que han sido explotadas en las cortas Emilia, San Valentín, Tomasa y Brunita. También está presente en el grupo de minas de La Unión, Buen Consejo, Julio César, etc.

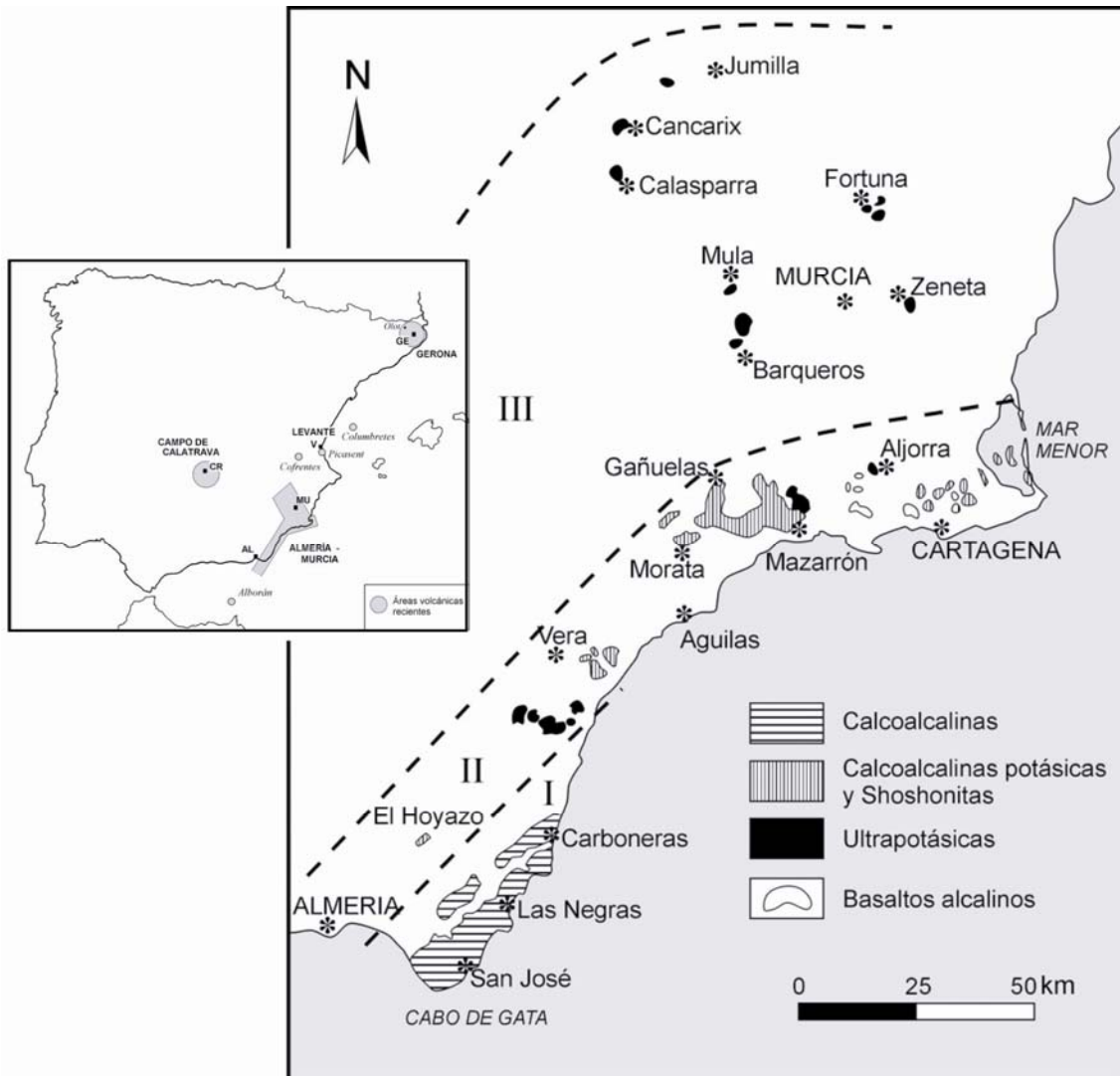


Figura 5. 6. Fenómenos de volcanismo reciente en la Región de Murcia (Vera, 2004).

Unidad de Portmán. De espesor variable, puede alcanzar los 100 metros y esta compuesta por materiales similares a los de la Unidad anterior, apareciendo superpuesta a ella excepto en otros sectores de la Sierra. La base está formada por filitas de tonos rojos violáceos con intercalaciones de cuarcitas y algunos lentejones de yesos. También se pueden presentar algún episodio de materiales carbonatados de pequeño espesor y desarrollo y, eventualmente, algunos conglomerados. Sobre esta secuencia se encuentra un paquete carbonatado, con dolomías beige, grises o negras, masivas o en brechas, que pueden contener algún nivel de margas. Al igual que en la Unidad anterior, esta secuencia carbonatada es atribuible al Trías Medio y Superior. En dirección Oeste se hace significativa una mayor proporción de calizas de grano fino con niveles de calizas margosas intensamente replegadas. A esta Unidad pertenecen las mineralizaciones que

han sido explotadas en las inmediaciones de El Cabezó Rajao. Estas mineralizaciones no han sido intersectadas por fenómenos de volcanismo (Manteca y Ovejero, 1992).

Unidad de El Gorguel. Presenta una base permotriásica de perlitás y areniscas cuarcíticas violáceas, azuladas o blanquecinas. Sobre ella aparece una serie triásica calizo-dolomítica de tonos grises, fuertemente tectonizada. Esta serie tiene poca representación en la zona de estudio, quedando reducida a pequeños *klippes* (fragmentos de mantos de corrimiento que han quedado aislados por erosión) (Ovejero *et al.*, 1976).

**Neógeno.** A continuación de las principales fases de la Orogenia Alpina (anteriormente descritas) se desarrollan en la zona una serie de cuencas restringidas durante el Neógeno. Una de las más importantes es el Campo de Cartagena, a la cual pertenecen los materiales del borde norte de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 5.5). Teniéndolo en cuenta en su totalidad, el Campo de Cartagena constituye una importante depresión postectónica en la que se conserva un fuerte relleno Neógeno (Terciario) de más de 1 000 metros de potencia, predominando las margas, con intercalaciones de conglomerados en el Tortoniense (Mioceno Superior), calcarenitas en el Andaluciense y areniscas en el Plioceno (Terciario). De edad miocena son las rocas subvolcánicas calcoalcalinas (andesitas, riolitas, etc.) y extrusivas (basaltos) de la zona norte de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 5.6). Asociadas a este magmatismo se hallan importantes mineralizaciones como las de El Cabezó Rajao. En el resto de la Sierra Minera este magmatismo geogénico sólo se presenta como diseminaciones muy residuales. Se trata de una serie margosa detrítica de carácter transgresivo, que recubre de manera discordante a los materiales de las fases que se han descrito anteriormente, y que no fue afectada por el metamorfismo Alpino. Se sitúa indistintamente sobre las diferentes unidades de las Zonas Internas. La base de la serie la forman unos conglomerados poligénicos fuertemente cementados, discontinuos y de reducido espesor, en torno a unos 20 metros, para a continuación presentarse sobre ellos una secuencia de margas, lutitas y areniscas finas, con intercalaciones muy poco persistentes de capas decimétricas de conglomerados; esta secuencia desaparece según se avanza hacia el techo de la Unidad y posee una potencia de unos 200 metros. Sobre estas alternancias se deposita una secuencia margosa del Mioceno Superior que finaliza con areniscas. En la Sierra de Cartagena-La Unión, el interés del Neógeno radica en las mineralizaciones que encierra, ya que aparecen diseminadas en el interior de las

diferentes litologías, existiendo una mayor concentración al aumentar la granulometría de los materiales. En los niveles de los conglomerados es típico el reemplazamiento de los cantos calizos por sulfuros, que adoptan el aspecto de falsos cantos, conocidos como “almendralón” en el argot minero local.

**Cuaternario.** Lo forman depósitos variados, principalmente coluviones, abanicos aluviales y glaciares, desarrollados al pie de relieves y llanuras, así como sedimentos fluviales ubicados en los márgenes de los principales cauces, constituidos por cantos, gravas, arenas, limos y arcillas. Estos depósitos se extienden al norte del Municipio de La Unión (Conesa, 2005).

Considerando el magmatismo de la Sierra de Cartagena-La Unión, hay que diferenciar entre un magmatismo preorogénico, asignado a un estadio geológico tarditriásico o jurásico, y otro postorogénico de edad neógena.

El primer magmatismo es de carácter básico, estando representado por las doleritas de la Unidad de San Ginés, así como las metabasitas del Nevado Filábride Superior. Las doleritas aparecen como cuerpos intrusivos subconcordantes (sills) y en otros casos como diques, situándose principalmente en la base del paquete carbonatado. Las metabasitas aparecen como cuerpos concordantes en el Nevado Filábride Superior, sin ninguna identificación efusiva o intrusiva.

El segundo magmatismo está representado por rocas subvolcánicas calcoalcalinas (andesitas, riolitas, etc.) y por rocas extrusivas (basaltos). Estas vulcanitas afloran principalmente en la llanura al norte de la sierra, donde constituyen relieves diferenciales o “Cabezos”, alineados según un eje mayor N-70°. En la vertiente norte de la Sierra, al Oeste y Sur de la Unión, se presentan diversos diques y domos, localmente unidos a “brecha pipes”, orientados según la dirección estructural N-130°, intersectando todos los niveles lito-estructurales, incluido el Mioceno. En estas zonas, las dacitas y andesitas están fuertemente afectadas por alteración hidrotermal (Manteca y Ovejero, 1992).

En cuanto a la tectónica, los materiales del Nevado Filábride presentan dos fases de deformación: la primera dio lugar a un plegamiento isoclinal tumbado acompañado

de esquistosidad de flujo con frecuentes transposiciones tectónicas, presentando una dirección comprendida entre N-70° y N-120°. La segunda fase, en cambio, de dirección norteada y vergencia oeste, originó pliegues isoclinales ocasionales y una crenulización de la esquistosidad. Ambas deformaciones serían Alpinas. Los materiales Alpujárrides presentan un plegamiento diferencial, muy intenso en las filitas, y más suave en los materiales carbonatados. Estos materiales también han sido afectados por dos fases diferentes de deformación superpuestas, una de dirección N-100-120° y otra posterior N-20-40°. Esta última es posterior al emplazamiento principal de los mantos, habiendo dado lugar a escamas y estructuras cabalgantes menores, implicando incluso al Mioceno.

Tras el proceso de emplazamiento de los mantos, comprendido entre el Eoceno y el Mioceno Medio, se dio una fase de distensión con formación de los sistemas de fallas NNW-SSE y NE-SW. Estas fallas tuvieron una importante reactivación tras el periodo miocénico medio que dio lugar a la actual configuración de la Sierra y su disposición en *horsts* y fosas tectónicas. Este sistema de fracturación fue aprovechado como vías de salida para el magmatismo Neógeno.

Respecto a la tipología de los yacimientos de la Sierra Minera, éstos se pueden clasificar según sus características morfológicas y genéticas en (Manteca y Ovejero, 1992):

- Mantos.
- Diseminaciones en materiales miocénicos.
- Estructuras de tipo filonianas.
- *Stockworks*, pequeños filones y reticulaciones.
- Depósitos tipo *gossan*.

Atendiendo a su importancia, desde un punto de vista de explotación económica, los primeros adquieren mayor relevancia. Los mantos son cuerpos estratiformes que han reemplazado a los materiales carbonatados en los que se encajan. Según su posición estratigráfica se distingue el manto superior (Primer Manto), situado en la base del paquete carbonatado del Alpujárride Inferior, y el manto inferior (Segundo Manto), situado en el nivel de mármoles del Nevado-Filábride Superior. Estos mantos también se clasifican atendiendo a sus asociaciones minerales, las cuales se presentan de forma

indistinta tanto en el Primer Manto como en el Segundo Manto y que caracterizan el tipo de sustancias que se han beneficiado a lo largo de su explotación minera y el tipo de depósitos mineros que han generado, siendo estos (Sáinz de Baranda Graf, 1996):

Manto piritoso. Representa a una asociación de clorita-sulfuros-carbonatos-sílice. Como sulfuros principales aparecen pirita ( $S_2Fe$ ), blenda ( $SZn$ ), galena ( $SPb$ ), marcasita ( $FeS_2$ ) y pirrotina ( $Fe_{1-x}S$ ), y como accesorios aparecen, calcopirita ( $CuFeS_2$ ), arsenopirita ( $FeAsS$ ), tetraedrita ( $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$ ) y estannina. Aparece representado en el Segundo Manto de las explotaciones de Los Blancos, Brunita, Gloria Este, Pablo y Virginia y en el Primer Manto de las explotaciones mineras de Buen Consejo, Julio César y Eloy.

Manto de silicatos o de magnetita. Representa a una asociación de greenlita-magnetita-sulfuros-carbonatos-sílice, con galena, blenda, pirita, marcasita y calcopirita como sulfuros principales dispersos en la matriz silicatada, con tetraedrita y estannina accesorios. Está representado en el Primer y Segundo Manto de la explotación Emilia-San Valentín-Tomasa y en el Segundo Manto de San José, Gloria y Juanito.

Los cuerpos de estructura filoniana con mineralizaciones de pirita-galena-blenda se desarrollaron a favor de un sistema de fallas de dirección N-130°-E, que se extiende al sur de la zona de los mantos, encajado de forma preferencial en los niveles carbonatados del Complejo Nevado-Filábride (El Gorguel, Peña del Águila, mina “Rosa”, mina “Secretaria”, mina “La Loba”, etc.) y del Complejo Alpujárride (El Gorguel, Peña del Águila, San Ginés).

Entre las principales mineralizaciones que se han originado en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión destacan la galena argentífera, la blenda, la cerusita, la casiterita y los óxidos de hierro. Entre los principales compuestos que aparecen se pueden señalar los siguientes (Calvo, 1996):

- Carbonatos de plomo, zinc, cobre, calcio y magnesio (aragonito ( $CO_3Ca$ ), ankerita ( $Ca(Fe^{+2},Mg,Mn)(CO_3)_2$ ), cerusita ( $CO_3Pb$ ), dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ), siderita ( $CO_3Fe^{+2}$ ), smithsonita ( $CO_3Zn$ ), rodocrosita ( $CO_3Mn$ ), etc.).

- Sulfuros de hierro, zinc, plata, plomo, cobre, níquel, antimonio y arsénico (blenda (SZn), galena (SPb), pirita ( $S_2Fe$ ), calcopirita ( $S_2CuFe$ ), greenockita hawleyita (SCd), marcasita ( $S_2Fe$ ), etc.).
- Óxidos de hierro, plomo, estaño, aluminio y manganeso (magnetita ( $Fe^{+2}Fe_2^{+3}O_4$ ), pirolusita ( $MnO_2$ ), cuprita ( $CuO_2$ ), casiteria ( $SnO_2$ ), brookita ( $TiO_2$ ), anatasa ( $TiO_2$ ), etc.).
- Sulfatos de plomo, zinc y calcio (baritina ( $BaSO_4$ ), anglesita ( $PbSO_4$ ), celestina ( $SrSO_4$ ), etc.).
- Silicatos de hierro, aluminio, zinc y calcio (cuarzo ( $SiO_2$ ), olivinos ( $Mg_2SiO_4$ ), Berilo ( $Be_3Al_2(SiO_3)_6$ ), greenalita ( $Fe^{+2},Fe^{+3}$ ) $_2$ - $_3Si_2O_5(OH)_4$ ), etc.).
- Fosfatos de calcio, hierro, etc. (ludlamita ( $Fe^{+2},Mg,Mn$ ) $_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ ), mimetita ( $Pb_5(As-PO_4)_3Cl$ ), vivanita ( $Fe_3^{+2}(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ ), etc.).

## **Relieve**

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión forma casi una alineación paralela al Mar Mediterráneo. Se clasifica como una sierra litoral que limita al Norte con la depresión del Campo de Cartagena y al Sur con el Mar Mediterráneo.

El límite norte de esta sierra presenta una región relativamente llana cuya horizontalidad sólo está interrumpida por una serie de lomas amesetadas y por varios cabezos: Ventura (150 m), Roche (157 m), La Atalaya (146 m), Beaza (158 m), etc. Estos cabezos sobresalen de unos llanos que presentan una altitud media de 70 m, y que descienden suavemente por debajo de 50 metros hacia el noroeste y noreste, hasta alcanzar el nivel del mar en el Mar Menor y el Mediterráneo.

En la parte sur, y siguiendo la alineación este-oeste, se encuentran enlazados, geológicamente y geográficamente con la llanura del Campo de Cartagena, los valles intermontanos por donde discurren la carretera de Alumbres a Escombreras (Valle de Escombreras) y la carretera que va hacia Portmán pasando por El Gorguel. Este último se encuentra más elevado, a la misma altitud de 60-70 metros, que las cercanías del Cabezo Rajao. El valle de Escombreras se encuentra limitado por dos cadenas montañosas: al Norte se encuentra Sierra Gorda, con el Cabezo de la Porpuz con 306 m



como cota más sobresaliente, mientras que al sur, y constituyendo la línea costera, se encuentra la Sierra de la Fausilla y los Picos de Barrionuevo, con los 364 m de Morra Alta, que se extienden hacia el este conectando con la zona de El Gorguel (Conesa, 2005).

Más al este, la línea montañosa costera se ve interrumpida por la Playa del Gorguel y, sobre todo, por la Bahía de Portmán (situada entre Punta de la Galera y Punta Negra) y la zona de las Salinas de Calblanque, hasta llegar a Cabo de Palos, que podría ser considerado como el extremo occidental de la Sierra. Esta zona presenta unos relieves muy abruptos y unos desniveles bastante elevados sobre todo en la costa, suavizándose posteriormente en el interior. De aquí podríamos resaltar como picos más destacados: el Monte de las Cenizas, con 307 m, al Este de Portmán, y el Cabezo de la Fuente, con 336 m, ya en la zona de Los Belones.

Ocupa todo el centro del territorio una región montañosa cuyos relieves dependen enormemente de la litología y de la estructura. Los montes son menos abruptos y se van elevando paulatinamente hasta alcanzar los 389 m de la Peña del Águila o los 391 m de Sancti Spiritu, al Norte de Portman, y “techo” de la Sierra Minera.

## **Climatología**

Para entender la vegetación de un territorio hay que analizar los factores climáticos existentes en él. Las características climáticas de la Región de Murcia, y por lo tanto las de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, están determinadas en primer término por su situación geográfica en el levante peninsular. Consecuencias de esta situación son la proximidad al anticiclón de las Azores, responsable de la pertinaz sequía estival, la escasa nubosidad y el elevado índice de radiación; también la caracterizan la alternancia en los flujos de aire subtropical marítimo y continental sahariano y la proximidad al Mediterráneo que, tras calentarse durante el verano, origina la formación de importantes masas de aire húmedo. Estos embolsamientos húmedos son capaces de causar importantes lluvias torrenciales cuando se encuentran con frentes

fríos que han alcanzado latitudes meridionales gracias a la debilitación del anticiclón de las Azores (Alcaraz *et al.*, 1999).

El análisis de las características térmicas y pluviométricas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión pone de manifiesto la gran irregularidad de su régimen pluviométrico, caracterizado por el máximo otoñal de precipitaciones y la sequía estival.

El régimen térmico va a corresponder al efecto conjunto de las temperaturas del litoral, propias de una región mediterránea, y de las temperaturas desérticas subtropicales, que determinan un verano largo y cálido, un invierno corto y fresco y una primavera y un otoño moderados. Las temperaturas son suavizadas por la proximidad al mar, dando lugar a inviernos más suaves y sin la presencia de heladas. La temperatura media anual de esta zona es de unos 17,5 °C, con una importante amplitud térmica de unos 15,2 °C (Conesa, 2005). La variación de las temperaturas medias va a moverse entre las temperaturas máximas y mínimas del mes de agosto y del mes de enero con 25, 9 °C y 10,7 °C respectivamente. Ligados, por lo general, a los vientos tropicales continentales se producen valores extremos absolutos en torno a los 40 °C.

Esta zona, está clasificada, según su índice de termicidad, *It*, (que es el valor de la suma en décimas de grado de la temperatura anual, la media de las máximas del mes frío y la media de las mínimas de dicho mes), como Termomediterráneo Inferior con valores de *It* superiores a 400 (Alcaraz *et al.*, 1999).

De acuerdo a las precipitaciones, la Sierra Minera de Cartagena-La Unión pertenece a un ombrótipo de tipo semiárido, con una distribución de precipitaciones muy irregular, tanto espacial como temporal, cuya media anual es inferior a los 500 mm (Conesa, 2005). Las características y distribución de las precipitaciones para esta zona son las propias del sureste de la Península Ibérica, con un máximo en otoño y un mínimo en verano. Los valores de las precipitaciones son muy irregulares y sufren una gran dispersión, con valores totales anuales que oscilan entre los 270 y 324 mm de media, y unos promedios por estaciones de: otoño, 117 mm; invierno, 83 mm; primavera, 62 mm y verano, 31 mm al año. Para el periodo 1920-1991, la precipitación media fue de 304 mm, con un máximo de 423 mm (1969-70) y un mínimo de 113 mm (1968-69). El máximo medio anual se da en octubre (63,1 mm) y el mínimo medio

anual en julio (1,7 mm). Las precipitaciones se suelen concentrar en unos pocos días (20-30 días al año), y dentro de ellos, suelen ser de carácter torrencial (Fundación Sierra Minera, 2001); esto último tiene una gran importancia en esta zona debido a que interviene en los procesos de erosión y modelado del relieve.

En la Sierra de Cartagena-La Unión, el fenómeno físico de la evapotranspiración (ET) es significativo debido a la escasez de precipitaciones, su carácter torrencial y a las altas temperaturas. Esta importante evapotranspiración da lugar a una importante pérdida de agua en el suelo. Sin embargo, debido a que la humedad del aire es elevada, con valores máximos en verano motivados por los vientos de levante, se va a paliar la escasez de lluvias por la formación de nieblas y criptoprecipitaciones. Estos factores reducen la evapotranspiración y generan un relativo aporte extraordinario de agua para el suelo y las plantas, lo que convierte al núcleo norte y central de la Sierra Minera en la zona más húmeda de todo el litoral murciano y Campo de Cartagena, con precipitaciones totales (lluvia + criptoprecipitaciones) que pueden ser superiores a los 350 mm anuales, tal y como parece indicar la presencia de especies vegetales propias de zonas más húmedas (Fundación Sierra Minera, 2001).

El viento es un fenómeno atmosférico casi constante en el litoral. Los vientos más importantes son: el Levante, húmedo y cuya mayor frecuencia se da en verano, el cual es de dirección noroeste a suroeste y es responsable de las lluvias del sudeste de la Península; el Lebeche, de sur a sur-suroeste, es el responsable de las olas de calor estivales; el Jaloque, es cálido y procede del sureste; y el Terral o Maestral, es frío y del noroeste.

En primavera los vientos dominantes son los del primer cuadrante (ENE), que con relativa frecuencia alcanzan valores entre 39 y 46 km/h; incluso, en el mes de junio, ocasionalmente llegan a los 55 km/h. En verano los que predominan son del Este (E) y ENE, con rachas de 37 a 46 km/h. En otoño se igualan los vientos del ENE y los del Oeste (W), con velocidades comprendidas entre los 37 y 55 km/h. En invierno se igualan los de los cuadrantes 3º y 4º con un ligero predominio de los del W, que pueden alcanzar los 56 km/h en febrero. También son frecuentes los del primer cuadrante con velocidades inferiores a los 56 km/h (I.N.M., 1998).

## Vegetación

Tanto el depósito de lodos “El Lirio” como el depósito de lodos “Brunita” se encuentran situados dentro de la provincia corológica Murciano Almeriense, con origen en las inmediaciones de Adra y fin en la Hoya de Altea.

Dentro de la provincia Murciano-Almeriense, la zona se inscribe en el sector Almeriense, subsector Almeriense Oriental. Dicho subsector está caracterizado por la presencia de un nutrido número de endemismos e iberoafricanismos (Alcaraz *et al.*, 1999; Alcaraz, 1999).

### Vegetación Potencial del Depósito “El Lirio”:

El área limitada por la cuenca de drenaje del depósito “El Lirio” se ubica en el dominio de la serie termomediterránea murciano-almeriense semiárido-árida del cornical (*Periploca angustifolia*): *Mayteno europaei-Periploceto angustifoliae*.

Este dominio se extiende en forma de franja sensiblemente paralela a la costa de Cabo de Palos hasta Cartagena, continuando después hacia occidente. El límite septentrional de la serie del cornical se extendería un poco más al norte del Sancti Spiritu, aproximadamente por las proximidades del paraje de “La Esperanza”, donde se encuentra el depósito “Brunita”.

La vegetación potencial de esta serie se corresponde en su etapa madura con un matorral espinoso, más o menos denso, dominado por el cornical (*Periploca angustifolia*), en presencia de esparraguera (*Asparagus horridus*), espino negro (*Rhamnus lycioides*), arto (*Maytenus senegalensis*) y palmito (*Chamaerosps humilis*), con pies dispersos de acebuche (*Olea europaea* subsp. *europaea*) y algarrobo (*Ceratonía siliqua*) en zonas donde la humedad del suelo es más elevada.

La presencia de especies como el araar (*Tetraclinis articulata*) y la aliaga (*Calycotome intermedia*), en áreas asociadas con afloramientos de rocas calizas, se ha interpretado como una subasociación propia de la etapa madura de la serie del cornical. Sin embargo, del mismo modo se ha interpretado que la aparición de estas dos especies,

junto con el pino carrasco (*Pinus halepensis*) y el palmito (*Chamaerops humilis*) caracterizan la formación madura de la serie termomediterránea semiárida seca inferior de la sabina mora o araar (*Tetraclinis articulata*): *Arisaro simorrhini-Tetraclineto articulatae* S (Faz *et al.*, 2003a; Faz *et al.*, 2003b).

La distribución de la serie del cornical sigue las variaciones del parámetro de continentalidad, en relación con las otras formaciones maduras del piso termomediterráneo. La influencia atenuadora del viento marino da origen en las zonas más elevadas o de mayor altitud a un microclima, caracterizado por un aumento de la humedad relativa y un menor rango de amplitud térmica a lo largo del año, que se constata en las laderas de exposición umbría del conjunto de la cuenca y a sotavento. Por tanto, en estos sectores domina el piso termomediterráneo superior donde son posibles las heladas en los meses de diciembre y enero. Perteneciendo las formaciones vegetales a la serie termomediterránea superior murciano-almeriense semiárida del lentisco (*Pistacia lentiscus*): *Chamaeropo humilis-Rhamneto lycioidis* S.

La vegetación climática que se corresponde con esta serie es un matorral impenetrable de lentisco (*Pistacia lentiscus*), al que acompañan espino negro, acebuche y esparraguera.

#### Asociaciones Vegetales de la Cuenca de “El Lirio”:

Las asociaciones vegetales de las etapas maduras de las series presentes en la cuenca de “El Lirio” son:

##### *Mayteno europaei-Periplocetum angustifoliae*

Esta asociación se extiende por las áreas costeras de las provincias de Murcia y Almería en las que no se registran heladas y la temperatura media anual supera los 17 °C. Se trata de una vegetación xerófila, adaptada a la aridez, como ocurre con el resto de las asociaciones de la Provincia Murciano-Almeriense. No obstante, en sus dominios, la humedad ambiental proporcionada por la proximidad al mar reduce la evapotranspiración y aumenta las disponibilidades de agua.

La vegetación está compuesta por un matorral espinoso, ya descrito (cornical, arto, palmito, esparragueras, espino negro), en el que pueden aparecer acebuches y algarrobos.

Dicho matorral sólo es reconocible en unos pocos sectores de la cuenca debido a la degradación sufrida por la intensa actividad antrópica en la zona (Faz *et al.*, 2003a).

#### *Chamaeropo humilis-Rhamnetum lycioides*

Es la etapa madura de la serie que le da nombre, Sus dominios ocupan áreas próximas a las de la asociación anterior, aunque, como ya se ha indicado, de mayor continentalidad y donde las heladas son posibles, si bien poco intensas. En la zona de estudio ocupa la ladera norte de mayores cotas (Faz *et al.*, 2003a).

#### *Lapiedro martinezii-stipetum tenacissimae*

La constituyen espartizales termo y mesomediterráneos inferiores seco-semiáridos ibérico-meridionales. Se asientan sobre suelos de distinta naturaleza, pero con la profundidad media. Está dominada por *Stipa tenacissima*, a la que acompañan algunas pequeñas gramíneas (*Dactylis hispanica*, *Avenula murcica*) y neófitos (*Distichoselinum tenuifolium*, *Lapiedra martinezii*, *Allium sphaerocephalon*). Supone la primera etapa de degradación del matorral alto, tanto en los horizontes inferior como superior del piso termomediterráneo, en la zona de estudio. Se encuentran densas manchas en las laderas de solana e incluso se observa su proliferación en los márgenes del depósito. En la zona más elevada se enriquece con *Helictotrichon filifolium*.

#### *Phagnalo saxatilis-Euphorbietum squamigerae*

Esta asociación vegetal se caracteriza por estar presente en los sectores de suelos pedregosos, al pie de cantiles y en los medios alterados, en las laderas de solana del conjunto de la zona de estudio. Se trata de una vegetación nitrófila propia de los pisos termo y mesomediterráneo. En su óptimo se caracteriza por la presencia de *Euphorbia squamigera*, de la que se han encontrado pies dispersos en algunos sectores, aunque en nuestro caso la presencia de esta asociación queda patente por la existencia de *Phagnalon saxatile*, ampliamente distribuida.

### Vegetación Potencial del Depósito “Brunita”:

El área limitada por la cuenca de drenaje del depósito “Brunita” también se ubica en el dominio de la serie termomediterránea murciano-almeriense semiárido-árida del cornical (*Periploca angustifolia*): *Mayteno europaei-Periploceto angustifoliae*. En consecuencia todo lo detallado para el depósito “El Lirio” se cumple para el depósito “Brunita”.

### Asociaciones Vegetales del Depósito “Brunita”:

Las asociaciones vegetales de las etapas maduras de las series presentes en la cuenca del depósito “Brunita” son:

#### *Mayteno europaei-Periplocetum angustifoliae*

Esta asociación se extiende por las áreas costeras de las provincias de Murcia y Almería en las que no se registran heladas y la temperatura media anual supera los 17 °C. Se trata de una vegetación xerófila, adaptada a la aridez, como ocurre con el resto de las asociaciones de la Provincia Murciano-Almeriense. No obstante, en sus dominios, la humedad ambiental proporcionada por la proximidad al mar reduce la evapotranspiración y aumenta las disponibilidades de agua.

La vegetación está compuesta por un matorral espinoso, ya descrito (cornical, arto, palmito, esparragueras, espino negro), en el que pueden aparecer acebuches y algarrobos.

Dicho matorral sólo es reconocible en unos pocos sectores de la cuenca debido a la degradación sufrida por la intensa actividad antrópica en la zona (Faz *et al.*, 2003a).

#### *Chamaeropo humilis-Rhamnetum lycioides*

Es la etapa madura de la serie que le da nombre. Sus dominios ocupan áreas próximas a las de la asociación anterior, aunque, como ya se ha indicado, de mayor continentalidad y donde las heladas son posibles, si bien poco intensas. En la zona de estudio ocupa la ladera norte de mayores cotas (Faz *et al.*, 2003a).

*Campanudo erini-Bellidetum microcephalae*

Pastizal de terófitos de pequeña talla, de carácter esciófilo, que ocupa rellanos térreos y claros en el tomillar; tiene su óptimo en el piso termomediterráneo de la Provincia Murciano-Almeriense. En el área de estudio se encuentra embrocado en especies en el área de tomillares en los sectores naturales relictos.

*Lapiedro martinezii-stipetum tenacissimae*

La constituyen espartizales termo y mesomediterráneos inferiores seco-semiáridos ibérico-meridionales. Se asientan sobre suelos de distinta naturaleza, pero con la profundidad media. Está dominada por *Stipa tenacísima*, a la que acompañan algunas pequeñas gramíneas (*Dactylis hispanica*, *Avenula murcica*) y neófitos (*Distichoselinum tenuifolium*, *Lapiedra martinezii*, *Allium sphaerocephalon*). Supone la primera etapa de degradación del matorral alto, tanto en los horizontes inferior como superior del piso termomediterráneo, en la zona de estudio. Se encuentran densas manchas en las laderas de solana e incluso se observa su proliferación en los márgenes del depósito. En la zona más elevada se enriquece con *Helictotrichon filifolium*.

*Phagnalo saxatilis-Euphorbietum squamigerae*

Esta asociación vegetal se caracteriza por estar presente en los sectores de suelos pedregosos, al pie de cantiles y en los medios alterados, en las laderas de solana del conjunto de la zona de estudio. Se trata de una vegetación nitrófila propia de los pisos termo y mesomediterráneo. En su óptimo se caracteriza por la presencia de *Euphorbia squamigera*, de la que se han encontrado pies dispersos en algunos sectores, aunque en nuestro caso la presencia de esta asociación queda patente por la existencia de *Phagnalon saxatile*, ampliamente distribuida.

*Balloto hirsutae-Carthemetum arborensis*

Comunidad propia de zonas pedregosas y cascajares altamente nitrificados del piso termomediterráneo, dominada por el cardo fruticoso *Carthamus arborensis*. En la zona de estudio se presenta en pequeñas manchas en algunos barrancos y cárcavas desarrollados sobre las terreras ubicadas al Suroeste del depósito (Faz *et al.*, 2003b).



*Dittrichio viscosae-Piptatherum miliacei*

Se trata de pastizales viarios y de zonas nitrificadas, ricos en caméfitos y plantas bianuales, con óptimo en los pisos termo y mesomediterráneo. Está dominado por *Piptatherum miliaceum* y *Dittrichia Viscosa*. En la zona de estudio se encuentra ampliamente distribuida en las cunetas, bordes de carretera y escombreras (tanto en plataforma como en taludes).

*Inulo quadridentatae-Halogetonnetum sativi*

Asociación xerofítica con óptimo en el piso termomediterráneo y en menor medida en el mesomediterráneo. Desarrollada normalmente sobre suelos pesados, estando dominada y caracterizada por *Halogeton sativus*. En la cuenca de estudio se encuentra distribuida en algunas plataformas de escombreras.

*Nicotiano glaucae-Onopordetum macracanthi*

Asociación de cardales termo y mesomediterráneo medio, con óptimo en la provincia Murciano-Almeriense; frecuentemente ocupa suelos con compensación de lluvia como las cunetas de las carreteras. Está dominada por *Onopordum macrocamthum*, *Nicotiana glauca*, etc. En la zona de estudio se encuentra distribuida de forma fragmentada en los márgenes de carretera y en vertederos de escombros no controlados.

*Plantagini albicantis-Capparidetum siculae*

Se trata de una asociación dominada por *Capparis simula*, propia del piso termo y mesomediterráneo semiárido-seco, que coloniza taludes de fuerte pendiente, preferentemente margosos. En el área de estudio se constata su presencia en taludes soleados de escombreras.

*Atriplici glaucae-Zigophylletum fabagi*

Se trata de vegetación hipernitrófila, termo y mesomediterránea, con óptimo fisiológico en las zonas semiáridas del Sureste español. Está dominada por la presencia

de *Zigophyllum fabago*. Se distribuye en la superficie de la cuenca en taludes de carreteras y áreas degradadas. También es observable en escombreras y escasos pies en la zona superior del depósito de lodos mineros.

Comunidad de *Cistus monpeliensis*

Su presencia se asocia a antiguas pistas de acceso a las labores mineras, preferiblemente de orientación norte. Suele aparecer de forma aislada formando pequeñas manchas en combinación con matorral.

## **Hidrogeología**

Los fenómenos geológicos que definen a la Región de Murcia condicionan las características hidrogeológicas, de manera que las unidades geológicas presentes en la Región de Murcia (Prebético, Subbético, Bético, Vegas del Segura-Guadalentín y Campo de Cartagena) también constituyen unidades hidrogeológicas.

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión pertenece al dominio hidrogeológico Bético. Este dominio tiene una extensión de 2 450 km<sup>2</sup> y está situado en la Región de Murcia, con algunos pequeños retazos en la provincia de Almería; ocupa la zona sur del ámbito administrativo de la cuenca del Segura. Es un área de relieve accidentado, interrumpida por la gran depresión del Guadalentín, que la divide en dos zonas, y que se extiende por el litoral entre Cabo de Palos y Águilas (Aragón, 1999).

Los acuíferos de este Dominio son numerosos y de reducida extensión, presentando recursos escasos (Figura 5.7). Estos acuíferos se albergan generalmente en las dolomías y mármoles del Triásico, siendo muy variable su desarrollo tanto vertical como horizontal de unos puntos a otros, debido a que este Dominio está constituido, a grandes rasgos, por mantos de corrimiento; la potencia máxima alcanzada es del orden de los 200 metros. Otras formaciones permeables de menor entidad las constituyen las calcarenitas del Mioceno y los conglomerados, gravas y arenas del Pliocuaternalio y Cuaternario (Aragón, 1999).

La unidad hidrogeológica de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 5.7) tiene una extensión de 100 km<sup>2</sup>. Se consideran materiales permeables, y potenciales materiales acuíferos, los tramos carbonatados del Complejo Nevado-Filábride y Alpujárride, así como los materiales detríticos de relleno neógenos y cuaternarios. Las diferentes unidades acuíferas pueden presentarse en un mismo bloque estructural, material geológico delimitado por accidentes tectónicos, y estar comunicadas hidráulicamente por factores tectónicos y antrópicos. La alta complejidad estructural unida a los efectos de la actividad mineral dificultan el poder diferenciar y establecer las unidades hidrogeológicas, ya que se registran grandes diferencias en el valor del nivel piezométrico entre puntos próximos, y sin embargo a nivel hidroquímico no se detectan esas grandes diferencias (Robles-Arenas *et al.*, 2004).

De los análisis de las aguas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, con un alto grado de mineralización y unos valores de conductividad eléctrica muy variables, se deduce la mala calidad química de las aguas, aunque no se pueda generalizar esta afirmación debido a la compartimentación de la unidad hidrogeológica con diversos acuíferos colgados en fracturas, filones o bloques definidos e independientes entre sí. Las labores mineras e incluso sondeos de investigación, pueden haber provocado en algunos casos la interconexión hidráulica de algunos de estos bloques. El agua subterránea existente proviene exclusivamente de la infiltración del agua de lluvia, de modo que los lixiviados y filtraciones de las balsas y pantanos de estériles de minería, han podido alcanzar, en no pocas ocasiones, bolsas y corrientes de agua subterránea (Conesa, 2005).

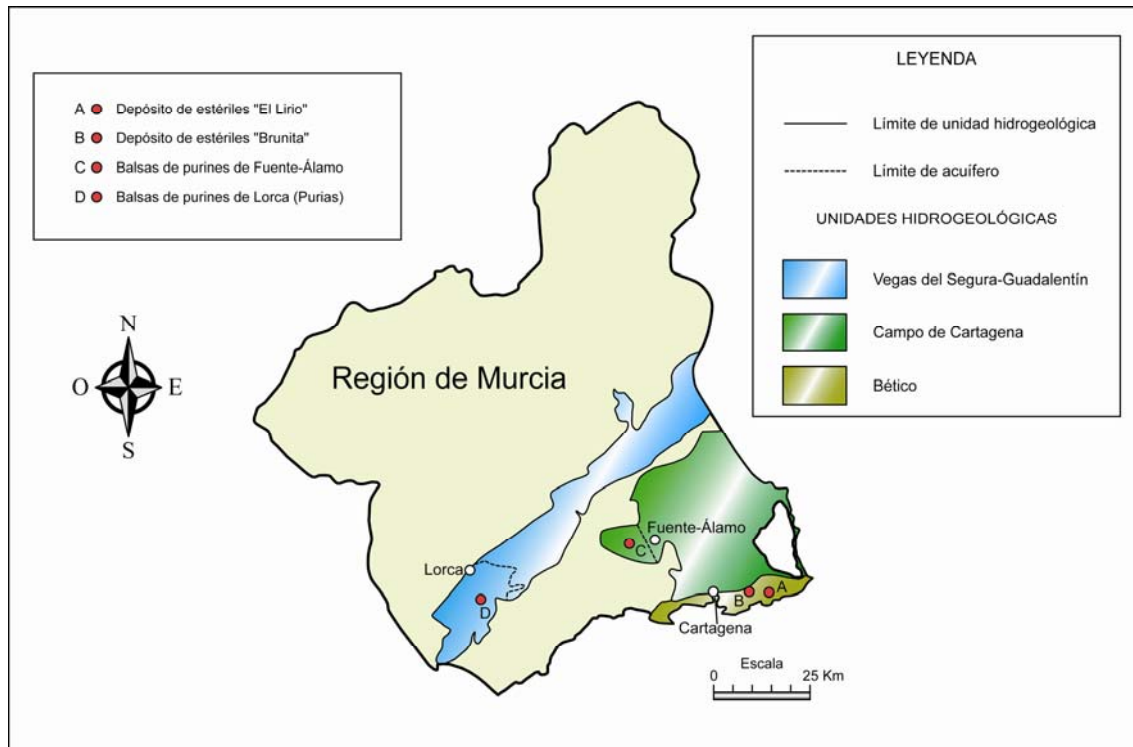


Figura 5. 7. Situación de la unidad hidrogeológica de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez-Estrella, 2006).

Las características climáticas de la zona, unidas a la pequeña extensión de las áreas de infiltración, constituidas por los afloramientos permeables más o menos figurados y las explotaciones a cielo abierto en contacto con materiales permeables, reducen considerablemente las posibilidades de recarga de los acuíferos.

Sin embargo, según Rodríguez Estrella (2006), la Sierra de Cartagena está aún por estudiar, hidrogeológicamente.

## Breve revisión histórica de la minería de Cartagena-La Unión

### *Historia antigua, los inicios mineros*

Pocos lugares como la Sierra Minera de Cartagena-La Unión han provocado luchas tan reiteradas por su control. Este afán por su control fue la explotación de los metales, en especial la plata.

Los primeros ocupantes del lugar tan sólo tomaron de la tierra aquello que conocían y les era útil, el sílex y algunas otras sustancias duras. Los primeros avances

en el uso de los metales se remontan al V Milenio a.C., con el uso del cobre, coincidiendo recíprocamente con una incipiente sedentarización y desarrollo agrícola. Posteriormente, los Argares vendrían a La Unión, con sistemas de explotación limitados a escoger las menas de superficie, entre las que valorarían aquellas que contuvieran estaño para la elaboración del bronce.

La posterior llegada de fenicios y griegos, en busca de la plata, dio lugar a una población mezclada que ya beneficiaba minerales de fácil fusión. La extracción se hacía por medio de galerías inclinadas y por pozos. Con la llegada de los cartagineses se llega a la práctica de una minería completa y bastante elaborada prestando especial atención al viejo problema del agua en las labores. Con la expulsión de los cartagineses por parte de Scipion en el año 209 a. C. se reactivan los pozos y galerías para sorber de la tierra sus riquezas empleando unos 40 000 esclavos que darían una producción anual de 9 millones de denarios a la metrópoli itálica, frente a los ingresos por botín y saqueo, de unos 3 millones. Los trabajos fueron descomunales y se considera que el período de vida de las minas comenzó a principios del siglo III a.C., alcanzando su auge en el siglo I d. C. En las postrimerías del siglo I d. C., Silio Itálico confirma aún su actividad, pero a partir del siglo II entraron en clara decadencia, siendo abandonadas en la práctica en el transcurso del siglo III (Maturana *et al.*, 1996).

Los visigodos y los musulmanes no han dejado demasiados indicios que induzcan a pensar que explotaron esta zona minera, debido al agotamiento de los criaderos y a la decrepitud de las explotaciones, pero también a problemas técnicos y falta de mano de obra.

### ***Siglos XIX y XX, la fiebre minera de 1840***

No será hasta pleno siglo XIX cuando se reaviven las ansias por la plata del Sureste. A comienzos del siglo XIX la minería cartagenera continuaba en el abandono de los dieciséis siglos anteriores. El 4 de julio de 1825, se aprueba la nueva Ley de Minas, elaborada por Fausto de Elhuyar, que supuso un revulsivo para la minería española ya que permitía la participación del pequeño inversionista. A mediados del siglo XIX se vivió en Europa un período de fuerte demanda de plomo, por lo que práctica totalidad del mineral producido en la Sierra se exportaba. De hecho, el

comercio del plomo y la plata estaban en manos, casi en exclusiva de ingleses y franceses. El puerto favoreció las exportaciones.

En el año 1839 se descubre el rico filón “Jaroso” en el barranco del mismo nombre en la Sierra Almagrera (Almería). Su enorme éxito económico provocó en la cuenca cartagenera una fiebre comparable a la suscitada por la aparición del oro en California una década más tarde. Pero el definitivo respaldo que aseguró la evolución en la zona llegó el año siguiente, cuando por Decreto Ley se prohíbe exportar mineral sin beneficiar. Esto supondrá el nacimiento de una importante industria metalúrgica. Las primeras fundiciones de la Sierra Minera comenzaron tratando mineral procedente de otros distritos (Mazarrón, Lorca y Almagrera).

Es también en 1840 cuando se instalan los primeros hornos para el beneficio de escoriales antiguos. La preparación mecánica del mineral previa a su fusión consistía en un simple *garbillado*. En 1842 se documenta la primera producción de plomo y plata, a partir de escorias romanas, beneficiadas en la Fábrica Franco Española de Santa Lucía y en el horno castellano del suburbio de Quitapellejos, en Cartagena. No tardó en alcanzarse el auge en la producción de metal a partir de las escorias, llegando en el año 1843 a la suma de 178 768 q, significando esto que la casi totalidad de la producción se obtenía a partir de la refundición de litargirios y escorias.

En el año 1840 es el de la primera fiebre de la minería cartagenera. Se demarcan numerosos escoriales, terreras y minas por toda la Sierra Minera. Hacia mayo de 1840 había denunciadas en toda la provincia de Murcia 1200 minas de diversas sustancias, de las que más de 800 se habían registrado desde enero de ese mismo año, la mayor parte de ellas de plomo. Cientos de aventureros de las más diversas procedencias recorrían la comarca en busca de su particular El Dorado.

Una compañía catalana se establece en la zona comprendida entre Portmán y Cabo de Palos, realizando trabajos de prospección, pero sin éxito. Es nueve años después, en que una serie de compañías como la del Porvenir y la del Lirio, de Murcia, comenzarán una explotación más racional de los yacimientos, bajo la supervisión del ingeniero José G. Lasala, llegando a ser catorce las pertenencias en fase de

investigación, con leyes del 55 % en plomo y hasta 22 onzas de plata por quintal (1.3 Kg/t). Sin embargo la compañía no obtuvo el beneficio esperado y quebró.

Cuando en 1850 se desata una nueva fiebre minera, se reorganiza la compañía de Sancti-Spíritu con el nombre de “El Trueno”. Se reconstruye bajo la dirección de José G. Lasala el Grupo del Humo con las minas en la ladera Norte de este cerro. Lasala emprenderá una serie de reformas en la explotación de estas minas, tendiendo a una mejora de los trabajos. En cuanto al laboreo, implantará el método de huecos y pilares, abandonando la rapiña de los antiguos minados romanos. Así mismo diseñará una galería general de transporte que, equipada con un ferrocarril minero de una sola vía y dos cargaderos construidos aprovechando dos anchurones romanos, atravesaba todo el cerro. La instalación, en sus mejores momentos, tuvo una capacidad de extracción de entre 1 000 y 1 500 toneladas al día. Lasala propondrá también la perforación de una galería de investigación buscando mineral en terreno virgen y el inicio de un gran desmonte a cielo abierto en la cúspide del cerro, para el beneficio del mineral abandonado por los romanos.

Con la aparición de los primeros hornos de viento forzado, capaces de fundir sulfuros y carbonatos (hasta esa fecha sólo se beneficiaban los carbonatos superficiales), el número de explotaciones se multiplica desorbitadamente. Se abren multitud de canteras para la extracción del nuevo mineral. La sierra adquiere el aspecto de un hormiguero, con miles de hombre trabajando de sol a sol (Maturana *et al.*, 1996). Quince años después, la producción de carbonatos alcanzará la cifra de un millón de toneladas de mineral, empleando a 20 000 hombres.

En 1848 en la mina “Bilbao”, bajo la dirección de José de Monasterio, se corta por primera vez el Manto de los Azules que a la larga sería el más importante yacimiento de sulfuros del distrito, este yacimiento en capa no había sido tocado por los romanos.

A finales de 1851 hay 290 explotaciones en activo que abastecen a 45 fundiciones de plomo. A partir de 1860 se comienza a mecanizar la preparación de los minerales. En 1855 se produce el primer intento de penetración en el negocio minero cartagenero por parte de la Sociedad Minera y Metalúrgica Peñarroya con el

arrendamiento de varias funciones en Mazarrón, Garrucha, Palomeras y Santo Tomás y la creación de una naviera para el transporte marítimo de sus producciones de plomo. Se montan numerosos lavaderos gravimétricos equipados con cribas de palanquines. En 1874 se inaugura un tranvía de vapor con el recorrido Cartagena-La Unión, que posteriormente se ampliará hasta Los Blancos. También se montan cables aéreos para el transporte de los hierros (Maturana *et al.*, 1996) siendo sus producciones de 600 000 t/año, coincidiendo con la fuerte demanda causada por la introducción del convertidor Bessemer para la producción de acero. Así, de esta manera, el Distrito Minero de Cartagena-La Unión se convierte a finales del siglo XIX en uno de los mayores productores mundiales de plomo. Esta época de bonanza persistirá durante los comienzos del siglo XX.

### ***Siglo XX. Bonanza y declive definitivo***

Las fluctuaciones económicas internacionales siguen afectando de manera profunda a la minería local. La grave crisis que sufre la comarca tras la Primera Guerra Mundial provoca la concentración industrial, al quedar eliminados del proceso productivo los pequeños industriales, imposibilitados de resistir los grandes vaivenes mercantiles (Vilar y Egea, 1990).

La Sociedad Minero Metalúrgica Peñarroya España será la principal protagonista de la minería regional durante el siglo XX. La creación en 1930 de la Sociedad Minero Metalúrgica Zapata Portmán, representó un serio intento de Peñarroya por establecerse sólidamente en la Sierra de Cartagena (S.M.M.P.E., 1983). A partir de esta fecha, la labor fundamental de Peñarroya será agrupar y unificar en grandes áreas de explotación la multitud de concesiones y explotaciones presentes en la Sierra.

La Guerra Civil (1936-1939) vuelve a golpear a la actividad minera de la zona, agravándose los conflictos sociales.

La recuperación de la minera en los años 40 estuvo relacionada con el uso de las nuevas técnicas de beneficio de minerales por flotación diferencial. Debido a la baja ley de las menas y al exceso de compartimentación de la propiedad, la minería resultaba escasamente remuneradora con los nuevos métodos de tratamiento, a tenor de la enorme



cantidad de tierras que era preciso mover para que el tonelaje de mineral vendible compensase los gastos de explotación. Se presenta de esta manera la necesidad de una ampliación de los campos de explotación y un cambio en el tipo de laboreo seguido hasta entonces (Vilar *et al.*, 1991).

La Ley de Minas de 29 de julio de 1944 vuelve a aplicar los conceptos de propiedad pública de la minería, con lo que el Estado aumenta el grado de intervencionismo en el sector.

Peñarroya culmina el proceso de concentración de la titularidad minera con el inicio del laboreo a cielo abierto de la antigua mina Emilia en el año 1951 y la extracción de minerales de la misma en el 1957. A la cantera Emilia le seguirán San Valentín, Tomasa, Gloria, Los Blancos I y II, Brunita, Sultana y, finalmente, Los Blancos III. La Sociedad Minero Metalúrgica Peñarroya España, constituida como tal en 1968, generará ya en 1970 más del 65 % de la producción total de plomo y zinc de la zona.

En el año 1952 Peñarroya (todavía “Zapata-Portmán”) inicia en Portmán la construcción del lavadero “Roberto” (uno de los más grandes de Europa por flotación diferencial). Entra en funcionamiento al año siguiente, pero será a partir de 1957 y como consecuencia del inicio de la explotación de la cantera Emilia cuando Roberto comienza su actividad a pleno rendimiento.

La eficiencia de las técnicas productivas en esta última época acelerará el agotamiento de los recursos. Para dar una idea de la enorme repercusión de la minería contemporánea baste decir que en sólo 50 años, que van de 1940-1990, se explotó aproximadamente la misma cantidad que se había trabajado durante más de los dos mil años anteriores (Conesa, 2005).

La bonanza económica inicia su declive en la década de los ochenta, cuando la declinante coyuntura internacional plasmada en la caída de los precios de los minerales, así como el agotamiento de los recursos subyacentes, acabarán con la milenaria minería de la zona a principios de la década de los noventa.

Tras el cierre del lavadero Roberto en 1990 se paraliza la actividad minera para la construcción de un nuevo lavadero y reacondicionamiento de algunas cortas para verter y almacenar los lodos, pero la actividad minera no llegó a recuperarse, ni a alcanzar los ritmos previstos, por lo que a finales de 1991 se paralizó definitivamente.

## Descripción de los depósitos de estériles mineros

Los estériles mineros de lavadero, en suspensión acuosa, que provienen de los procesos mineralúrgicos principalmente, son conocidos como *colas* (en inglés, “*tailings*”). Los procesos que dan lugar a colas son:

- Procesamientos de los minerales para la extracción de los metales o sus compuestos (plantas de flotación de sulfuros).
- Procesos de lavado para la eliminación de materiales arcillosos o lamas (lavado de arenas).
- Subproductos obtenidos en etapas que forman parte del proceso y que consisten en reacciones químicas (obtención del yeso).
- Residuos de la combustión del carbón (cenizas).

Estos procesos dan lugar a productos con un tamaño de partícula muy pequeño como resultado de los procesos de trituración y molienda. Generalmente, los procesos de concentración de menas se llevan a cabo por vía húmeda y las colas que son producidas se presentan en forma de pulpa (en inglés, “*slurry*”), como era el caso de las colas producidas en las plantas de flotación de sulfuros de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Estas colas serán depositadas en presas o balsas mineras. Según el A.N.C.O.L.D. (1999) la producción mundial anual de estériles mineros es de aproximadamente 5 000 millones de toneladas y esto requiere la creación, aproximadamente, de entre 3 000 y 5 000 millones de metros cúbicos de nuevos almacenamientos cada año.

Los diferentes depósitos mineros de la Sierra Minera se pueden clasificar atendiendo a varios criterios: por la constitución del muro exterior, por el método del recrecimiento o por la implantación en el terreno (García, 2004). Según el método de

recrecimiento se pueden presentar depósitos de recrecimientos “agua arriba”, levantando diques sucesivos ligeramente retranqueados respecto al anterior y manteniendo un resguardo sobre el nivel de lodos. También se denominan “presas autorecricibles”. El depósito de estériles “El Lirio” pertenece a esta clasificación (Figura 5.8).

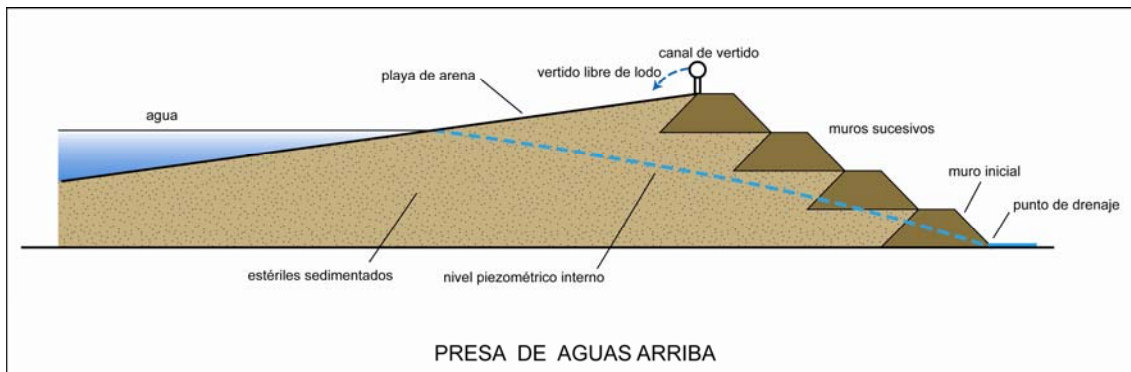


Figura 5. 8. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento aguas arriba (elaboración propia).

Están también los depósitos con recrecimiento “aguas abajo” donde los nuevos diques se van extendiendo con recubrimiento del talud de los anteriores (Figura 5.9).

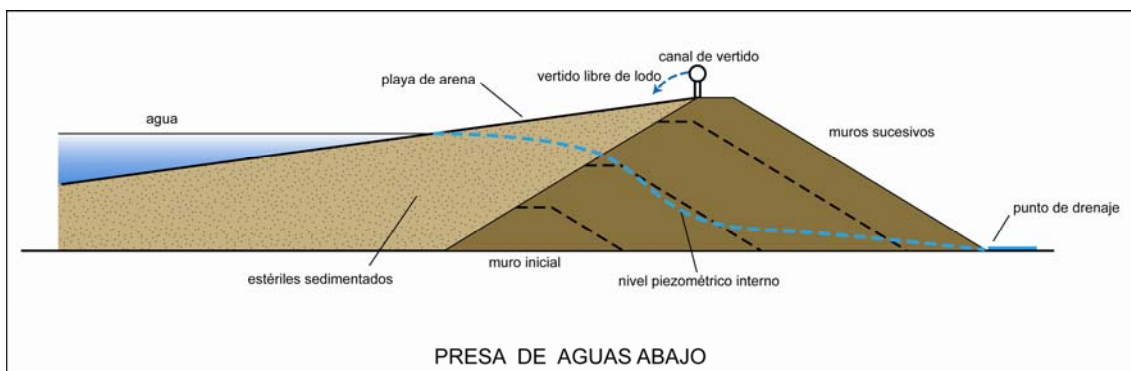


Figura 5. 9. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento aguas abajo (elaboración propia).

Y por último tenemos otra variedad de depósitos en los que el recrecimiento es central combinando los dos métodos citados anteriormente (Figura 5.10).

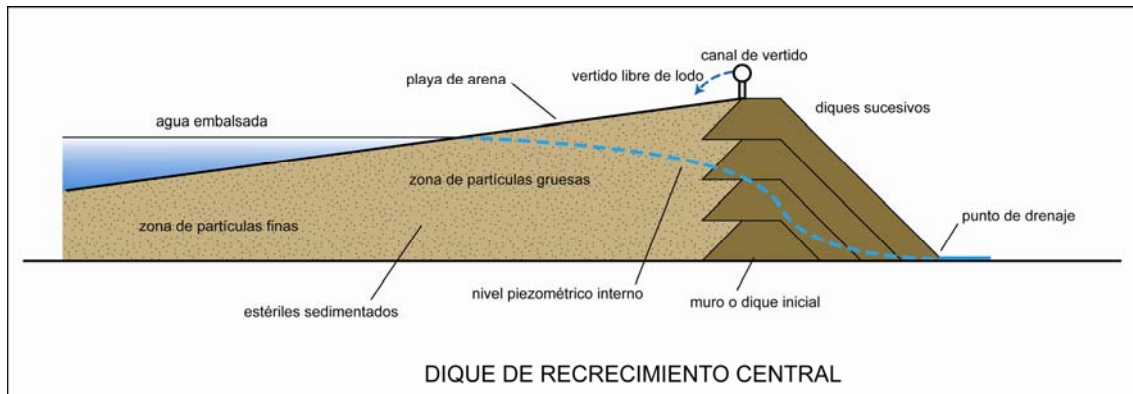


Figura 5. 10. Representación esquemática del desarrollo de un depósito de estériles con sistema de recrecimiento central (elaboración propia).

Teniendo en cuenta la implantación del depósito en el terreno tenemos los depósitos en “exentas”, donde se ejecuta un muro perimetral levantado sobre el terreno o rellenando una excavación; los depósitos “de valle”, que son análogos a las presas convencionales, el depósito “El Lirio” pertenece a esta categoría; los depósitos “de ladera” situados a media ladera, el depósito “Brunita” pertenece a esta categoría (Ayala y Rodríguez, 1986).

La elección del punto de vertido tiene gran importancia. En la mayoría de los depósitos de la Sierra Minera el vertido se realizaba junto al dique (Figura 5.8), puesto que era la opción más favorable, desde el punto de vista de la estabilidad de la estructura, al favorecerse la formación de una playa de arena relativamente uniforme que le daba consistencia al dique, al contrario de lo que ocurre si el vertido se hace en cola, donde el agua se acumula contra el dique creando flujos de filtración y una cuña de baja resistencia por arrastrar los lodos más finos. Además en los depósitos de la Sierra Minera se evitaba realizar una descarga puntual única, lo que formaría un espigón de arena que sería contorneado por el agua y acabaría remansada contra el dique, lo que originaría efectos nocivos en su estabilidad.

En los depósitos de estériles mineros de la Sierra Minera el vertido del lodo se realizaba a través de múltiples salidas dispuestas a lo largo del dique, próximas a su coronación. El sistema de vertido múltiple era sencillo, consistía en instalar una canaleta de madera de sección 25 x 25 cm y de grosor 2 cm que era soportada por una serie de redondos de madera, de longitudes comprendidas entre 3 y 4 metros, y empleando unas escuadras, también de madera, a modo de soporte (Figura 5.11 y Figura 5.12). A esta canaleta de madera, que se situaba a lo largo del dique a una distancia de 2-3 metros de

la orilla, se le practicaban unas perforaciones en su base cada 0,5 m que servían puntos de vertido del lodo. Estos agujeros se abrían o se tapaban, con tapones de madera y tela, en función de la zona seleccionada para realizar el vertido. Los redondos de madera se disponían cada 2 metros. Cuando se colmataba la balsa se la recrecía con un nuevo dique y se creaba otro nuevo sistema de vertido formado por redondos de madera y canaletas (I.G.M.E., 1974).

Para la evacuación del agua embalsada y su recuperación, se empleaban chimeneas centrales de decantación que se conectaban en su base a un conducto o tubería de salida que atravesaba la base del dique (Figura 5.11). Estas chimeneas eran recrecidas periódicamente con ladrillos a medida que el nivel del lodo amenazaba con llegar al rebosadero (Figura 5.12). Para su recrecimiento se ayudaba de una barca para aproximar el material de albañilería a la zona central de la balsa. Posteriormente se fue implantando otro sistema de evacuación, más seguro, consistente en la colocación en la ladera de una tubería de fibrocemento a la cual se le practicaban unos pequeños orificios con un pico que permitían el drenaje del agua embalsada (Figura 5.13). Conforme el nivel del lodo subía estos orificios se iban tapando con madera y tela (la madera se hinchaba con la humedad y dejaba estanco al orificio) para evitar su drenaje. Este sistema permitía controlar la evacuación del agua de una forma más sencilla sin necesidad de emplear barcas y eliminaba el riesgo de colapso de la chimenea por la carga de los lodos o posibles fallos en el dique por flujos periféricos al conducto o la rotura entre la unión de la chimenea y la tubería inferior.

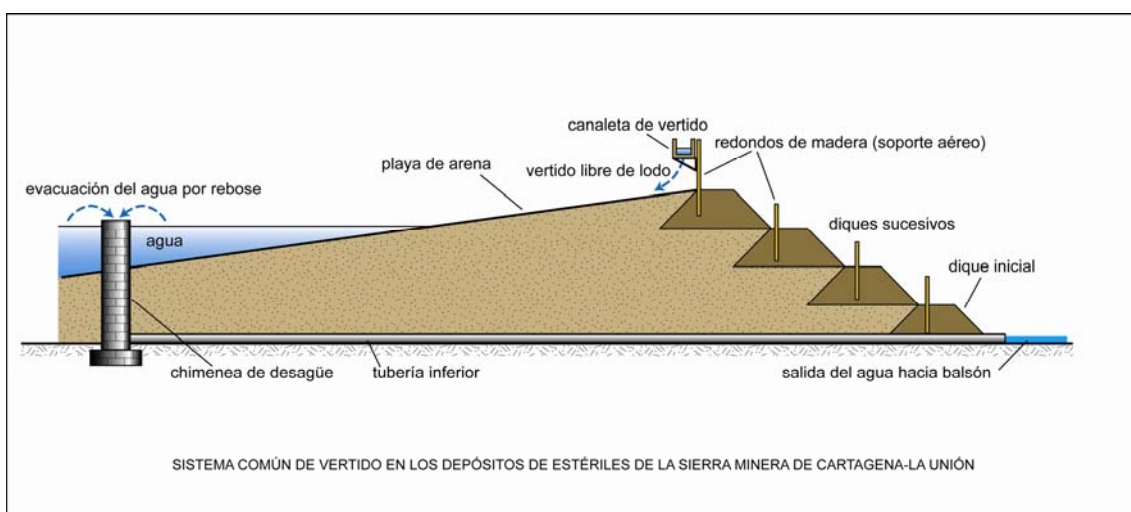


Figura 5. 11. Representación esquemática de los sistemas de vertido y evacuación empleados en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia).

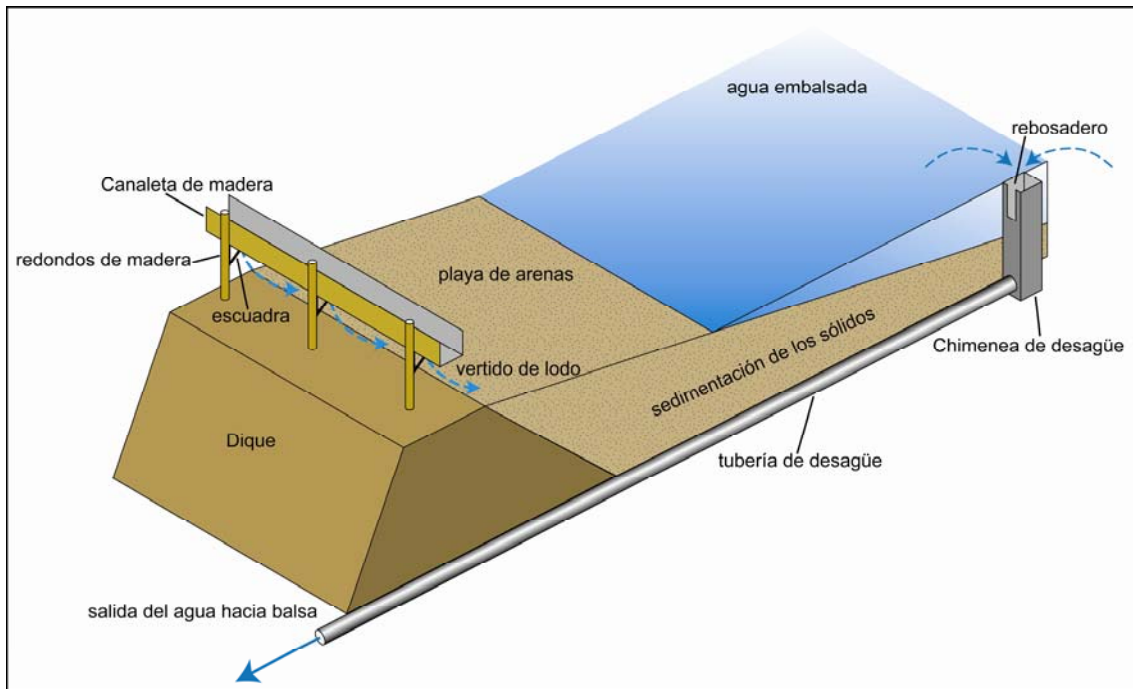


Figura 5. 12. Sección central esquemática y, en perspectiva, de los sistemas de vertido y evacuación empleados en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia).



Foto 5. 1. Dique recrecido "aguas arriba" y restos del sistema de vertido con canaletas de madera en el depósito "El Lirio".

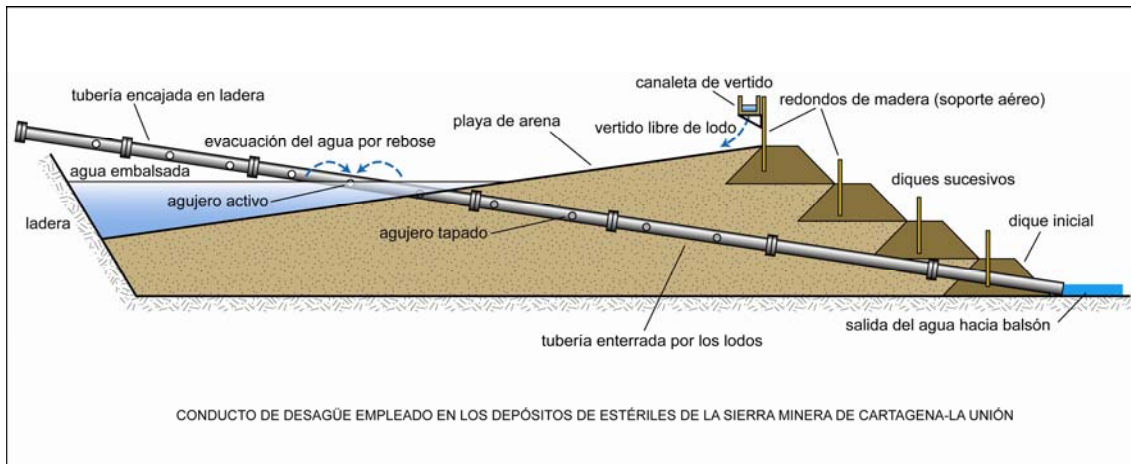


Figura 5. 13. Representación esquemática del sistema alternativo de evacuación del agua embalsada empleado en los depósitos de estériles de la Sierra Minera (elaboración propia).

El terreno donde se ubican las balsas inventariadas de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, no está impermeabilizado (García, 2004). El dique de los depósitos de estériles de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión se formaba a partir del propio lodo que caía de las canaletas de vertido y servía para darle pendiente a los lodos hacia el interior de la balsa desde su coronación. Un operario se encargaba manualmente de crearlo con el empleo de una pala. Según García (2004), en el caso de depósitos en exenta, al comienzo de su construcción, se creaba un cordón de tierra a lo largo de su perímetro, o en la base en el tipo ladera (caso del depósito de estériles “Brunita”). A partir de este momento se iba realizando el vertido puntual de los lodos a través de una tubería que, apoyada en un trípode de madera, se situaba dentro de la balsa y descargaba a una altura que oscilaba entre 1 y 2 m en las proximidades de su borde. Esta tubería se giraba para distribuir el lodo en toda la superficie de la balsa. También se empleaban troncos de madera y tablonés para elevar la balsa y continuar con los vertidos. El agua evacuada por gravedad se recogía en pocetas o balsas para su recuperación mediante bombeo.

### **5.2.2 Depósito de estériles “El Lirio”**

El depósito de estériles “El Lirio” (Foto 5.1) se encuentra emplazado en la zona denominada Coto Ponce, al Sureste de la mina también denominada Coto Ponce (Figura 5.2). Está situado en una vaguada cuyas escorrentías van a parar a la Rambla Carrasquilla (Figura 5.14).

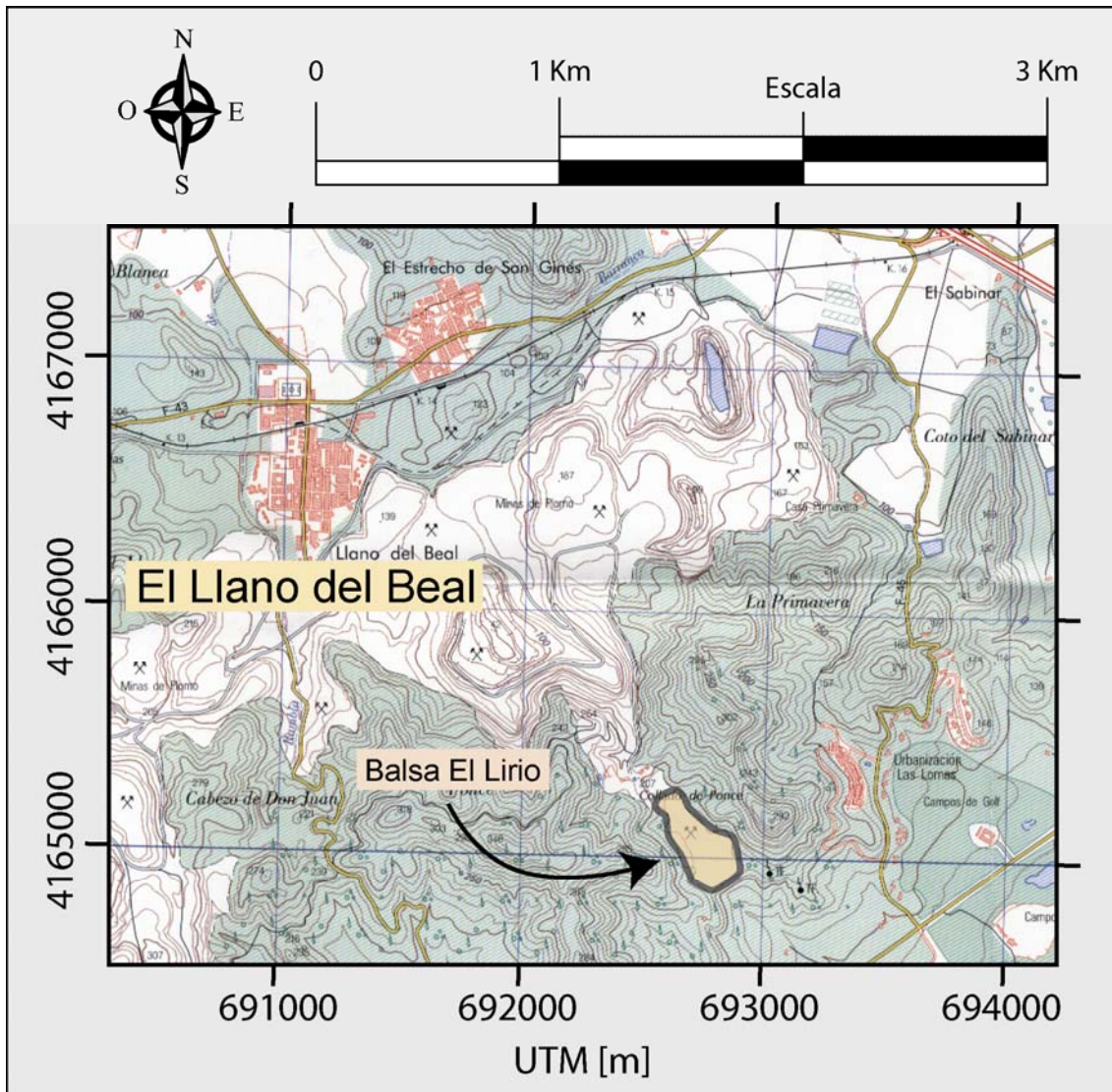


Figura 5. 14. Emplazamiento del depósito de estériles mineros “El Lirio”.

La construcción de este depósito se llevó a cabo sin ningún tipo de impermeabilización del lecho, descansando los estériles sobre materiales del Mioceno (Serravalliense) que consisten en limonitas calcáreas, alternando con areniscas con algunas intercalaciones de conglomerados (Faz *et al.*, 2003a).

Este depósito se halla en las Cordilleras Béticas, que han sido generadas por plegamientos alpinos, y dentro de éstas concretamente en la Zona Bética, que presenta una clara aloctonía, diferenciándose tres complejos tectónicos que son, de muro a techo, Nevado Filábride, Alpujárride y Maláguide, si bien, en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión sólo están representados los dos primeros (Fundación Sierra Minera, 2001).



La geología del sustrato y de los alrededores del depósito de estériles “El Lirio” consiste en materiales miocénicos que están descansando en discordancia angular sobre rocas metamórficas (esquistos grafitosos y cuarcitas grises) de edad paleozoica, del complejo Nevado-Filábride (Apartado 5.2.1 y Figura 5.16). En esta zona se han explotado fundamentalmente mineralizaciones de sulfuros (pirita, blenda y galena) en forma de diseminaciones, especialmente en los niveles de areniscas y conglomerados, así como diferentes filones mineralizados asociados a las zonas de fracturas y fallas (Figura 5.15).

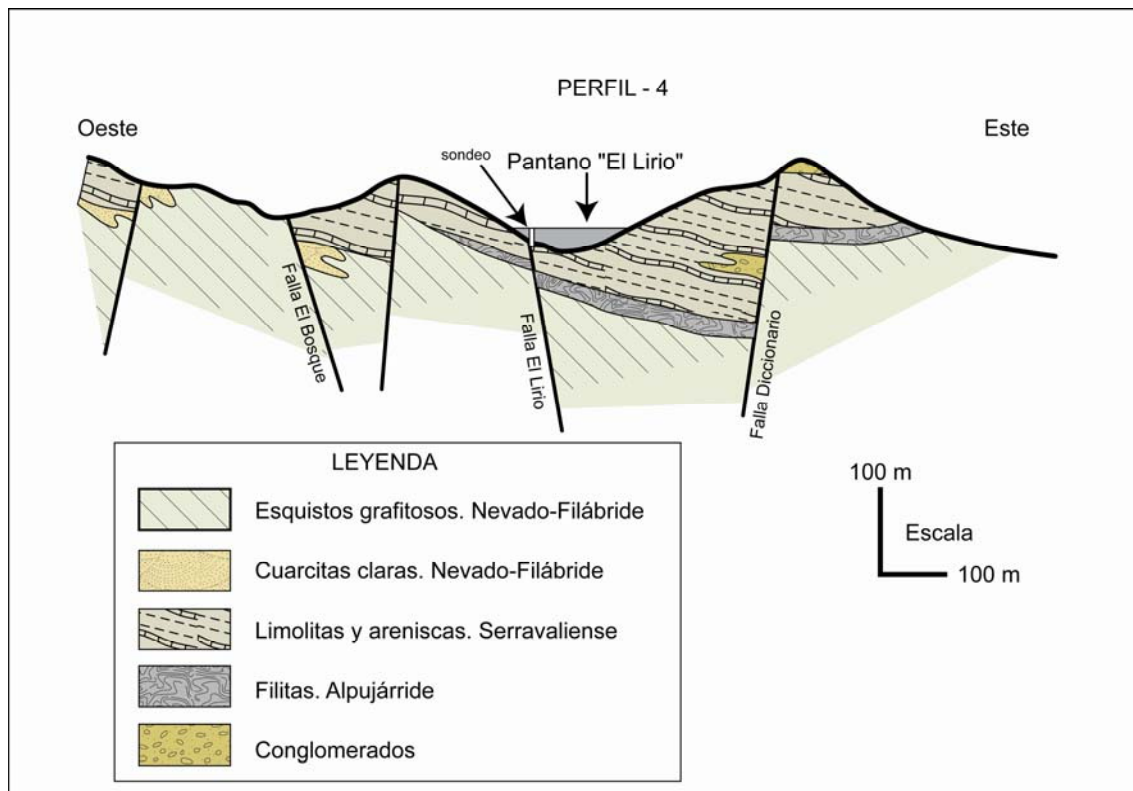


Figura 5. 15. Perfil geológico con dirección E-O sobre el pantano “El Lirio” (Faz *et al.*, 2003a).

En la zona se han explotado por el método de minería subterránea (galerías) algunos filones de sulfuros, como el Diccionario, El Lirio, El Bosque, etc. Estos filones mineralizados se encuentran en materiales del Mioceno, en su parte superior, y en materiales del Paleozoico en la inferior (Manteca y Ovejero, 1992).

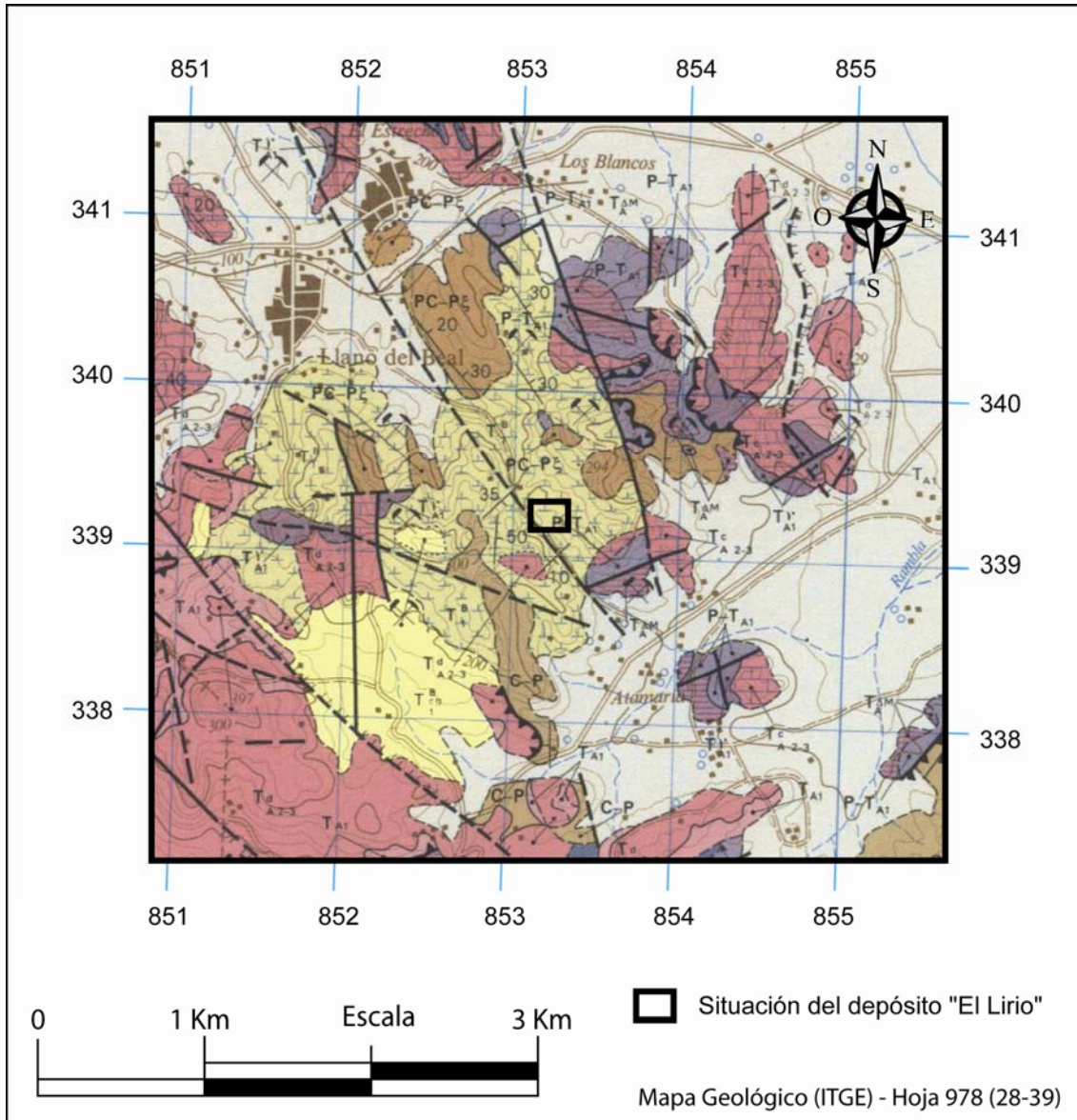


Figura 5. 16. Formaciones y contactos geológicos de la zona donde se ubica el depósito de estériles "El Lirio" (I.T.G.E., 1993a).

La forma geomorfológica del depósito de lodos es alargada en dirección noroeste-sureste. Esta morfología obedece a la forma y orientación de la vaguada sobre la que está construido. La dirección de la vaguada está a su vez condicionada por fracturas de rumbo N-130°, concretamente por la falla El Lirio (Figura 5.15 y Figura 5.16). El perfil topográfico transversal del valle es ligeramente asimétrico, con la vertiente occidental más suave (21° de pendiente media) que la oriental (31° de pendiente media). Esta asimetría es consecuencia principalmente del buzamiento de los materiales del Mioceno hacia el Este (Figura 5.15).

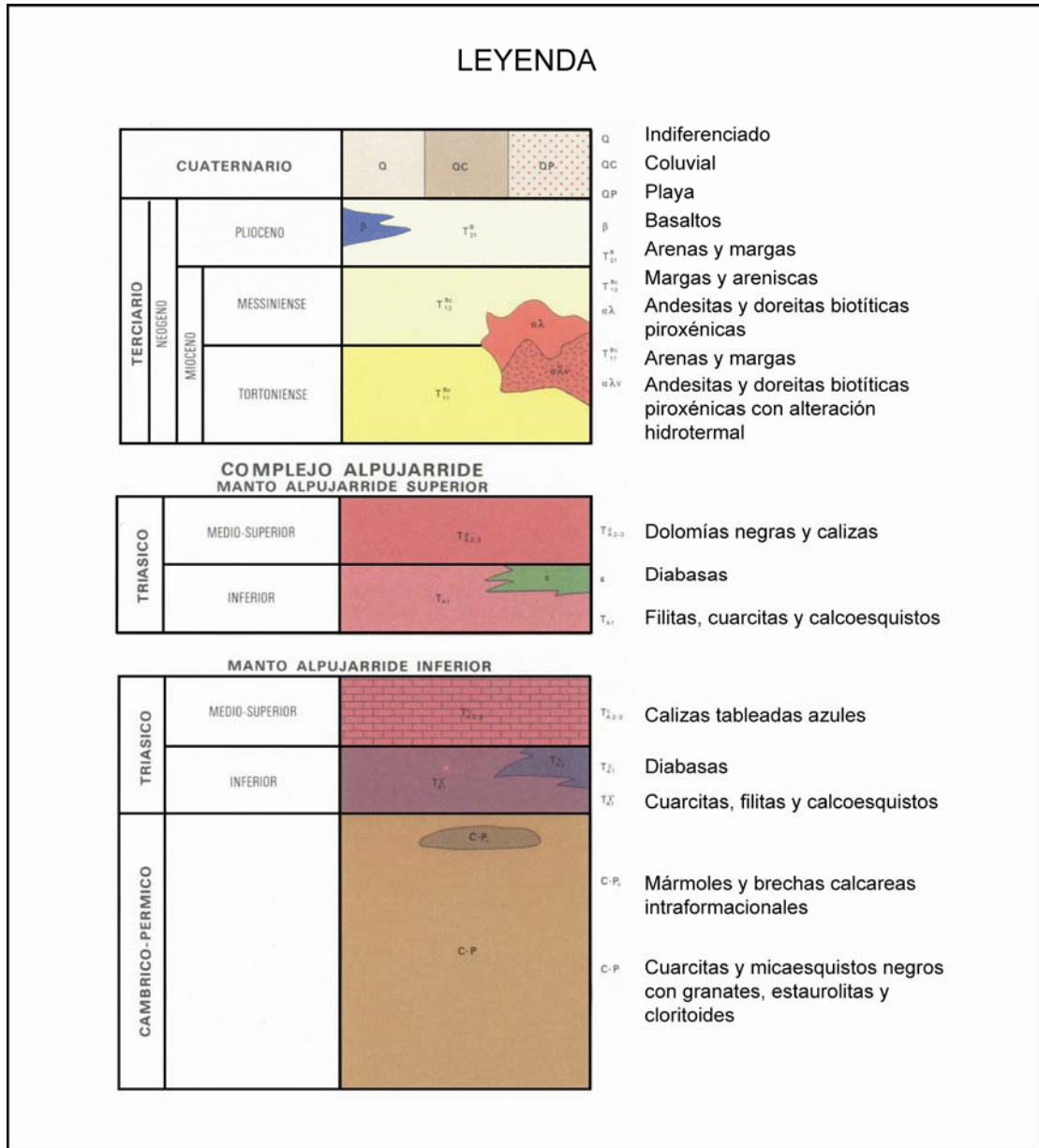


Figura 5. 17. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a).

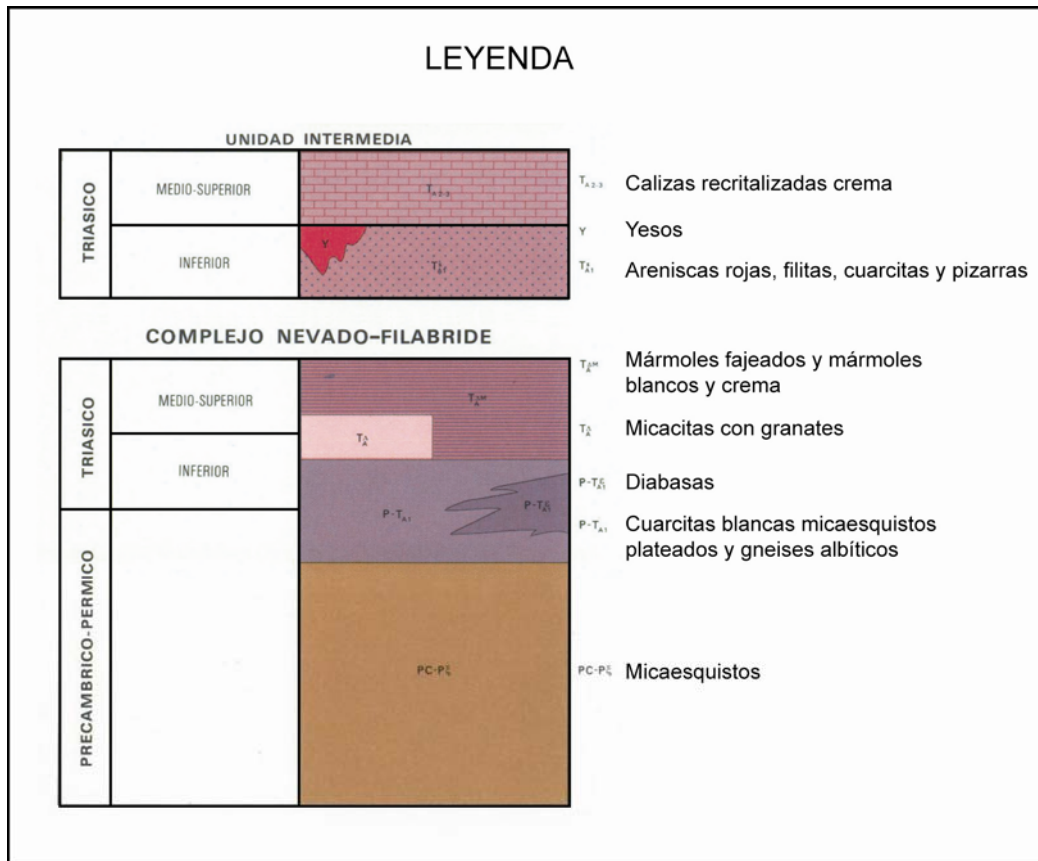


Figura 5. 18. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a).

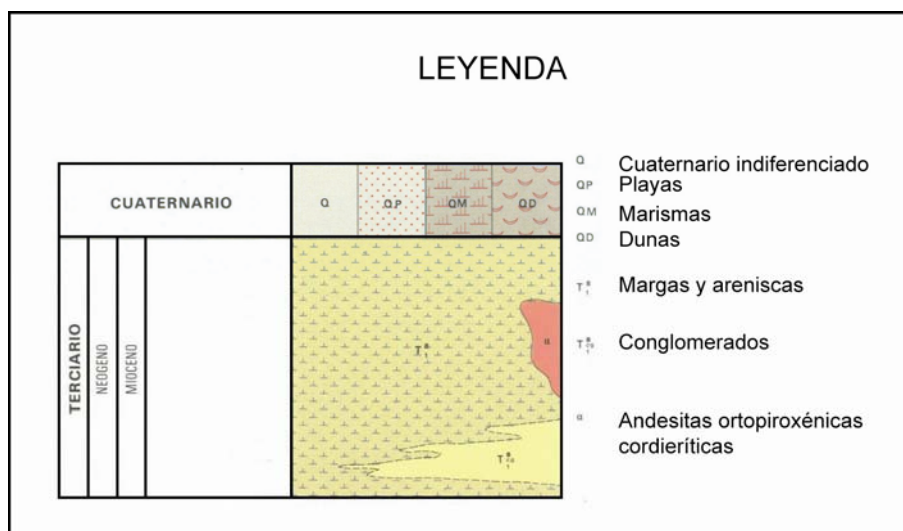


Figura 5. 19. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.16 y la Figura 5.22 (I.T.G.E., 1993a).

## **Evolución histórica del depósito**

El proceso de producción de concentrado de mineral a partir de técnicas de flotación diferencial, así como la producción de residuos de tipo fango (lutíticos), tiene sus orígenes en el año 1940 (ver apartado 5.2.1) con la apertura del lavadero de las minas Regente y Concilio (Rolandi, 1954).

De forma sucesiva a la puesta en funcionamiento de este lavadero, otro gran grupo de lavaderos fueron construidos en el periodo comprendido entre los años 1940-1952, entre los que se encuentra el lavadero de la Mina Lirio, propiedad de la compañía “Minera Celdrán S.A.”, que con posterioridad en 1956 se convirtió en accionista de la compañía “Española del Zinc, S.A.”, junto con otro grupo de empresas del ramo, que lo explotó de modo continuado hasta su cierre (Faz *et al.*, 2003a).

Aunque no se puede establecer con exactitud el año de apertura de la planta de tratamiento de mineral, y por tanto el inicio de los vertidos a la Rambla Mendoza, si se tiene la certeza de que su consolidación como estructura sedimentaria tipo depósito de lodos tiene su origen en el año 1956, cuando la Alcaldía de Cartagena decide imponer la obligación a todas las empresas propietarias de lavaderos de mineral, medidas de decantación de los sólidos en suspensión permitiendo únicamente el vertido a las ramblas de aguas libres de materiales sólidos.

Hasta 1981, el ritmo de explotación y tratamiento de mineral, se caracteriza por ser estable y productivo. No obstante, es en este año, cuando la compañía Minera Celdrán presenta un expediente de crisis, cerrando así sus instalaciones. De forma coyuntural, esta situación se extendió a un gran número de compañías entre las que se encuentra “Española del Zinc”, propietaria y explotadora del lavadero del conjunto minero “El Lirio”, pudiendo establecerse este año como cese de los vertidos.

### **5.2.3 Depósito de estériles “Brunita”**

El depósito de estériles “Brunita” se encuentra emplazado al Norte de la Mina Brunita, en el paraje conocido como La Esperanza, inmediatamente al Sur del cementerio de La Unión (Figura 5.20). Este depósito sufrió una rotura en octubre de 1972 desencadenada a raíz de unas lluvias torrenciales, dando lugar a una corriente de lodos que arrasó el cementerio y provocó la muerte de una persona. Después de este accidente se construyó un muro de material de escombrera por delante del depósito, a modo de escollera y se clausuró (Foto 5.2). La empresa responsable de este depósito, “Eloy Celdrán S.A.”, posteriormente al grave accidente, procedió a crear un nuevo depósito de estériles a 1 kilómetro al Oeste del original, en el lugar conocido como Barrancón del Pintado, al Sur de La Peraleja (Faz *et al.*, 2003b).



Foto 5. 2. Depósito de estériles mineros “Brunita”.

Este depósito descansa en parte sobre esquistos grafitosos y cuarcitas grises paleozoicas del Complejo Nevado-Filábride (ver Apartado 5.2.1), especialmente la parte occidental, y en parte sobre calizas y filitas del Complejo Alpujárride, que a su vez reposan en discordancia, por cabalgamiento, sobre los citados materiales paleozoicos

(Figura 5.21 y Figura 5.22). El sondeo mecánico que se ha realizado ha cortado las calizas bajo los lodos mineros.

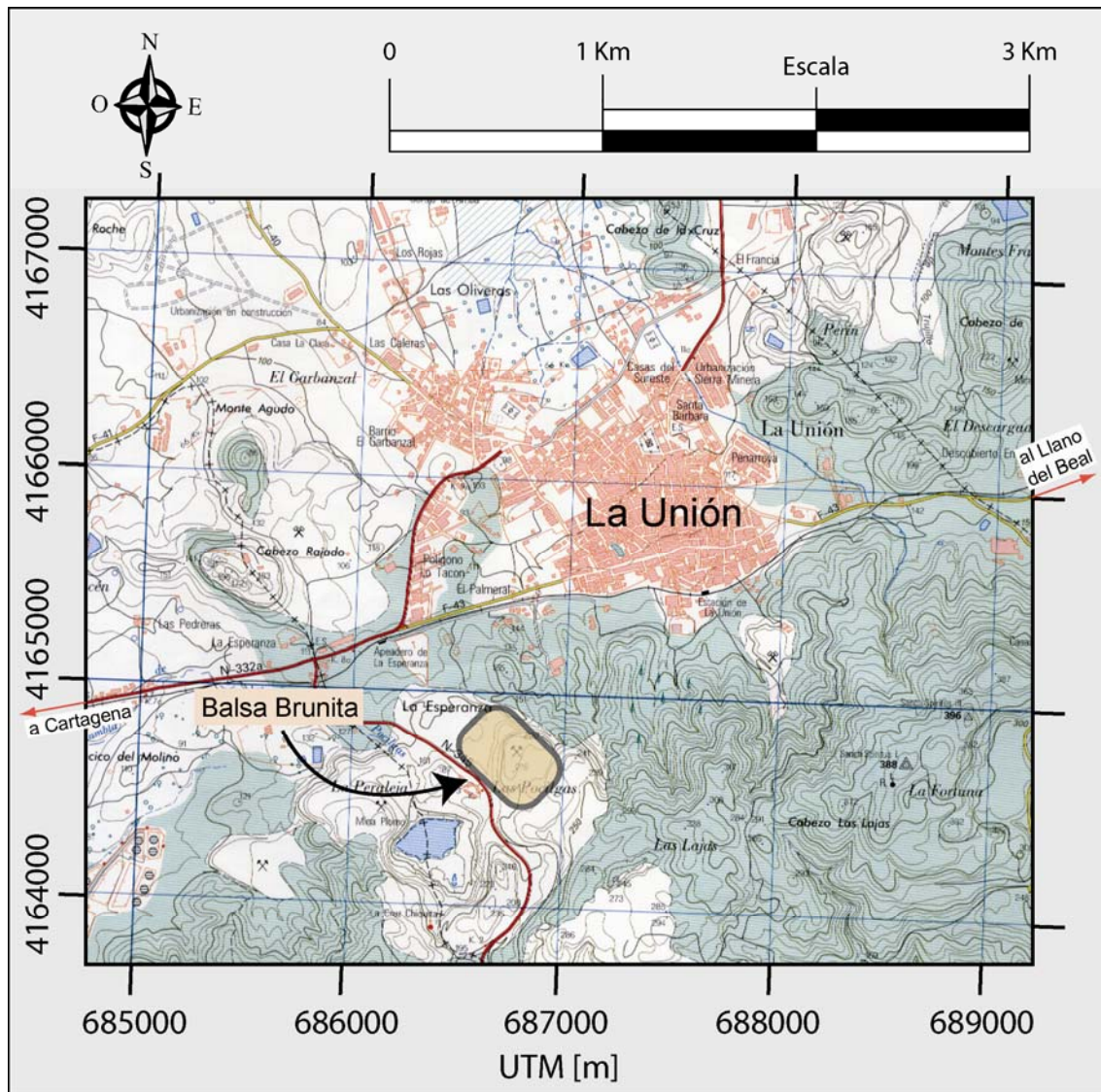


Figura 5. 20. Emplazamiento del depósito de estériles mineros “Brunita”.

El relieve de la zona ocupada por el depósito, correspondería a una suave vaguada, actualmente rellena de lodos y por grandes escombreras procedentes del desmonte de la corta Brunita. En su extremo noroeste el depósito se apoya en un pequeño cerro dolomítico (Figura 5.21).

Los materiales de este depósito proceden del procesado del *manto piritoso* que se explotaba en la mina Brunita, por parte de la empresa Eloy Celdrán S.A. El mineral, correspondiente al llamado *segundo manto* era predominantemente piritoso, y con un

contenido superior de blenda frente a la galena. Las leyes oscilaban entre el 20 y el 30% de S, con el 1,5% de Pb y el 3% de Zn, como valores medios (Faz *et al.*, 2003b).

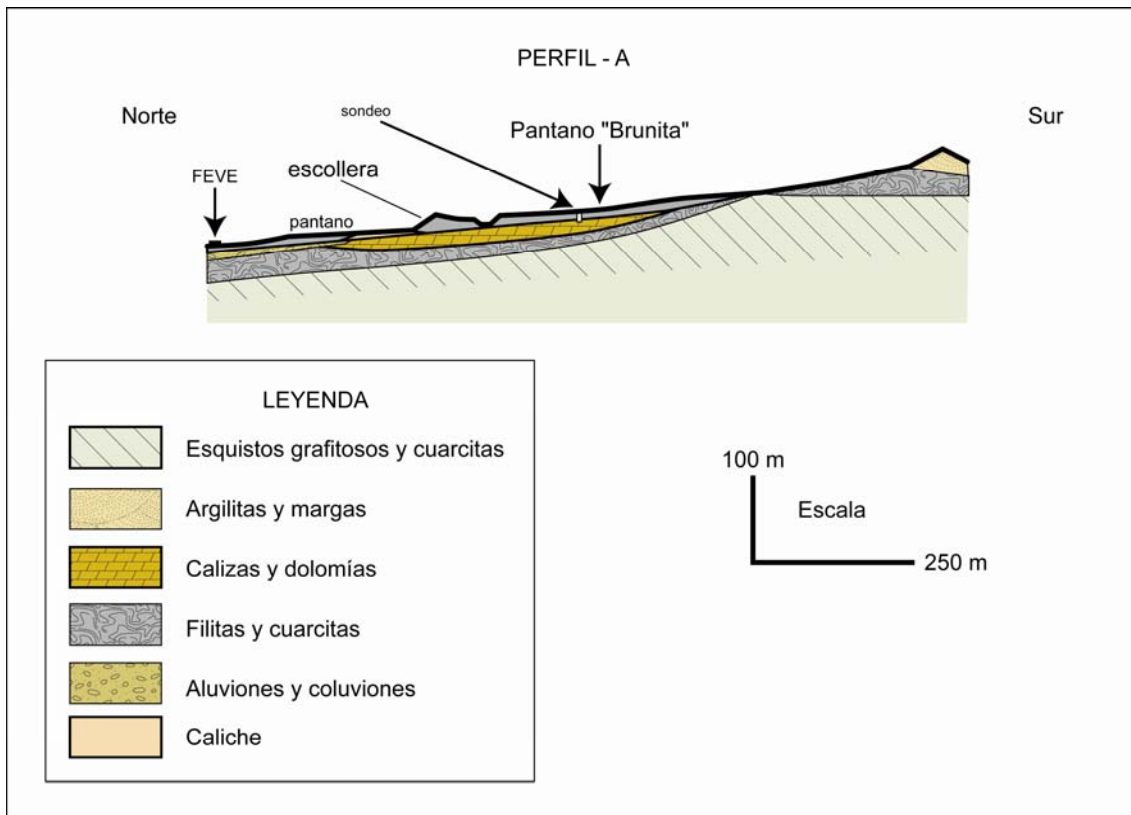


Figura 5. 21. Perfil geológico con dirección E-O sobre el depósito de estériles “Brunita” (Faz *et al.*, 2003b).

## Evolución histórica del depósito

El lavadero “Brunita” fue construido, al igual que otros importantes lavaderos de la Sierra Minera, entre los años 1940 y 1952, propiedad de Eloy Sánchez Celdrán. En este pequeño lavadero, se procesaban, por flotación diferencial, los minerales procedentes de la mina Eloy y Brunita. La mina “Brunita” explotaba el *primer manto* y la mina Eloy explotaba el *segundo manto* (Apartado 5.2.1).

El lavadero “Brunita” estaba especializado en el procesamiento de minerales para la obtención de pirita que se vendía en su totalidad a la Compañía Nacional de Explosivos Río Tinto.



Al igual que en el depósito de estériles “El Lirio”, el depósito “Brunita” se consolida como estructura sedimentaria tipo depósito de lodos en el año 1956.

En año 1972, después de la rotura del depósito por las fuertes lluvias, se inician obras de consolidación, con la construcción de una barrera de materiales de escombrera de granulometría grosera, mientras que, de forma simultánea, los lodos eran derivados a un nuevo depósito de carácter temporal y de menor envergadura.

Hasta el año 1981, el ritmo de explotación y procesamiento de mineral, se caracteriza por ser estable y productivo. Sin embargo, en este año se presenta un expediente de crisis que da lugar al cese de la actividad minera de Eloy Sánchez Celdrán y también la interrupción definitiva de los vertidos al depósito “Brunita”.

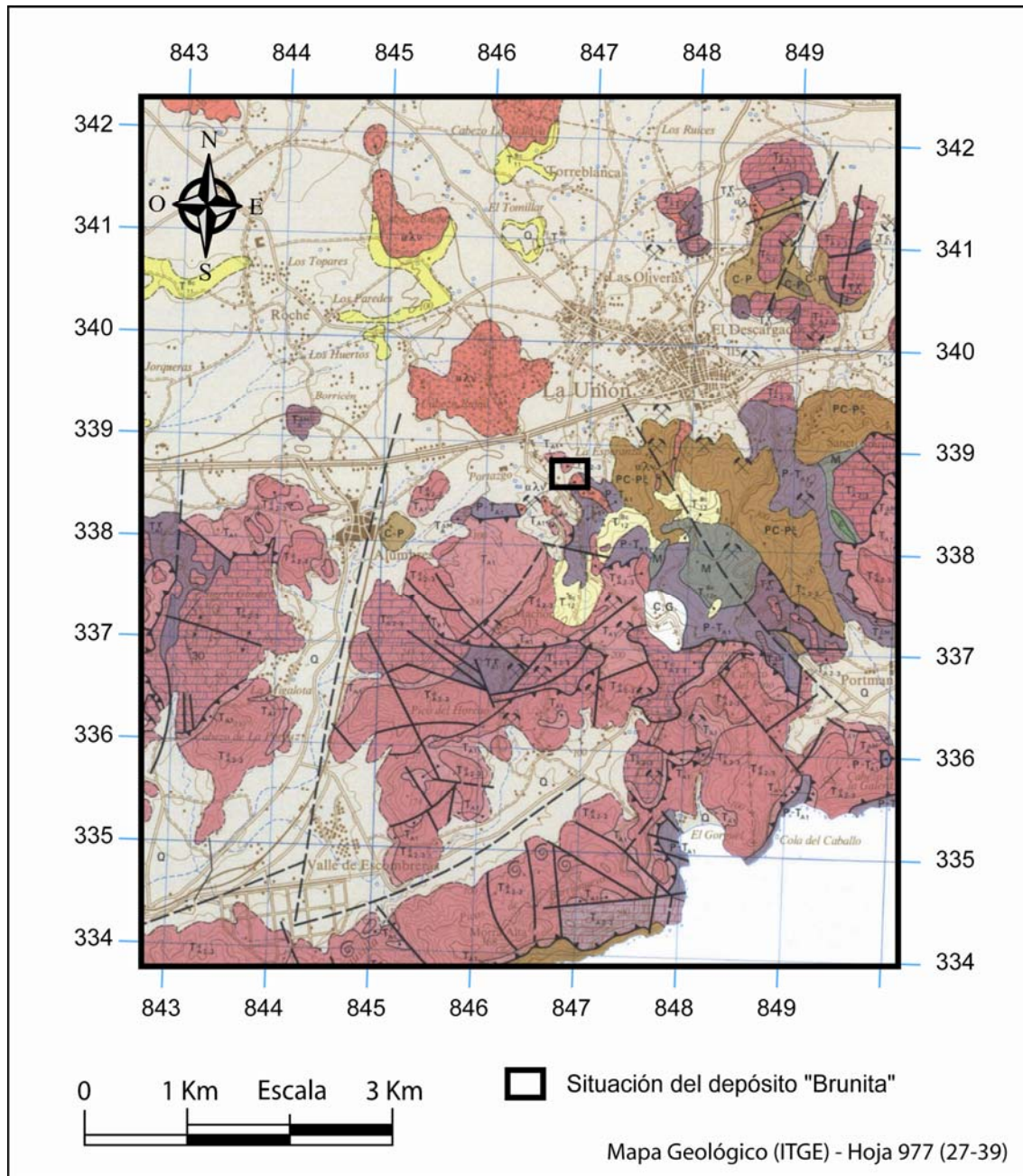


Figura 5. 22. Mapa geológico de los alrededores del depósito de estériles “Brunita” (I.T.G.E., 1993b).

### 5.3 Balsas de almacenamiento de purines

#### 5.3.1 Grupo de Fuente-Alamo

Este grupo de balsas de purines se encuentran en el paraje de Los Palillos, cerca de Las Cuevas de Reylo, en el término municipal de Fuente-Álamo, al Sureste de la Región de Murcia (Figura 5.1). El grupo está formado por cuatro balsas independientes

separadas entre sí por caballones de material extraído del propio vaso de la balsa y compactado con el cazo de la excavadora tanto en el talud interno como el talud externo para asegurar la estanqueidad lateral (Figura 5.23 y Foto 5.3). No están impermeabilizadas artificialmente. A continuación, pasamos a describir geológica, hidrogeológica, geomorfológicamente, etc., de forma breve, la zona donde se ubican.

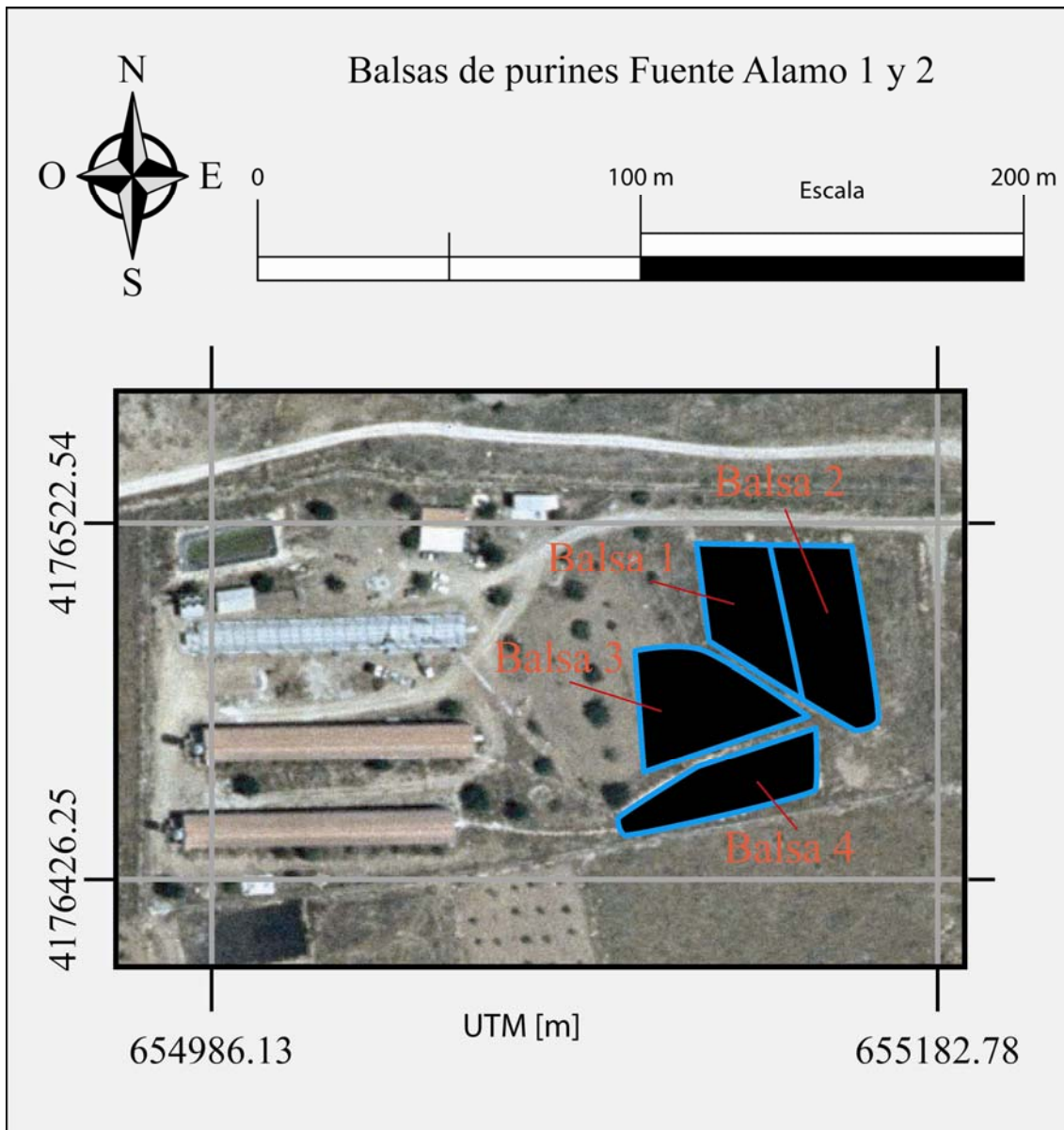


Figura 5. 23. Grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).



Foto 5. 3. Vista general de la granja porcina de Fuente-Álamo (Murcia).

## Geología

Esta zona de estudio se encuentra sobre la cuenca neógena del Campo de Cartagena (Figura 5.24) caracterizada por una depresión de 1 500 km<sup>2</sup> rellena por un potente paquete margoso de más de 1 000 m que presenta intercalaciones de conglomerados (hasta 300 m en el Tortonense), calizas (hasta 200 m en el Andaluciense) y areniscas (hasta 50 m en el Plioceno).

La comarca geográfica del Campo de Cartagena tiene la peculiaridad de constituir una unidad geológica, geomorfológica, hidrológica e hidrogeológica. El Campo de Cartagena es una región natural, geográficamente muy bien definida. Por el noroeste está separada de la depresión de las vegas del Segura-Guadalentín mediante la alineación montañosa de Sierra de Carrascoy-Sierra Puerto de la Cadena, con relieves comprendidos entre 500 y 600 m. Su parte meridional limita con la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, con cotas topográficas que en el oeste pueden alcanzar los 713 m.

En el extremo suroccidental, interrumpen la monotonía de la llanura del Campo de Cartagena las sierras de Los Victorias y Gómez.

Existe más de una veintena de ramblas, frecuentes en el clima árido del sureste español, que presentan cauces anchos y planos y recorridos cortos y sinuosos. Estas ramblas recogen las aguas en las épocas de lluvia y las vierten fundamentalmente al Mar Menor.

Desde el punto de vista geomorfológico, el Campo de Cartagena se presenta como una amplia cubeta en declive general hacia el Mar Menor; su parte N y NO presenta un relieve generalmente en cuestas, mientras que en la sierras meridionales, la compartimentación y los hundimientos dan lugar a caracteres de disección y asimetría muy particulares, que han condicionado el cambio de trazado en la red fluvial.

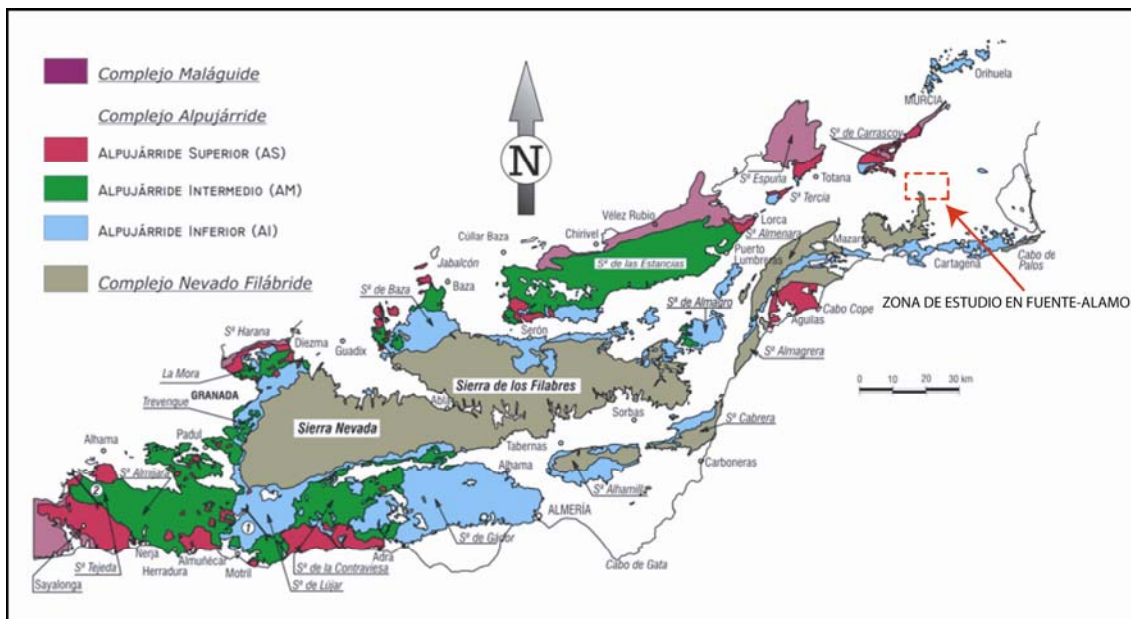


Figura 5. 24. Zona de estudio de las balsas de purines de Fuente-Álamo (Vera, 2004).

El Campo de Cartagena está asentado sobre la Zona Bética y en él están representados los tres complejos tectónicos en que se subdivide y que constituyen sendos mantos de corrimiento: Nevado-Filábride, Alpujárride y Maláguide (Figura 5.24). Todos ellos están formados básicamente por un tramo inferior esquistoso de micaesquitos, cuarcitas, gneises y yesos del Paleozoico y sobre él otro carbonatado de dolomías, calizas o mármoles del Trías. La estructura interna de estos complejos es de cabalgamientos y mantos de corrimiento superficiales en su cobertura permo-triásica

con vergencias Norte-Sur (Rodríguez-Estrella, 2000). Como se ha comentado anteriormente, el Campo de Cartagena se trata de una de las depresiones interiores postectónicas de las Cordilleras Béticas ocupada por un potente relleno neógeno (Mioceno) que descansa sobre un sustrato metamórfico. Los terrenos más modernos corresponden al Cuaternario de limos, gravas, arcillas, conglomerados y caliches (50 m) (Figura 5.25 y Figura 5.26).

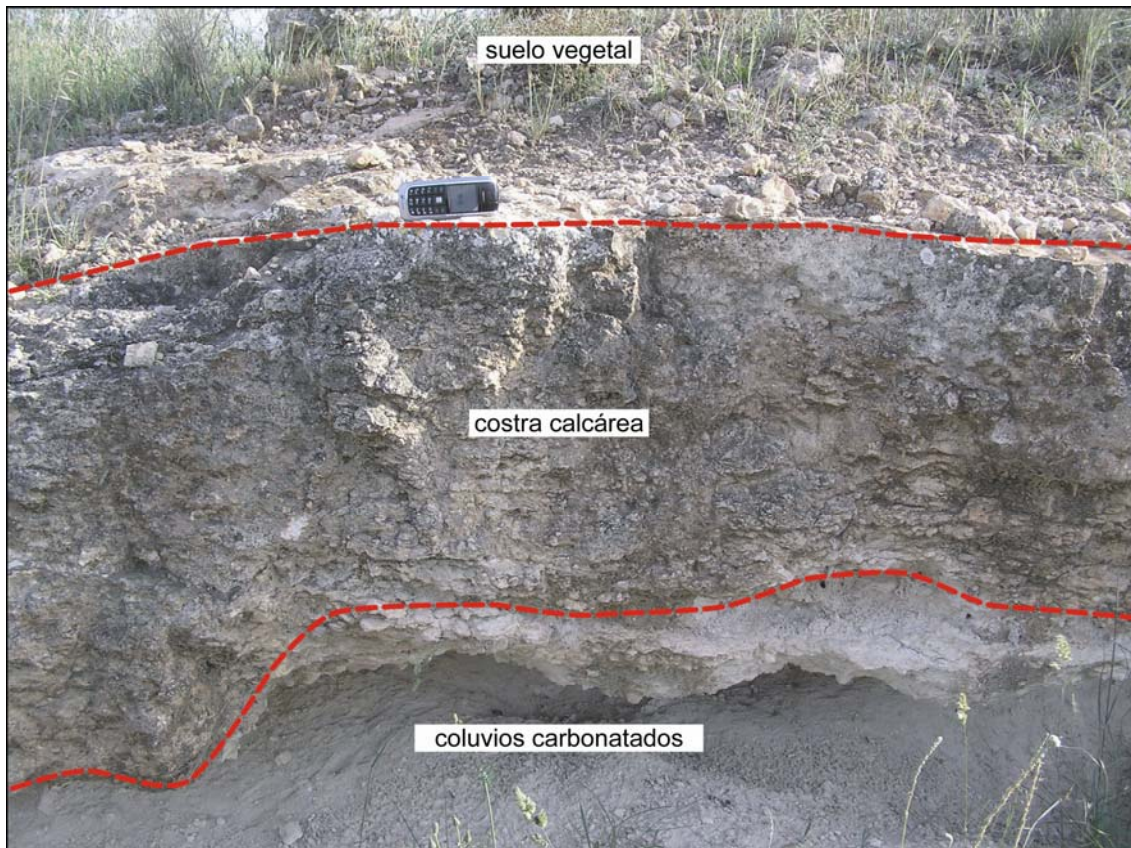


Foto 5. 4. Detalle de la geología superficial próxima al grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).

Desde un punto de vista edafológico, la unidad taxonómica predominante en este área es el *Haplocalcid* (U.S.D.A., 2003) donde se presenta un horizonte de acumulación de carbonato cálcico (horizonte cálcico) que pertenece a un suborden *Calcids* que engloba a aquellos suelos que presentan horizontes de acumulación o de cambio (Arranz, 1999). También aparece asociado el suelo a inclusiones clasificadas como *Petrocalcids* con horizontes petrocálcicos o costras calizas (Foto 5.4).

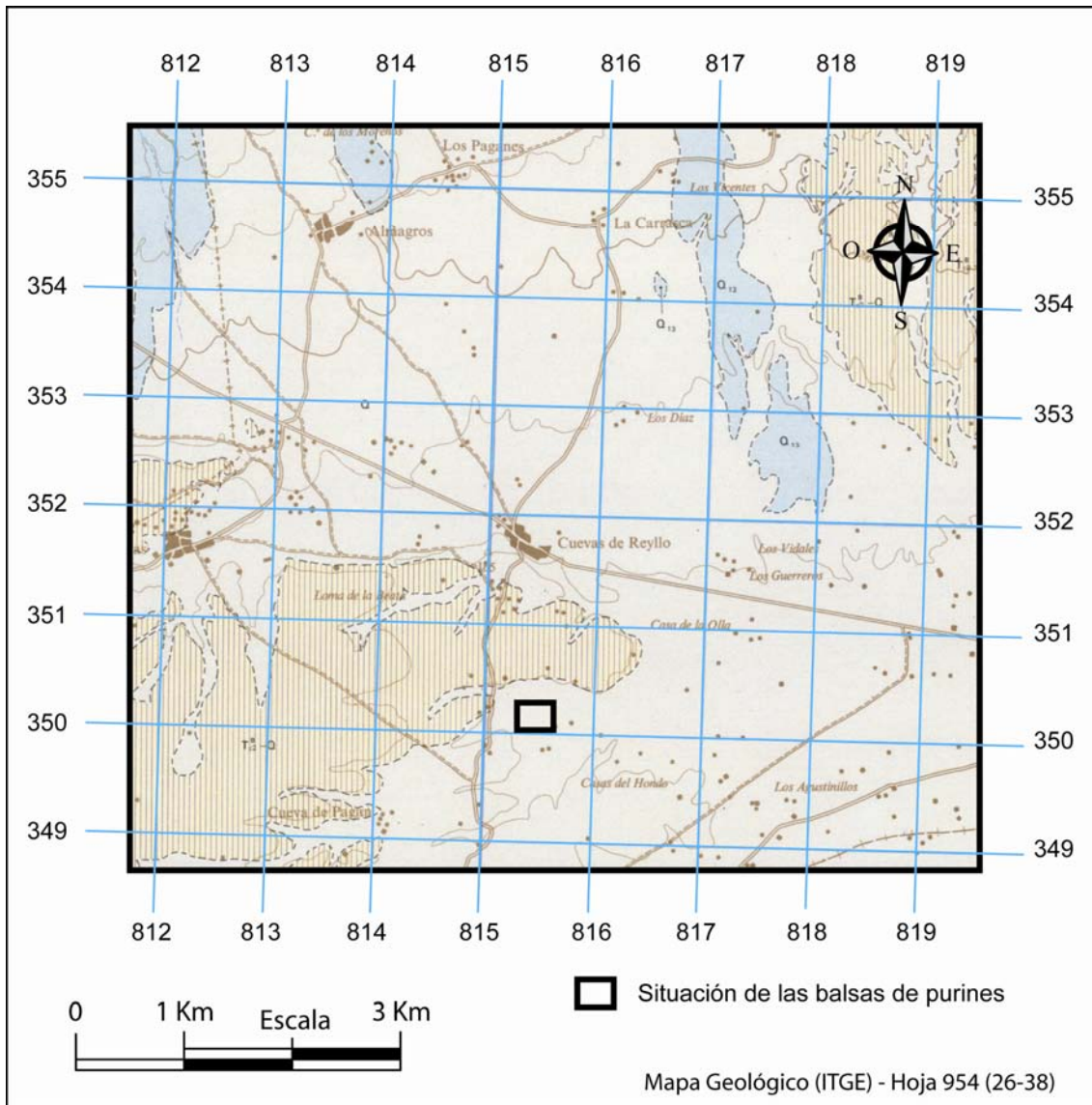


Figura 5. 25. Geología del entorno de las balsas de purines de Fuente-Álamo (I.T.G.E., 1993c).

## Hidrogeología

En la unidad hidrogeológica del Campo de Cartagena (Figura 5.7) se han definido seis acuíferos, que son los siguientes: Triásico de los Victorias, Tortoniense, Andaluciense, Plioceno, Cabo Roig (con roca permeable del Plioceno) y Cuaternario. El Plioceno de Cabo Roig está desconectado hidráulicamente con el resto del Campo de Cartagena por la Falla del Río Seco, de más de 100 m de salto. Todos ellos están desconectados mediante fallas costeras (geológica e hidrogeológicamente) con el Mar Menor, a excepción del acuífero Cuaternario; el acuífero de Cabo Roig está conectado con el Mar Mediterráneo.

El funcionamiento hidrogeológico, por sectores, de todo el Campo de Cartagena (Figura 5.7) ha sido descrito con detalle por Rodríguez-Estrella (1995). La conexión hidráulica entre acuíferos superpuestos (Andaluciense, Plioceno, Cuaternario), que en principio no se deberían producir al estar separados por potentes tramos de materiales del Neógeno, se lleva a cabo como consecuencia de la ejecución de sondeos que han sido realizados sin aislar mediante cementación los acuíferos superiores de peor calidad, con lo que se ha producido una alimentación y consecuentemente una contaminación progresiva de los acuíferos profundos que tenían inicialmente buena calidad. No obstante en los últimos años, generalmente, las perforaciones captan el acuífero del Andaluciense y ya efectúan las cementaciones pertinentes (Rodríguez-Estrella, 2000).

Otro tipo de relación hidráulica es la que se produce, mediante discordancia, entre los acuíferos del Plioceno y el Andaluciense con el del Triásico, a través de estructuras de horst tectónico.

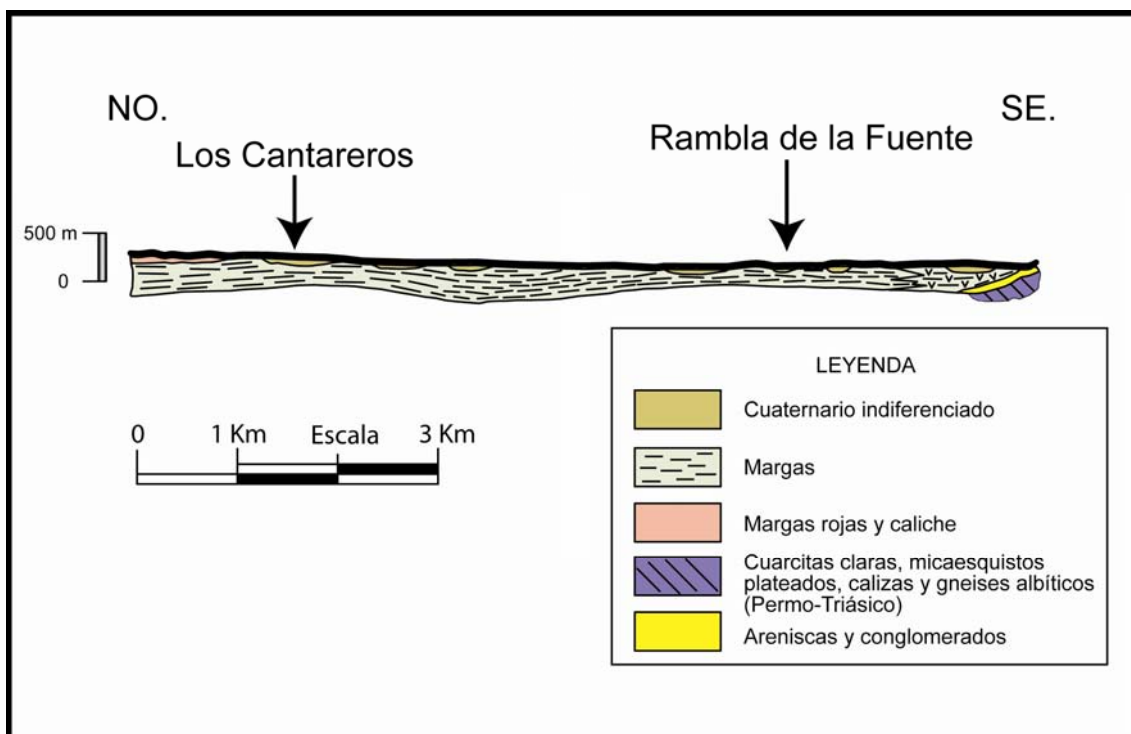


Figura 5. 26. Sección geológica de la zona de estudio (I.T.G.E., 1993c).

Se describen, en los siguiente subapartados, los acuíferos del Campo de Cartagena, haciendo especial hincapié en el acuífero Cuaternario por ser éste sobre el que se sitúan las balsas de purines de este grupo.



### Acuífero Triásico de los Victorias

Se sitúan al Norte de las sierras de Los Victorias y Los Gómez, tiene una extensión de 101 km<sup>2</sup>. Está constituido por rocas permeables constituidas por paquetes de 50 metros de mármoles triásicos pertenecientes al Nevado-Filábride (sólo afloran en 1 km<sup>2</sup>); el zócalo impermeable de base son los esquistos del Paleozoico. Presenta una estructura en horst, pues viene definido por fallas normales de gran salto. Debido a la compartimentación geológica interna (entre -10 y -180 m); pero a pesar de ello se advierte un flujo generalizado de SO a NE (gradiente entre 1 y 10 %), provocado por las explotaciones. Las aguas de este acuífero son del tipo sulfatado-clorurado mixto con una salinidad de entre 2 000 y 3 500 mg/L.

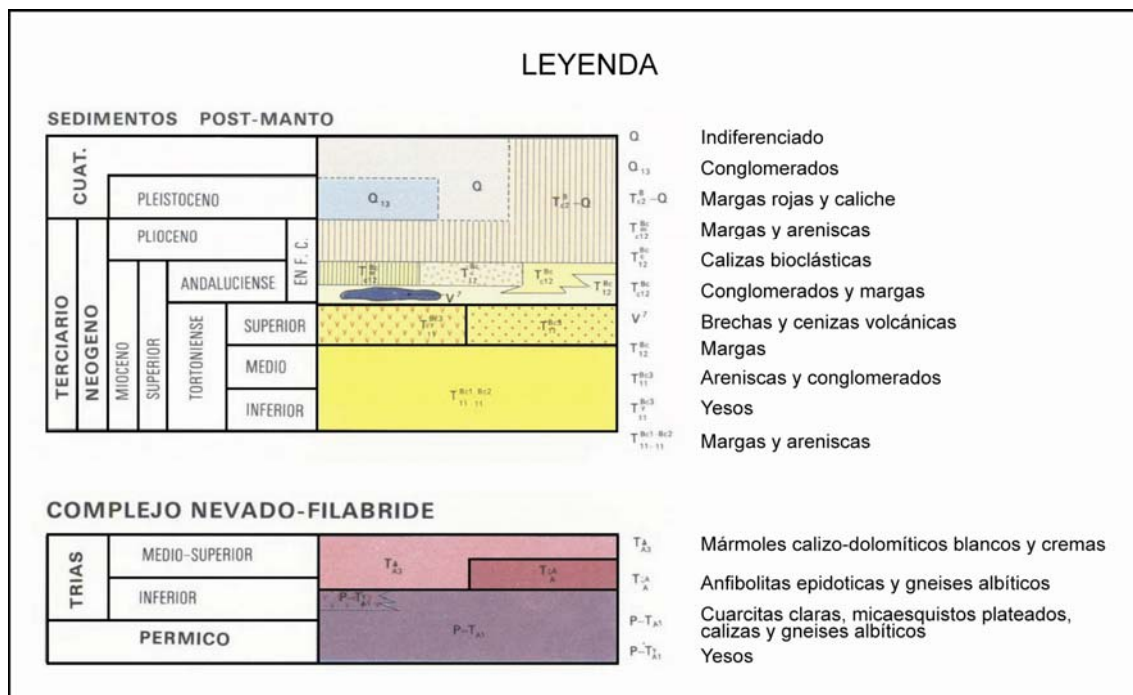


Figura 5. 27. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.25 (I.T.G.E., 1993c).

### Acuífero Tortoniense

Aflora en el norte del Campo de Cartagena, en su sector occidental, está constituido por 200 metros de conglomerados poligénicos con intercalaciones de areniscas; en el sector oriental se produce un cambio de facies, con un predominio de las areniscas sobre los conglomerados, al tiempo que la potencia disminuye hasta los 150 metros. El zócalo impermeable lo constituyen materiales margosos del Mioceno superior.

La piezometría está comprendida entre 370 m.s.n.m. y 282 m.s.n.m., apreciándose un flujo de SO-NE y presenta una salinidad comprendida entre 560 y 930 mg/L y facies hidroquímicas del tipo mixta-mixta a bicarbonatada mixta (Rodríguez-Estrella, 2000).

#### Acuífero Andaluciense

Aflora sólo en el norte y oeste del Campo de Cartagena (Figura 5.7), presenta una litología bastante homogénea a base de calizas bioclásticas o calcarenitas, exceptuando la zona de los afloramientos más septentrionales que está representada por materiales de naturaleza más detrítica, constituidos por areniscas, arenas y arcillas. El espesor, en su mayor parte, está en torno a los 125 m y el zócalo impermeable es el Tortoniense margoso y el de techo el Andaluciense margoso. El acuífero tiene una extensión de 570 km<sup>2</sup> de los cuales, 28 km<sup>2</sup>, corresponden a afloramientos permeables.

Las aguas presentan una salinidad entre 1 000 y 3 000 mg/L, incrementándose a valores superiores a 3 000 mg/L en la franja costera. Predomina la facie hidroquímica clorurada-sulfatada mixta o sódica, aunque para las aguas de menor salinidad son del tipo clorurada-bicarbonatada mixta.

#### Acuífero Plioceno

Es el tramo permeable del Plioceno, aflora al norte y al oeste del Campo de Cartagena, está constituido por un espesor medio de 75 m de areniscas, que se mantiene bastante homogéneo. El impermeable de base es el Andaluciense margoso y el de techo el Plioceno margoso. Limita al norte por afloramientos o subafloramientos del impermeable de techo; por el sur está abierto, a través de una conexión hidráulica con las sierras de La Unión; en el oeste, por la falla oriental del horst de Los Victorias y en el este está el Mar Mediterráneo. La superficie estimada es de 817 km<sup>2</sup>, de los cuales 22 km<sup>2</sup> corresponden a afloramientos permeables.

La calidad química es cada vez mejor debido a la influencia de las aguas del Trasvase Tajo-Segura. Los valores menores de salinidad se localizan en la zona noroeste (1 000 a 4 000 mg/L), siendo los más elevados los encontrados entre Torre

Pacheco y Los Alcázares, con valores comprendidos entre 4 000 mg/L y 6 000 mg/L. El tipo de agua predominante varía de clorurada-sulfatada sódico-magnésica a catiónica mixta, si bien las aguas de salinidad inferior a 2 000 mg/L es mixta, pudiendo llegar en las franjas costeras a clorurada sódica. El ión cloruro sobrepasa el máximo permitido (Rodríguez-Estrella, 2000).

#### Acuífero Cabo Roig

Las rocas permeables e impermeables son idénticas a las descritas para el acuífero Plioceno; presenta un espesor de 70 m. Por el norte, el límite coincide con la falla de San Miguel de Salinas, por el sur, con la falla de Río Seco y por el oeste, con el impermeable de base. En el este está el Mar Mediterráneo. El acuífero presenta una extensión estimada de 61 km<sup>2</sup>.

Su salinidad supera los 7 000 mg/L en Punta Prima y los menores valores corresponden al paraje de El Convento con valores en torno a 509 mg/L. la facie hidroquímica evoluciona a clorurada sódica.

#### Acuífero Cuaternario

Las rocas permeables están constituidas por gravas, arenas, limos, arcillas y caliches; el impermeable de base es diferente según los sectores, pero generalmente lo constituyen las margas del Terciario (INGEOMUR, 2002). El espesor no suele alcanzar los 50 m, a excepción de zonas próximas a la costa en las que llega hasta 150 m. Las profundidades a las que se encuentra este acuífero van desde los 50-60 m hasta más de 100 m al Sur de la Sierra de Carrascoy.

En general sus límites lo constituyen los materiales impermeables del Bético y del Terciario que afloran en los bordes del Campo de Cartagena. La superficie es de 1 135 km<sup>2</sup>, que puede considerarse como afloramientos permeables.

La salinidad es en general mayor de 2 000 mg/L y sobrepasa con bastante frecuencia los 4 000 mg/L aún en zonas alejadas del mar. Los mayores valores se dan próximos a la costa y más concretamente en la zona de los límites provinciales entre

Alicante y Murcia y en las poblaciones litorales de Los Alcázares y Los Urrutias, ello es debido a que el flujo subterráneo genera una lixiviación salina de los suelos. Las facies aniónicas predominantes son clorurada-sulfatada a clorurada y la catiónica sódico-cálcica a mixta.

Es interesante hacer notar que esta unidad hidrogeológica se encontraba sobreexplotada en su conjunto hasta la llegada de las aguas del trasvase Tajo-Segura, el cual ha incidido favorablemente en esta problemática al posibilitar un doble efecto: descenso del volumen extraído de agua subterránea e infiltración de excedentes de riego lo que ha supuesto un ascenso generalizado, desde principios de los años 80, de los niveles piezométricos, a excepción del acuífero de Los Victorias que continua sobreexplotado. Sin embargo en los últimos años debido a la sequía que padece la cuenca del Segura y a las reducciones del trasvase se han incrementado los bombeos subterráneos, por lo que se ha empezado de nuevo a detectar algunos descensos de los niveles piezométricos (Aragón, 1999).

La zona de estudio de Fuente-Álamo se encuentra dentro del dominio de este acuífero cuaternario.

## **Relieve**

El Campo de Cartagena está constituido por una depresión interior, situada entre elevaciones montañosas. Constituye una amplia llanura de suaves pendientes y pequeños encajamientos que se extiende, como un gran plano inclinado, desde los relieves monoclinales de Villoria, Miravieja y Altaona, hasta las orillas del Mar Menor, gran albufera cerrada al mar por el cordón litoral de la Manga. Como se ha comentado en el subapartado anterior, está cubierta por materiales más modernos y su disposición horizontal o subhorizontal, algo alterada en las márgenes por esfuerzo tectónicos recientes le confieren su morfología característica.

El encajamiento de la red de drenaje con sus procesos incisivos, actúa eficazmente sobre los materiales más blandos, dando lugar a formas de abarrancamiento acusadas (cárcavas, surcos, etc.).

## Climatología y Vegetación

Las características climáticas del Campo de Cartagena son las mismas que las comentadas para la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Apartado 5.2.1) ya que están determinadas por la posición geográfica de la Región de Murcia en el levante peninsular. Según su ombrótipo o, intervalo de precipitaciones, el Campo de Cartagena está considerado como semiárido con un precipitación media anual comprendida entre los 150 y los 400 mm. Según la clasificación de las zonas climáticas, en que se divide a la Región de Murcia, se encuadra en la “*zona litoral y sublitoral cálida y árida*” que viene caracterizada por el predominio de temperaturas medias superiores a 16 °C y unas precipitaciones escasas, en general, por debajo de los 330 mm. La termicidad es muy acusada, especialmente cerca de la costa, pudiendo estar ausentes las heladas, por lo que se trata de una zona excepcional desde el punto de vista agrícola (Alcaraz *et al.*, 1999).

El Campo de Cartagena pertenece al termótipo “*Termomediterráneo Superior*” que se caracteriza por presentar heladas entre los meses de diciembre y febrero. En él perviven numerosas especies termófilas como *Chamaerops humilis*, *Osyris vulgare*, *Aristida coerulescens*, *Thymus hyemalis*, *Arisarum vulgare*, *Asparagus albus*, *Eragrostis papposa*, *Heteropogon contortus*, etc. Este horizonte presenta dos importantes penetraciones hacia el interior regional siguiendo los cauces de los ríos Segura y Mula. Supone el límite térmico de algunos cultivos de amplia tradición en las huertas murcianas, como el limonero. El índice de termicidad, para el termótipo Termomediterráneo Superior, se encuentra entre 351 y 401.

La zona del grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo se encuentra en la serie termomediterránea murciano-almeriense semiárida inferior del azufaifo (*Ziziphus lotus*) o *Zizipheto loti* S. Esta serie está representada en llanos, en general rodeados de elevaciones, y ramblas abiertas, correspondientes a un ombrótipo semiárido inferior dentro del piso termomediterráneo. Esta serie puede penetrar hasta el horizonte superior del piso termomediterráneo, pudiendo resistir heladas moderadas entre diciembre y marzo, época en la que es posible observar los azufaios rodeados de escarcha a primera hora de la mañana.

Los substratos en las que se asienta la serie están integrados por sedimentos coluviales y aluviales finos o medianos, procedentes de los relieves circundantes, y a veces la capa freática, frecuentemente situada a cierta profundidad, puede ser alcanzada por los potentes sistemas radicales del azufaifo.

El *Ziziphetum loti* suele ser un espinar abierto que ha pervivido en los taludes y separaciones de cultivos, así como en los cauces de algunas ramblas de sedimentos no muy gruesos y cauce amplio. Se trata de un matorral dominado por azufaifos, bajo cuyo manto espinoso protector prosperan muy pocas especies, destacando las esparragueras blancas (*Asparagus albus*), *Withania frutescens*, *Rhamnus lycioides*, *Ballota hirsuta* y *Piptatherum miliaceum*.

Por degradación más acentuada se instalan pastizales, generalmente representados por la raza muciano-almeriense de los albardinales ibero-levantinos (*Dactylo hispanicae-Lygeetum sparti*), más ocasionalmente por espartales (*Lapiedro martinezii-Stipetum tenacissimae*).

Los lastonares (*Teucrio pseudochamaepitys-Brachypodietum retusi subass. Avenuletosum murcicae*) no suelen tener demasiada extensión, siendo más comunes diversos tipos de matorrales (*Orden Anthyllidetalia terniflorae*) y muy variadas comunidades de carácter más o menos nitrófilo, como pastizales de *Stipa capensis*, triguerales (*Dittrichio viscosae-Piptatheretum miliacei*) y los herbazales subnitrófilos endémicos de la alianza *Carrichtero annuae-Amberboion lippii*.

### **5.3.2 Grupo de Lorca**

El grupo de balsas de Lorca, denominadas Lorca 1 y Lorca 2 (Figura 5.28), se encuentran en la pedanía de Purias (Lorca) (Figura 5.1). El Municipio de Lorca se encuentra en la parte suroccidental de la Región de Murcia. Lorca 1 es una balsa de purines individual sin impermeabilización artificial. Su construcción consistió en excavar la superficie hasta descender su base a la profundidad establecida, por lo tanto no son necesarios los caballones. Es ante todo una balsa de almacenamiento de purín antes que una balsa de evaporación propiamente dicha, debido a la importante

profundidad que presenta el purín (50-60 cm). Se debe realizar periódicamente su vaciado con el empleo de cubas de transporte. Lorca 2 son dos balsas de purín, también sin impermeabilización artificial en las que existen caballones para contener el purín en su interior (Figura 5.33).

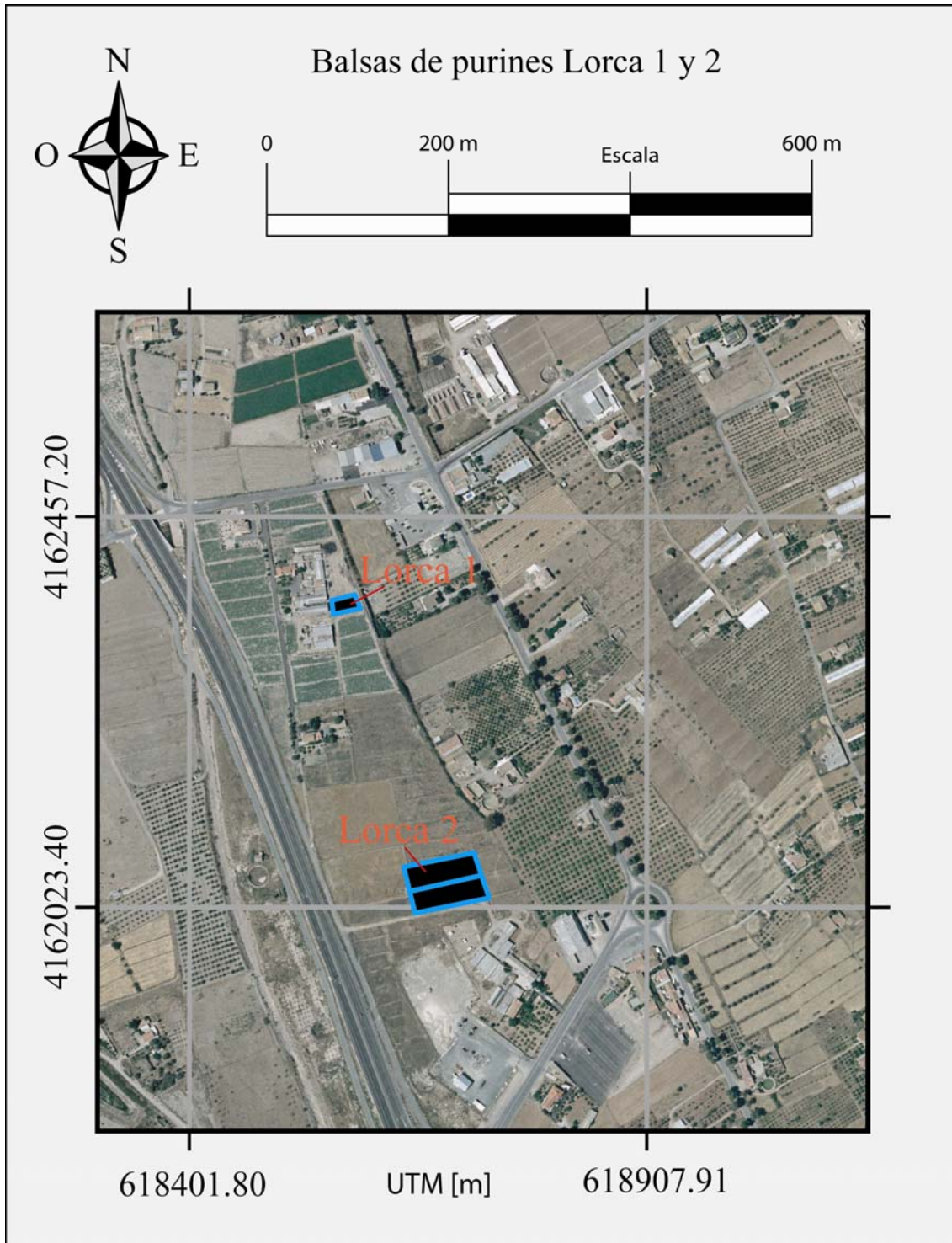


Figura 5. 28. Grupo de balsas de purines de Lorca.

Estas últimas balsas si se ajustan al tipo de balsa de evaporación, donde sus dimensiones favorecen la evaporación de la parte líquida para la obtención del estiércol sólido que será empleado como enmienda orgánica en terrenos de cultivo.

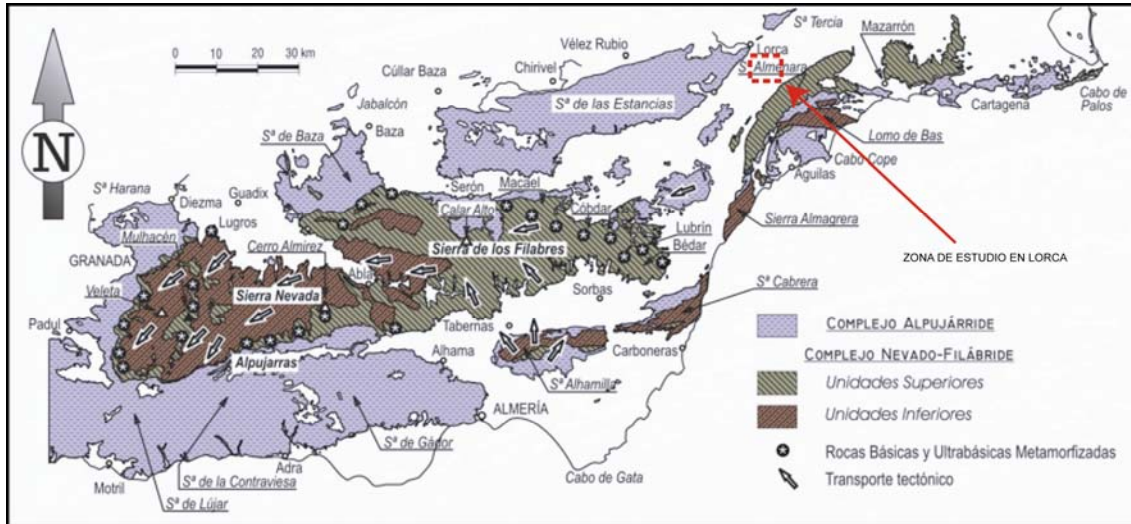


Figura 5. 29. Zona de estudio de las balsas de purines de Lorca (Vera, 2004).

## Geología

La zona donde se asientan las balsas de purines de Lorca (Figura 5.29 y Figura 5.30) es un valle fluvial, denominado Valle del Guadalentín. Este sector comprendido entre Lorca y Puerto Lumbreras está enclavado dentro de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas. Con posterioridad a la fase compresiva principal que estructuró la Cordillera durante el Mioceno inferior-medio, se superpuso en este conjunto alpino, en general y en la región estudiada en particular, una cinemática distensiva que posibilitó el desarrollo de las cuencas miocénicas más o menos restringidas. La comarca natural del Guadalentín está individualizada por la acción de dos grandes zonas de fracturación que la bordean y que ha posibilitado una subsidencia diferencial durante el Plóo-Cuaternario y la conservación de potentes espesores de materiales aluviales depositados en esta edad. Estos afloramientos cuaternarios los forman hasta 300 metros de gravas, arenas y limos (Rodríguez-Estrella, 1987).

En las sierras que bordean el valle aparecen materiales correspondientes a los tres grandes dominios dentro de las Zonas Internas (Figura 5.29):



- Complejo Nevado-Filábride de las Sierras de Almenara y el Cantal (donde afloran los materiales más internos de la Región de Murcia).
- Unidades Intermedias de la Sierra de Enmedio.
- Complejo Alpujárride de las Sierras de Las Estancias y de la Tercia.

Los materiales representados bajo el relleno Plio-Cuaternario pertenecen fundamentalmente al Nevado-Filábride (Figura 5.32).

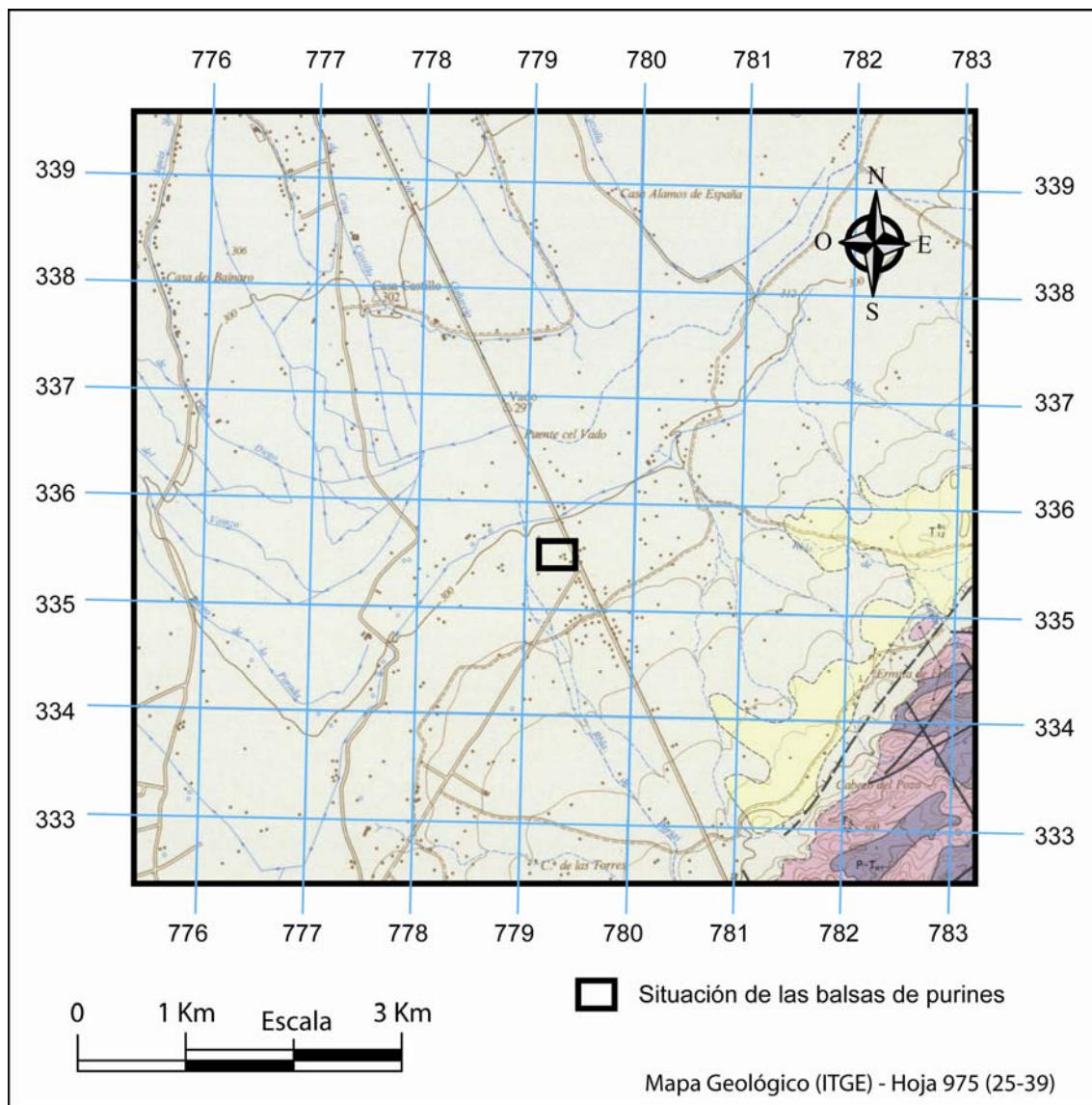


Figura 5. 30. Geología del entorno de las balsas de purines de Lorca (I.T.G.E., 1993d).

Desde un punto de vista edafológico, la unidad taxonómica predominante en este área es el *Torrifluent* (U.S.D.A., 2003), caracterizada por suelos de vega y de huerta.

## Hidrogeología

Desde el punto de vista hidrogeológico, dentro del Valle del Guadalentín pueden diferenciarse el Alto y el Bajo Guadalentín, por presentar algunas características diferentes.

En el Alto Guadalentín (tramo comprendido entre la Sierra de Enmedio y la carretera Lorca-Aguilas) el acuífero se presenta como un tramo detrítico permeable único de arenas y gravas con alta transmisividad.

El Bajo Guadalentín, por el contrario, presenta una serie de intercalaciones margosas dentro del complejo detrítico que, si bien en su conjunto se puede considerar como único sistema acuífero, las relaciones entre los distintos tramos permeables resulta difícil de establecer en cada caso, de cualquier manera, el Bajo Guadalentín presenta peores características hidráulicas que el Alto (Rodríguez-Estrella, 1987).

La zona de estudio de Lorca pertenece al Alto Guadalentín (Figura 5.7).

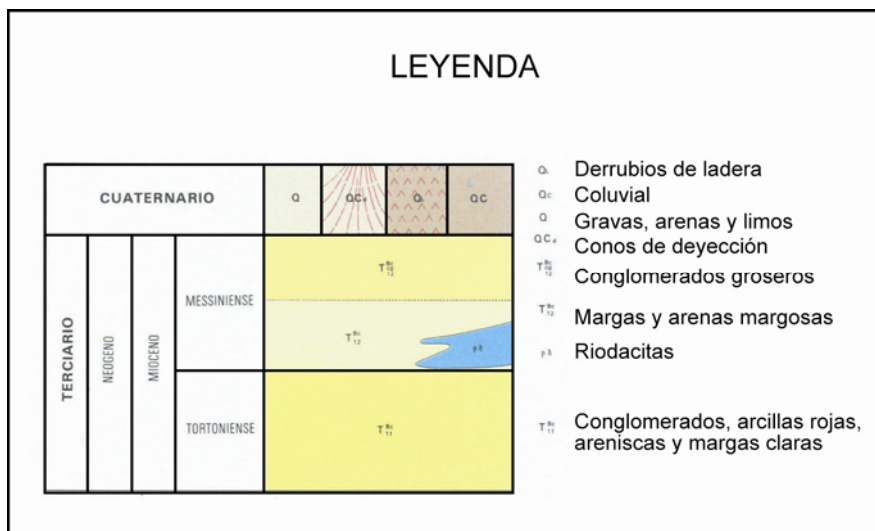


Figura 5. 31. Leyenda para los materiales que aparecen en la Figura 5.30 (I.T.G.E., 1993d).

## Relieve

El Valle del Guadalentín, como su nombre indica representa un valle con entidad suficiente para constituir un paisaje propio. Este valle desciende desde Puerto

Lumbreras a Orihuela con una pérdida aproximada de 450 m en altura. Su llanura de inundación, de gran amplitud, representa un área de peligrosidad en épocas excesivamente lluviosas.

## Climatología y Vegetación

El Valle del Guadalentín pertenece al termotipo “*Termomediterráneo Superior*” que se caracteriza por presentar heladas entre los meses de diciembre y febrero. En él perviven numerosas especies termófilas como *Chamaerops humilis*, *Osyris vulgare*, *Aristida coerulescens*, *Thymus hyemalis*, *Arisarum vulgare*, *Asparagus albus*, *Eragrostis papposa*, *Heteropogon contortus*, etc. Este horizonte presenta dos importantes penetraciones hacia el interior regional siguiendo los cauces de los ríos Segura y Mula. Supone el límite térmico de algunos cultivos de amplia tradición en las huertas murcianas, como el limonero. El índice de termicidad, para el termotipo Termomediterráneo Superior, se encuentra entre 351 y 401.

La zona del grupo de balsas de purines del Valle del Guadalentín (Lorca) se encuentra en la serie termomediterránea murciano-almeriense semiárida inferior del azufaifo (*Ziziphus lotus*) o *Zizipheto loti* S. Esta serie está representada en llanos, en general rodeados de elevaciones, y ramblas abiertas, correspondientes a un ombrótipo semiárido inferior dentro del piso termomediterráneo. Esta serie puede penetrar hasta el horizonte superior del piso termomediterráneo, pudiendo resistir heladas moderadas entre diciembre y marzo, época en la que es posible observar los azufaios rodeados de escarcha a primera hora de la mañana.

Los substratos en los que se asienta la serie están integrados por sedimentos coluviales y aluviales finos o medianos, procedentes de los relieves circundantes, y a veces la capa freática, frecuentemente situada a cierta profundidad, puede ser alcanzada por los potentes sistemas radicales del azufaifo.

El *Ziziphetum loti* suele ser un espinar abierto que ha pervivido en los taludes y separaciones de cultivos, así como en los cauces de algunas ramblas de sedimentos no muy gruesos y cauce amplio. Se trata de un matorral dominado por azufaios, bajo cuyo

manto espinoso protector prosperan muy pocas especies, destacando las esparragueras blancas (*Asparagus albus*), *Withania frutescens*, *Rhamnus lycioides*, *Ballota hirsuta* y *Piptatherum miliaceum*.

Por degradación más acentuada se instalan pastizales, generalmente representados por la raza muciano-almeriense de los albardinales ibero-levantinos (*Dactylo hispanicae-Lygeetum sparti*), más ocasionalmente por espartales (*Lapiedro martinezii-Stipetum tenacissimae*).

Los lastonares (*Teucrio pseudochamaepitys-Brachypodietum retusi subass. Avenuletosum murcicae*) no suelen tener demasiada extensión, siendo más comunes diversos tipos de matorrales (*Orden Anthyllidetalia terniflorae*) y muy variadas comunidades de carácter más o menos nitrófilo, como pastizales de *Stipa capensis*, triguerales (*Dittrichio viscosae-Piptatheretum miliacei*) y los herbazales subnitrófilos endémicos de la alianza *Carrichtero annuae-Amberboion lippii*.

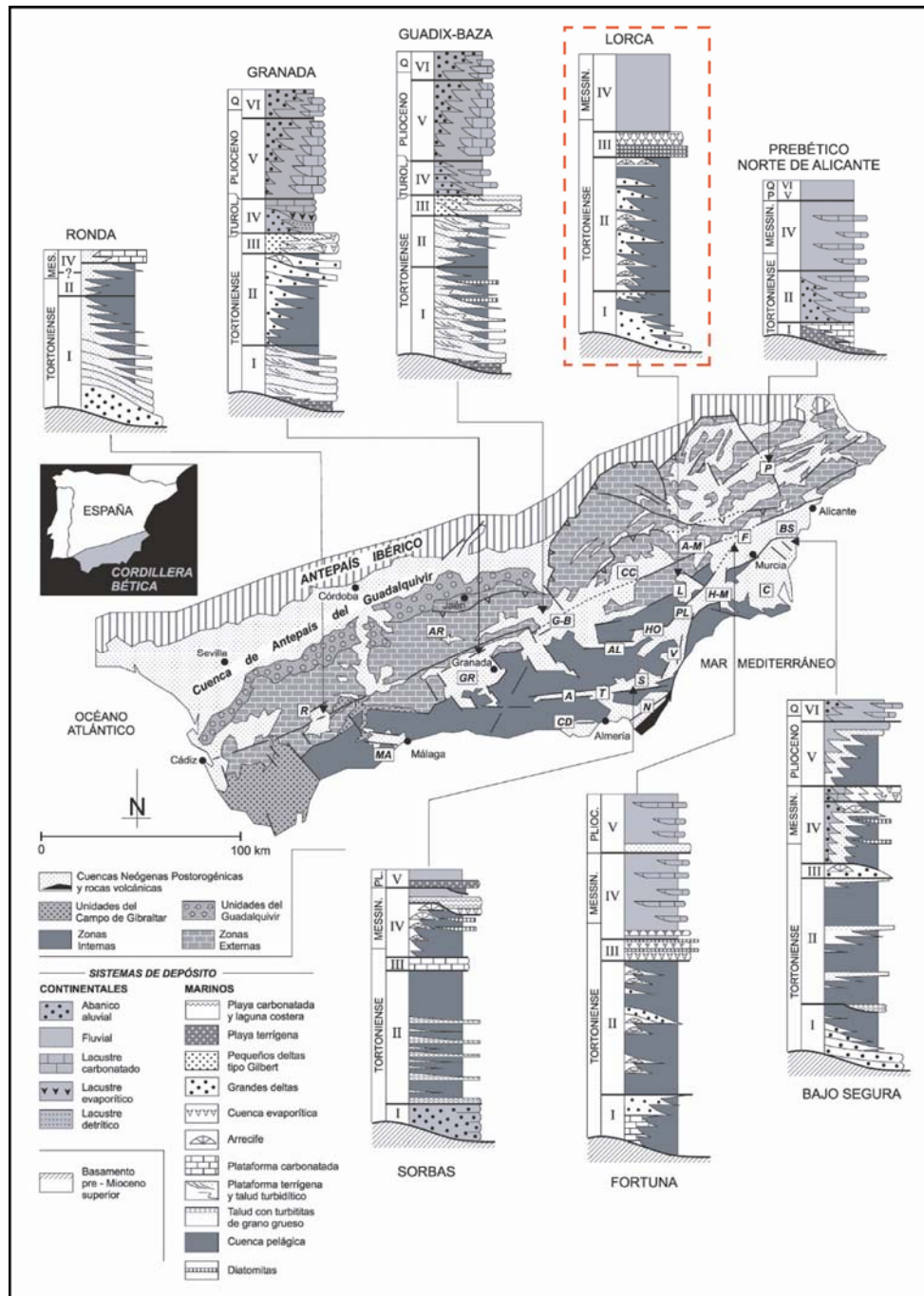


Figura 5. 32. Serie estratigráfica en la zona de Lorca (Vera, 2004).

### 5.3.3 El purín de cerdo

El purín de cerdo es el material residual generado en las explotaciones de ganado porcino, consistente en una mezcla acuosa de más del 90 % en volumen, de color oscuro, formado por las deyecciones sólidas y líquidas de los animales y el agua procedente de los abrevaderos y limpieza de los establos.

Según Lobera *et al.* (1998) consiste en una mezcla de heces y orina de cerdo, junto con restos de alimentos y de los propios animales (pelos y descamaciones, etc.), y una pequeña proporción de restos de la cama o yacija proveniente de la paridera (generalmente aserrín o virutas de madera); todo esto mezclado con agua procedente de la limpieza de las instalaciones ganaderas, pérdida de agua de los bebederos e incluso con agua proveniente de las precipitaciones.

Su composición es muy variable y dependerá del tipo de explotación (cebadero, maternidad o ciclo cerrado), tipo de alimentación y zona agroclimática.

El purín a diferencia de otro tipo de estiércol, al poseer una gran cantidad de agua, ocupa un gran volumen, por lo tanto su almacenamiento y transporte constituyen los principales problemas del ganadero (Atallah, 1993; McGechan *et al.*, 1998).

Según la guía de buenas prácticas ambientales (C.A.A.M.A. 2001), los requisitos mínimos exigibles a una estructura de almacenamiento son (Figura 5.33):

Características constructivas que garanticen la estanqueidad.

Tamaño que garantice el almacenamiento de 3 a 6 meses.

Fosa con una correcta impermeabilización natural o artificial.

Instalación de protecciones laterales que impida la entrada de elementos no deseados.

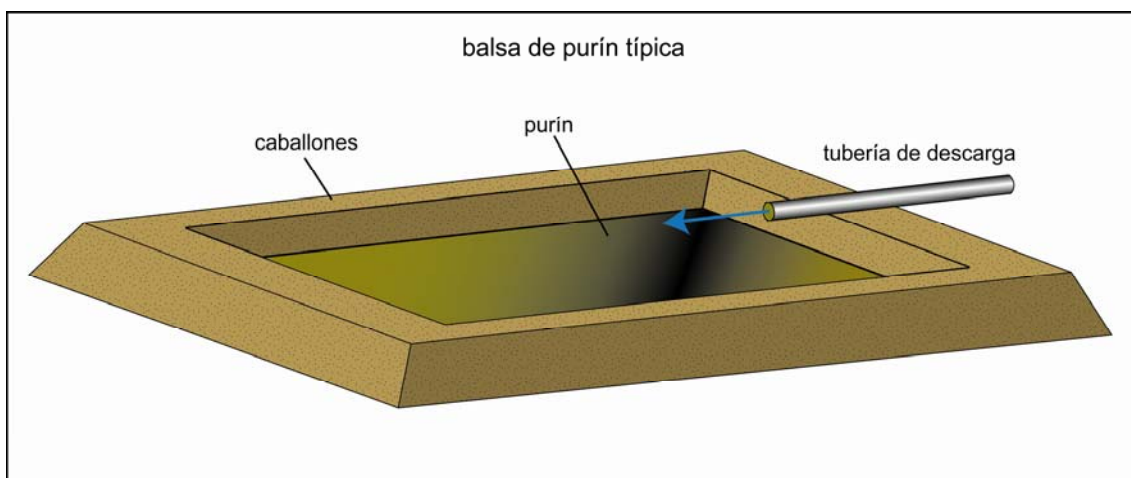


Figura 5. 33. Representación esquemática de una balsa de purín típica (elaboración propia).

Los riesgos por vertido incontrolado están directamente relacionados con las características del purín. A continuación se nombra en orden de concentración y por ende de su importancia como contaminante:

- Compuestos inorgánicos: N,  $\text{NH}_4^+$ , P, K, Cu, Zn, Fe y Mn.
- Compuestos orgánicos: compuestos fenólicos, ácidos grasos volátiles, etc.
- Gases: metano y amoníaco.
- Demanda Química y Biológica de Oxígeno (DQO y DBO).

La contaminación del medio acuático está directamente relacionada con la DBO que indica la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación biológica. Por medio de ésta, los componentes carbonatados se oxidan dando lugar a hidrógeno, anhídrido carbónico y amoníaco, con posterioridad a nitritos y nitratos por medio de la nitrificación. Estos procesos consumen una gran cantidad de oxígeno, escaso en el agua, provocando una serie de efectos negativos como la eutrofización.

En relación al medio terrestre, a diferencia que en el caso anterior, y debido a la enorme cantidad de oxígeno contenido en la fase suelo-atmósfera, los efectos contaminantes por la DBO son mínimos; sin embargo, el exceso de vertidos en el suelo puede ocasionar lixiviación de nitritos a aguas subterráneas, las cuales pueden ser utilizadas como riego o consumo humano (Schröder *et al.*, 2004). Por encima de 10 ppm de nitratos en el agua se considera no apta para el consumo humano; en niños menores de 6 meses el exceso de nitratos provoca la enfermedad metahemoglobinemia (Llona, 2005).

Un excedente de nutrientes y oligoelementos puede originar problemas de salinidad, fototoxicidad y desequilibrio nutricional en plantas (Risse *et al.*, 2001; Basset-Mens y Van der Werf, 2005), pasando estos a los animales o incluso al hombre, en el caso de los cultivos. Los microorganismos del suelo también se pueden ver afectados inhibiéndose algunas funciones como mineralización de la materia orgánica (García *et al.*, 2000).

Los malos olores del purín son provocados principalmente por la evaporación de compuestos volátiles, en su mayoría amoníaco y metano y en menor proporción sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono (Misselbrook *et al.*, 2005; Guiziou y Béline, 2005). Estos compuestos volátiles, además del mal olor, son tóxicos en bajas concentraciones, como es el caso del sulfuro de hidrógeno y el metano, que mezclados con aire puede ser explosivo.

El purín de cerdo posee una conductividad eléctrica media comprendida entre 14,81 dS/m y 20,04 dS/m (Lobera *et al.*, 1998). El purín, como ya se ha comentado anteriormente, contiene cantidades considerables de sales, por lo que su aplicación continua al suelo puede provocar una acumulación excesiva. Es importante destacar que el riesgo de salinización del suelo es especialmente alto en condiciones de semiaridez, donde la lixiviación está muy limitada por la escasez de lluvias y la elevada evapotranspiración (Bernal *et al.*, 1992).

Según Llona (2005) el purín de cerdo, aplicándolo de forma controlada, da resultados positivos como subproducto agronómico, aplicándolo como sustituto o complementario a la fertilización mineral en cultivos hortícolas, ya que mejora las propiedades y características físico-químicas del suelo. Hay investigaciones en curso para su uso como enmienda para la remediación de suelos (Faz *et al.*, 2005a).



## 6 Resultados y Discusión

En este capítulo, se exponen los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D para cada uno de los depósitos mineros y balsas de purines estudiados; igualmente se presenta un análisis conjunto entre estos datos y la información aportada por los análisis geoquímicos y los sondeos mecánicos.

Finalmente se realiza una discusión conjunta de toda esta información.

### **6.1 Depósito de estériles “El Lirio”**

#### **6.1.1 Tomografía eléctrica 2D**

En el depósito de estériles “El Lirio” se han llevado a cabo 9 perfiles de tomografía eléctrica 2D, realizados en septiembre de 2003 y febrero de 2004. Esta última campaña de medidas se realizó para repetir algunos perfiles de la campaña de septiembre de 2003 que se consideraron inaceptables por su elevado error.

Perfil n°	Extremo Oeste			Extremo Este		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	692570,51	4165107,99	180,00	692730,00	4165180,48	183,00
2	692721,37	4165198,75	-	692562,12	4165126,20	179,00
3	692635,00	4164967,07	196,00	692867,00	4165080,00	179,00
4	692613,16	4165012,06	196,00	692846,07	4165122,43	183,00
5	692601,00	4165068,00	175,00	692760,00	4165138,00	191,00
6	692718,72	4164903,75	162,89	692885,72	4165008,75	166,00
7	692759,00	4164849,00	171,00	692900,00	4164946,00	162,00
8	692872,97	4164819,03	136,00	692908,94	4164872,94	132,50
9	Extremo Norte			Extremo Sur		
	X	Y	Z	X	Y	Z
	692678,00	4165157,00	180,00	692786,83	4165017,21	-

Tabla 6. 1. Coordenadas de los perfiles de tomografía eléctrica 2D.

Excepto el perfil n° 9, el resto de perfiles se orientaron perpendicularmente a la dirección de la máxima longitud del depósito (Figura 6.1). En la Tabla 6.1 se muestran las coordenadas de sus extremos, tomadas con GPS. Estos perfiles se desplegaron en los tres niveles de terrazas del depósito. El dispositivo de medida empleado en todos los perfiles geoelectricos fue el Schlumberger-Wenner que ofrece una adecuada sensibilidad a los cambios laterales y verticales de resistividad (ver Capítulo 4).

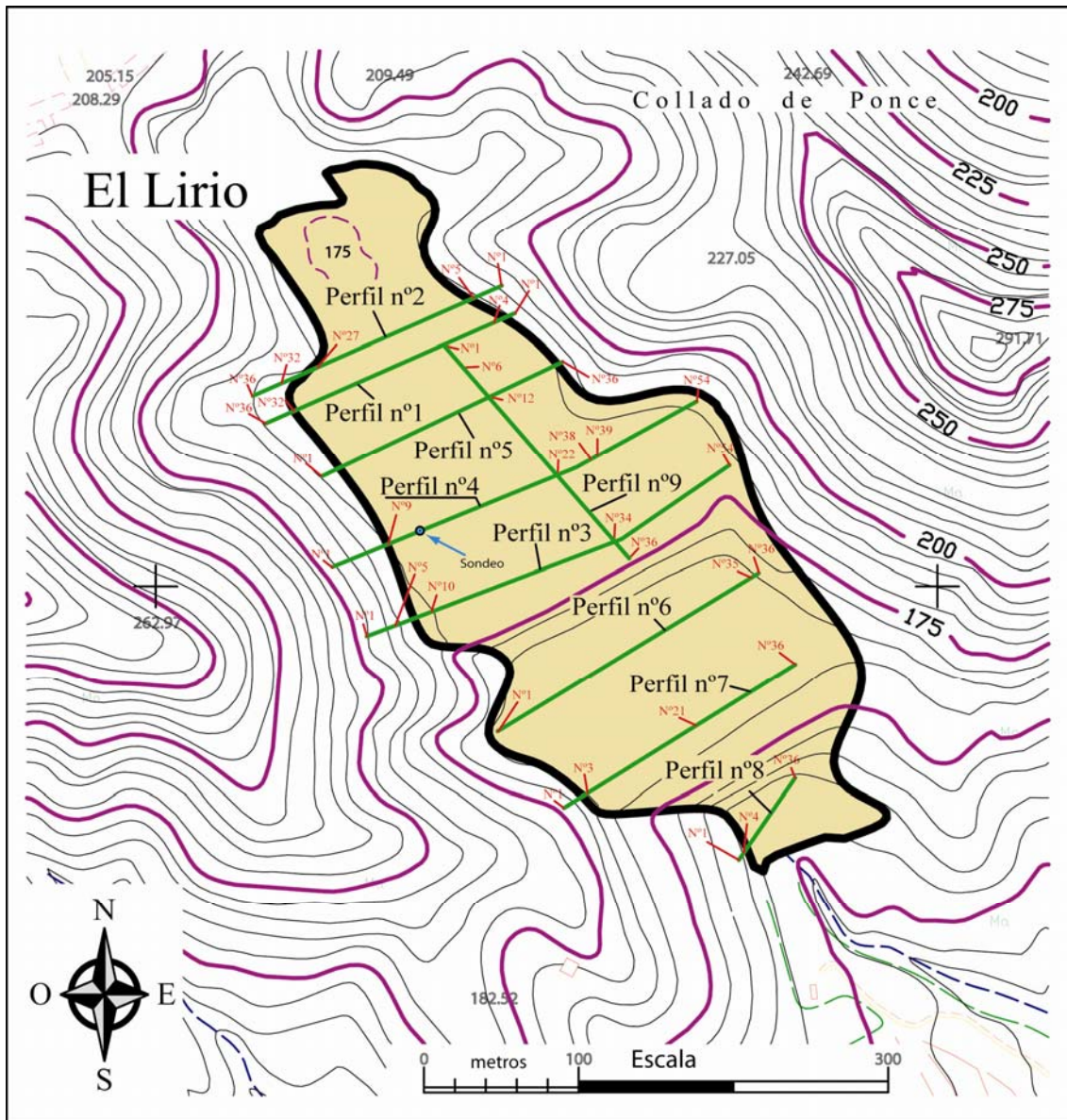


Figura 6. 1. Situación de los perfiles de tomografía eléctrica 2D y el sondeo mecánico sobre el depósito “El Lirio”.

### Perfil n° 1

Este perfil está formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito (Figura 6.1).

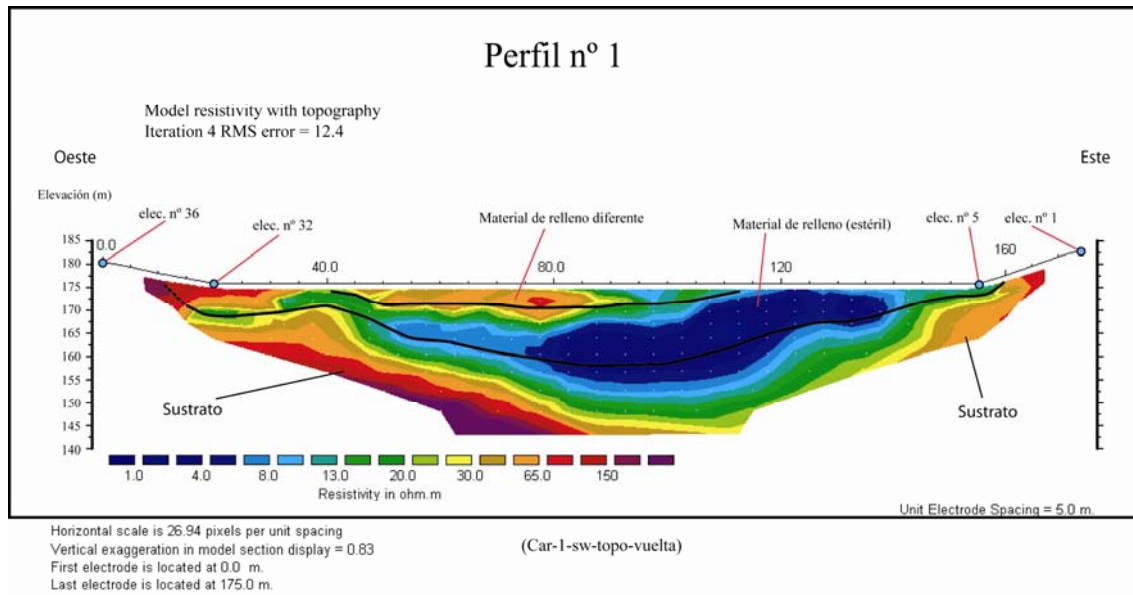


Figura 6. 2. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil n° 1.

En la Figura 6.2 se presenta la seudosección geoelectrica del Perfil n° 1 (Figura 6.1), junto con la regleta de valores de resistividad (ohm·m) que se ha seleccionado para todos los perfiles. Esto último permite tener todas las seudosecciones geoelectricas normalizadas “resistivamente”, lo cual facilita su comparación. Sobre la superficie de la seudosección se ha indicado la posición de algunos electrodos que sirven de referencia frente a cambios de topografía o de características físico-químicas del material.

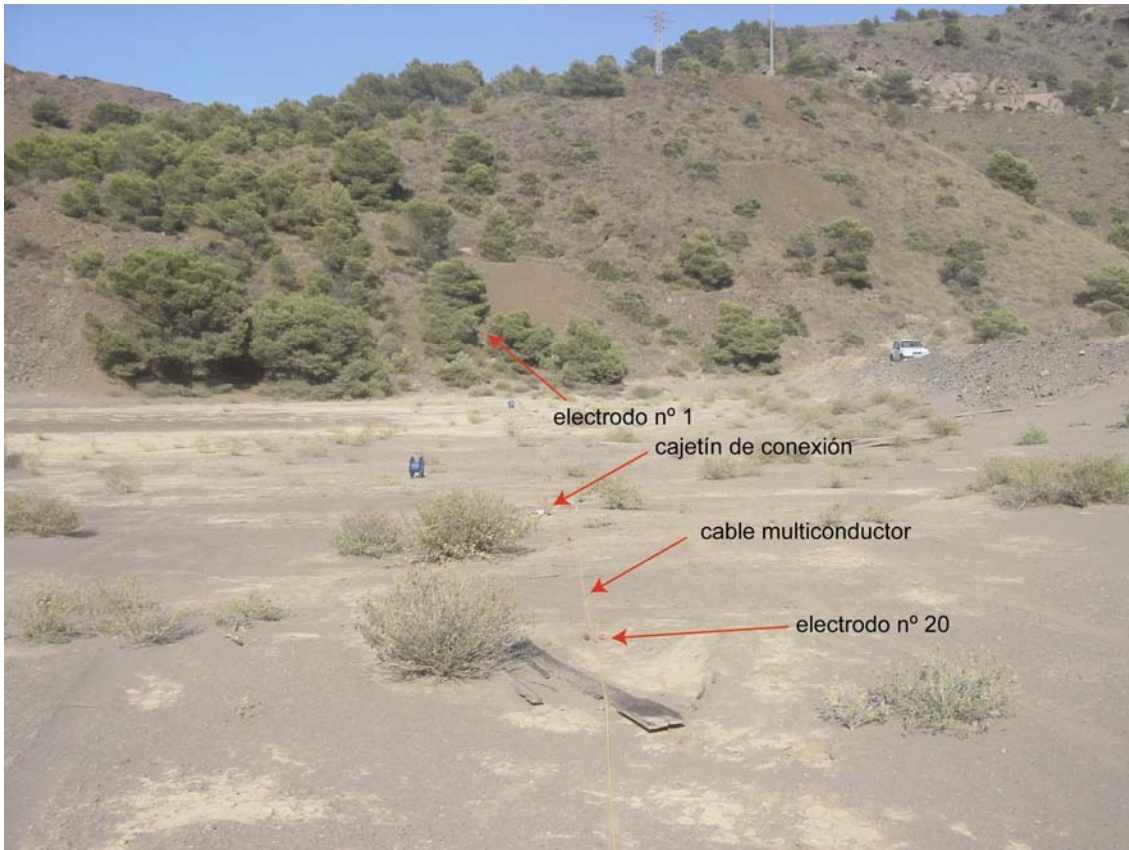


Foto 6. 1. Vista parcial del Perfil n° 1 orientada hacia electrodo n° 1.

La seudosección de la Figura 6.2 corrobora la sospecha que se tenía “a priori” sobre la idea de que por la propia naturaleza de los estériles mineros, las resistividades obtenidas en los primeros metros, hasta llegar al sustrato, deberían ser muy bajas. Según la tomografía eléctrica 2D los valores resistivos para el estéril del depósito se encuentran por debajo de 8 ohm·m. Los análisis físico-químicos realizados a las muestras del sondeo mecánico también corroboran dicho valor. A medida que se va profundizando en la seudosección los valores de resistividad se van incrementando por la influencia de los materiales del sustrato correspondientes a limolitas calcáreas del Mioceno (Faz *et al.*, 2003a). La resistividad eléctrica de estos materiales es superior a 150 ohm·m.

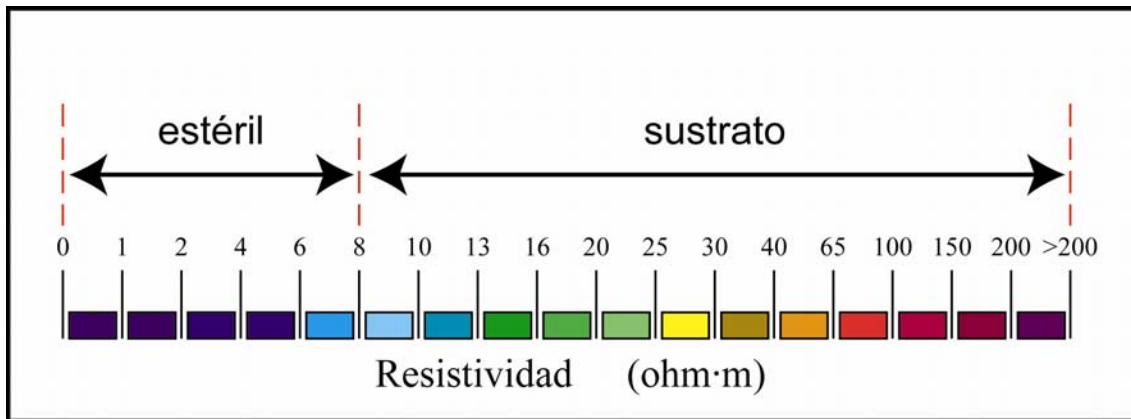


Figura 6. 3. Regleta de valores de resistividad empleada en el depósito “El Lirio”.

La pseudosección muestra claramente la geometría del fondo del depósito en forma de vaguada que corresponde a la geometría de esta cuenca del Coto Ponce. En la parte superior izquierda de la pseudosección se ha señalado una región anormalmente resistiva ( $> 30 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) denominada “Material de relleno diferente” y que contrasta con el material de relleno de la parte derecha de la pseudosección con resistividades eléctricas inferiores a  $8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ . En la superficie de la pseudosección también se muestra una ligera capa resistiva eléctrica entre 13 y  $20 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ .

## Perfil nº 2

Este perfil está formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en febrero de 2004, repitiendo otro realizado en septiembre de 2003 y que fue rechazado debido al elevado error que presentaba la pseudosección procesada.

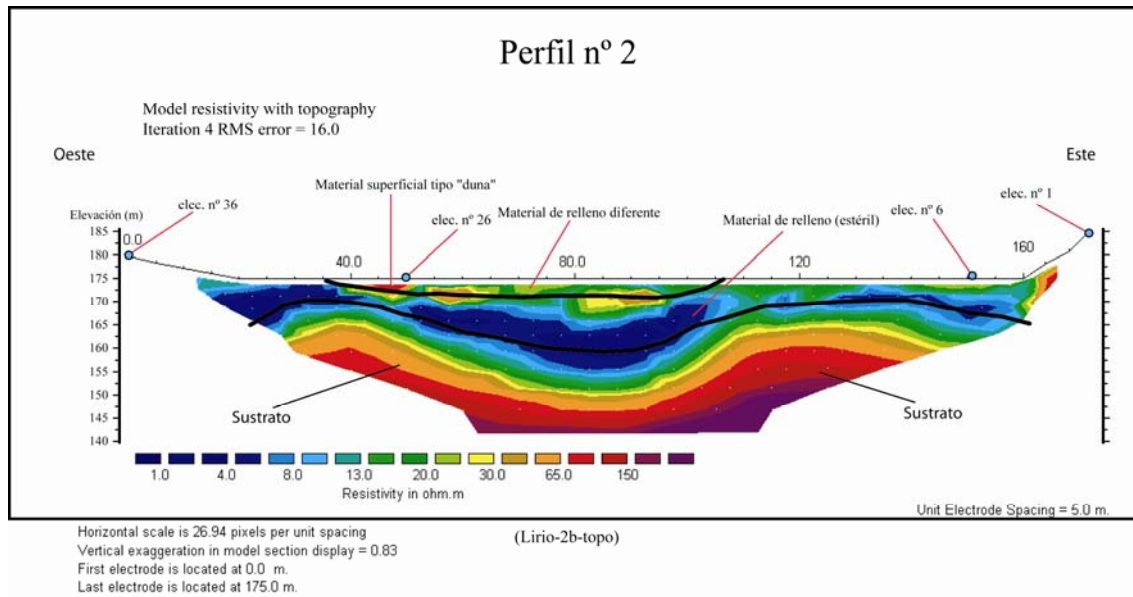


Figura 6. 4. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil n° 2.

La seudosección de la Figura 6.4, al igual que en el perfil anterior, indica de forma nítida la geometría de la vaguada sobre la que descansan los materiales vertidos correspondiéndole a estos una resistividades inferiores a 8 ohm-m. El espesor del material que indica esta seudosección está en torno a los 20 metros en su parte más profunda. Este espesor es inferior al que muestra la seudosección del Perfil n° 1 que está en torno a los 25 metros. Esto es coherente por el hecho de que el Perfil n° 2 está sobre una cota más elevada de la vaguada que la correspondiente para el Perfil n° 1 (Figura 6.1).

En la parte superior izquierda aparecen zonas de estériles con resistividades superiores a los 30 ohm-m y que corresponde a material arenoso que forma estructuras tipo “dunas”, originadas por fenómenos de clasificación granulométrica durante los procesos de recrecido del depósito y en menor medida por fenómenos de transporte por erosión del resto del depósito (Foto 6.3).



Foto 6. 2. Vista parcial del Perfil n° 2 orientada hacia electrodo n° 1.

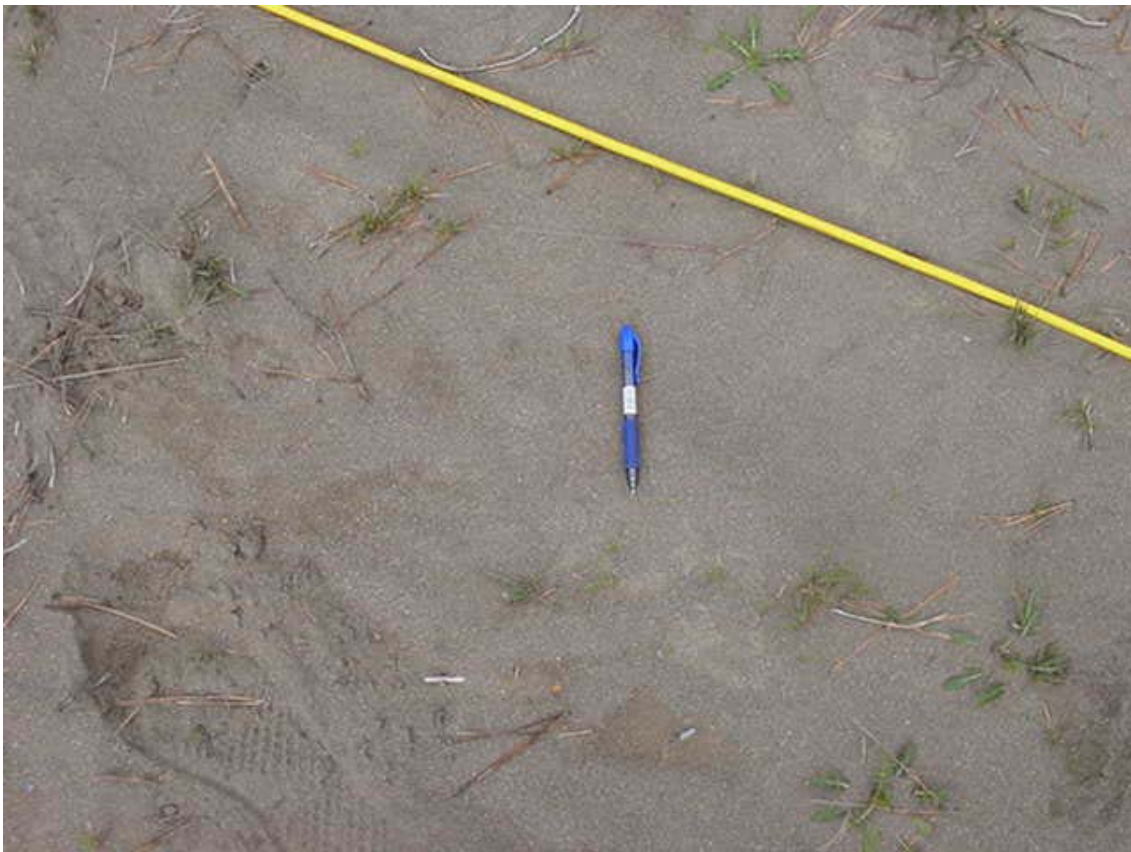


Foto 6. 3. Playa de arena originada durante el proceso de vertido.



### Perfil nº 3

Este perfil está formado por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 265 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en septiembre de 2003 y el procesado ha dado una seudosección geoelectrónica con un error bastante bajo del 7,3 % (Figura 6.5).

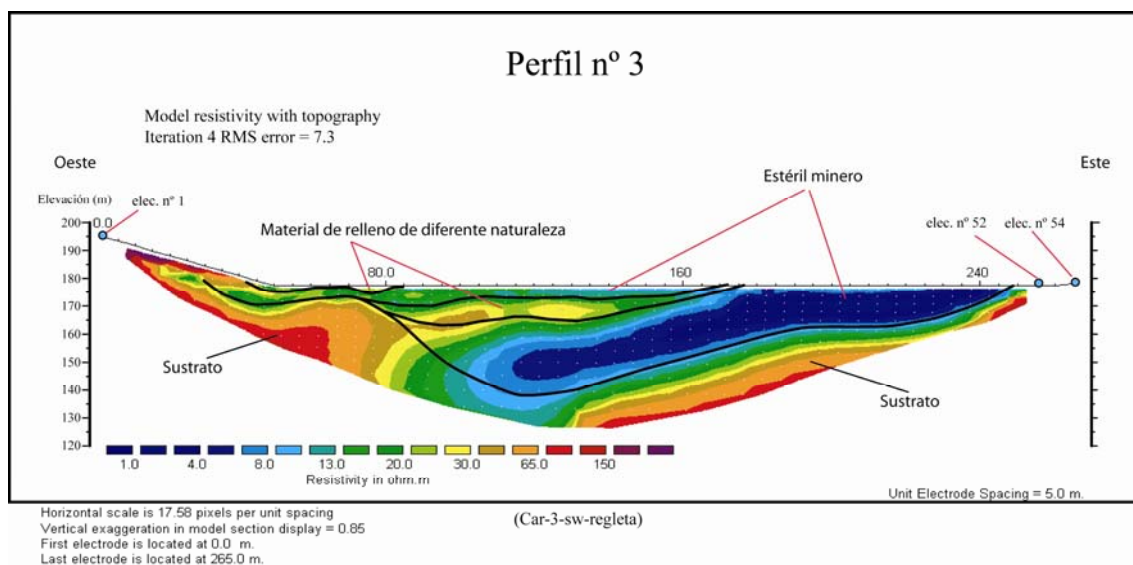


Figura 6. 5. Seudosección geoelectrónica interpretada del Perfil nº 3.

En la Figura 6.5, el resultado del procesamiento de las resistividades aparentes ofrece una seudosección de resistividades reales similar a las obtenidas para los perfiles anteriores, lo cual es un signo de la coherencia en las medidas. Entrando a describir la seudosección, destacan los valores de resistividad eléctrica inferiores a 8 ohm·m de la región derecha de la seudosección correspondientes al material estéril. Según la seudosección, la profundidad máxima del estéril para esta terraza se encontraría en la parte central de la seudosección, con un valor en torno a 50 metros; esta profundidad iría disminuyendo hacia los bordes del perfil donde el terreno termina por aflorar siguiendo la tendencia de una vaguada. El “material de relleno de diferente naturaleza” que aparece indicado en la seudosección correspondería a material de vertido con una granulometría más gruesa que el material de la derecha.

En la Foto 6.4 se puede observar la tubería de drenaje que sustituyó a la chimenea central para evacuar el agua embalsada durante el vertido de los lodos, evitando así el empleo de pequeñas embarcaciones que llevaban el material necesario para el recrecimiento de dicha chimenea (ver Capítulo 5).

En la Foto 6.5 se aprecian algunos restos del sistema de vertido instalado en la coronación del talud y la región que forma la playa de arena típica de este tipo de vertidos aguas arriba con sistema de vertido por canaleta de madera perforada (ver Capítulo 5).

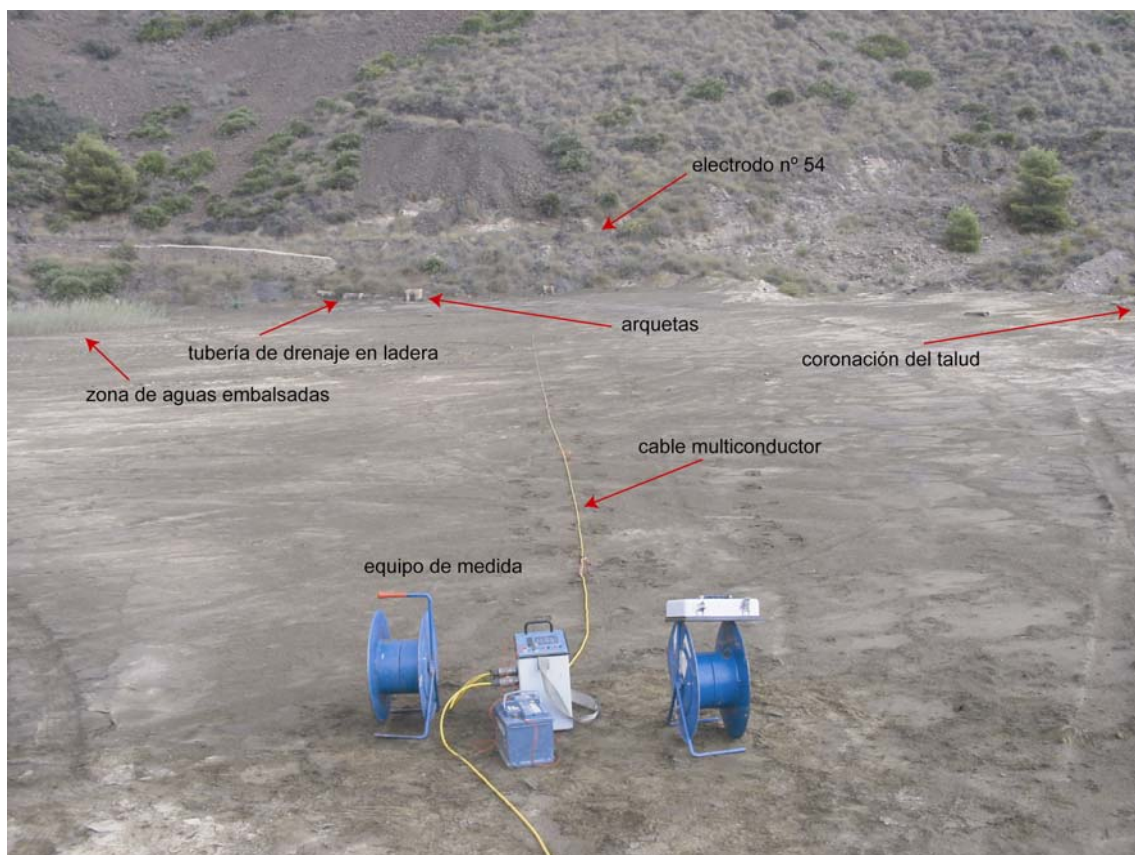


Foto 6. 4. Vista parcial del Perfil n° 3 orientada hacia electrodo n° 54.



Foto 6. 5. Vista parcial del Perfil nº 3 orientada hacia electrodo nº 1.

#### Perfil nº 4

Este perfil está formado, al igual que el anterior, por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 265 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en septiembre de 2003 (Figura 6.6).

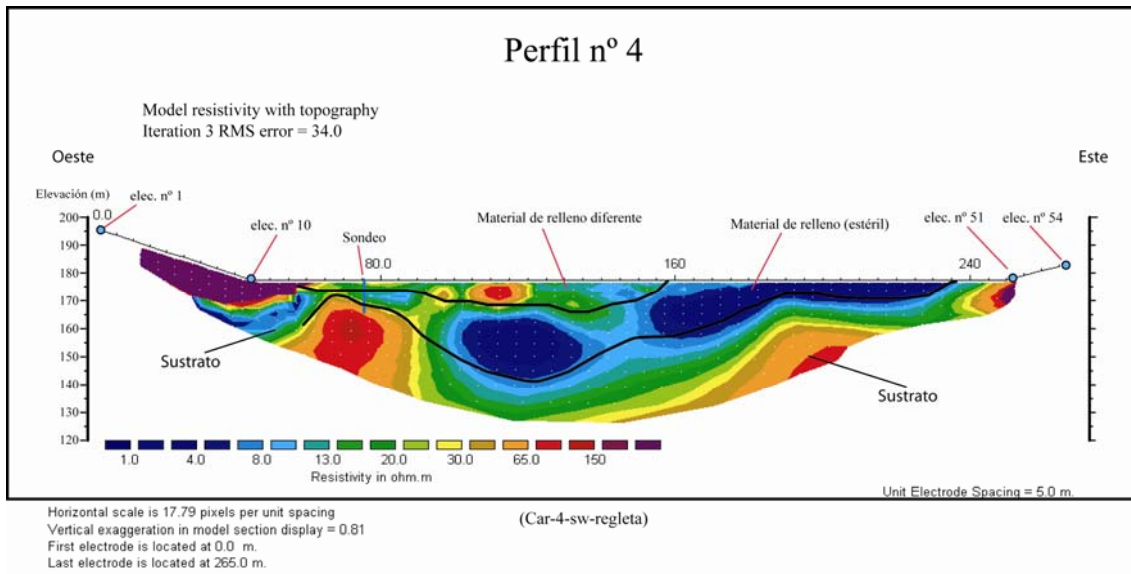


Figura 6. 6. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 4.

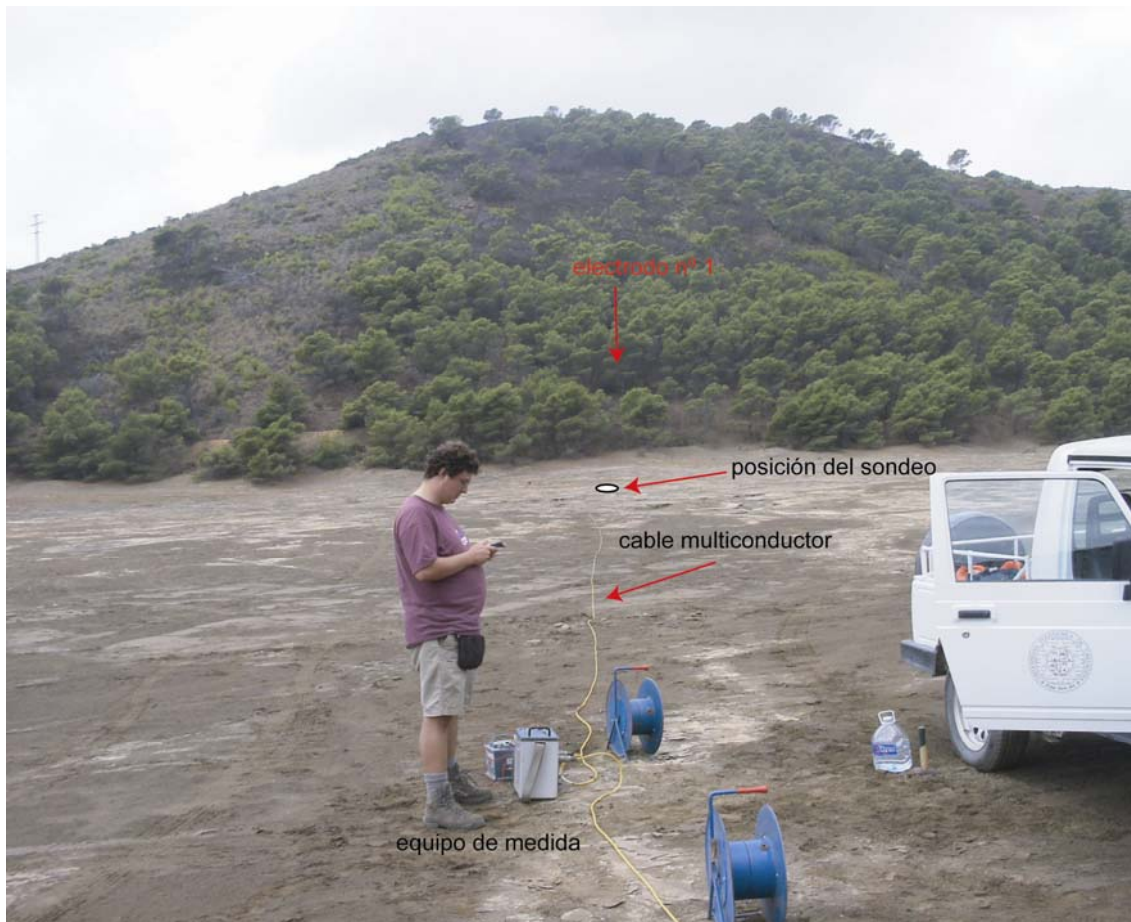


Foto 6. 6. Vista parcial del Perfil nº 4 orientada hacia electrodo nº 1, e indicación de la posición del sondeo mecánico.

La pseudosección correspondiente al Perfil n° 4 presenta las mismas regiones resistivas que las obtenidas para los anteriores perfiles. En la parte superior derecha destaca la región de bajas resistividades eléctricas ( $< 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) que coincide con una zona en superficie que habitualmente en épocas de lluvias permanece de forma permanente encharcada de agua (Foto 6.7). Claramente se muestran los límites del zócalo sobre el que se asientan los estériles y los materiales del Mioceno con valores altos de resistividad eléctrica ( $> 30 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ).

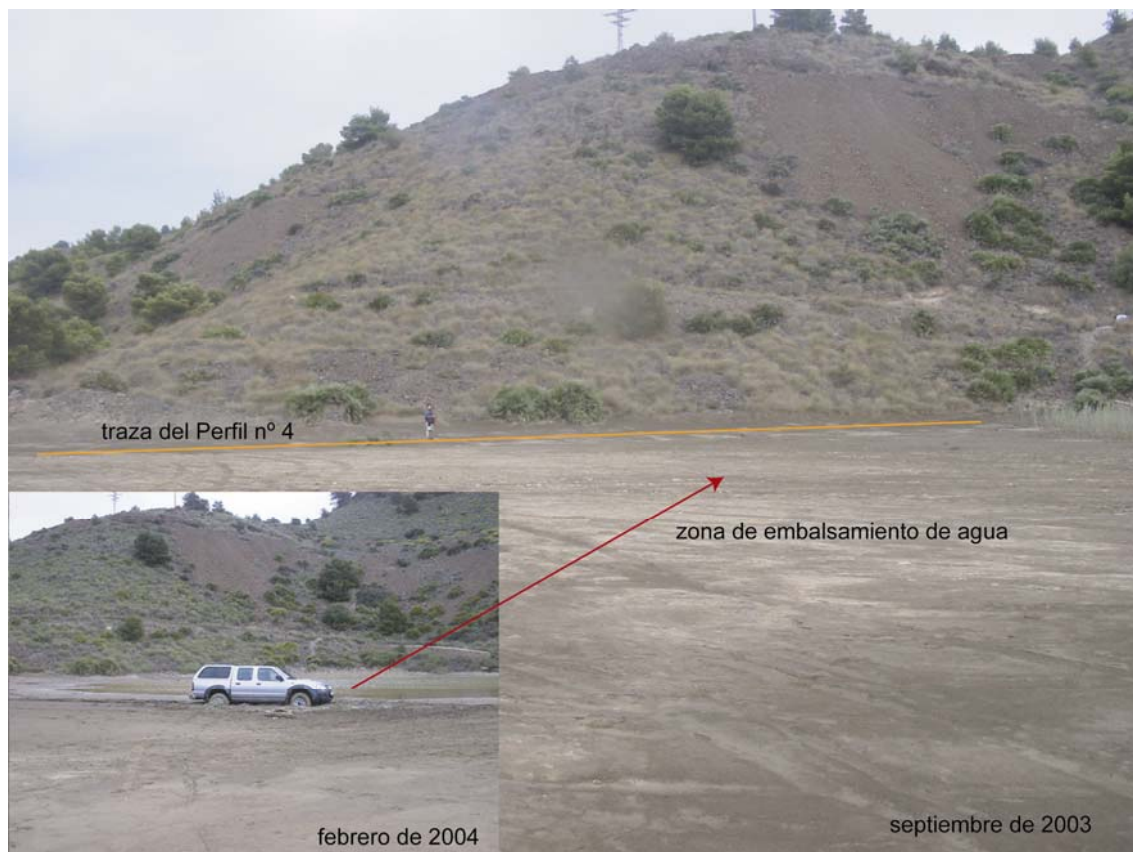


Foto 6. 7. Indicación de la dirección del Perfil n° 4 y de la zona habitual de embalsamiento de agua.

En la Figura 6.6 se ha situado el sondeo mecánico sobre el Perfil n° 4 (Foto 6.6) y se ha representado con la longitud perforada que fue de unos 15 metros. Los materiales del Mioceno se perforaron a partir de los 13,50 metros. Esto corrobora la interpretación dada por la pseudosección de la Figura 6.6.

## Perfil nº 5

Este perfil está formado, por dos tramos de cable multiconductor de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que fue suficiente para cubrir el ancho del depósito y conseguir la profundidad de investigación necesaria para alcanzar al sustrato (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en febrero de 2004, puesto que el realizado en septiembre de 2003 dio un error excesivo (Figura 6.7).

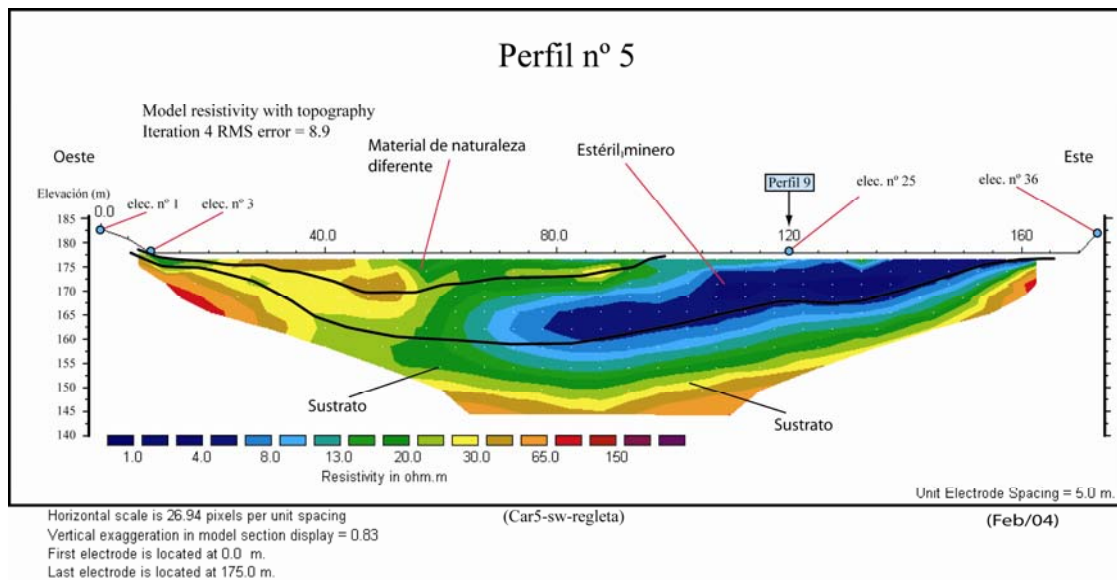


Figura 6. 7. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 5.

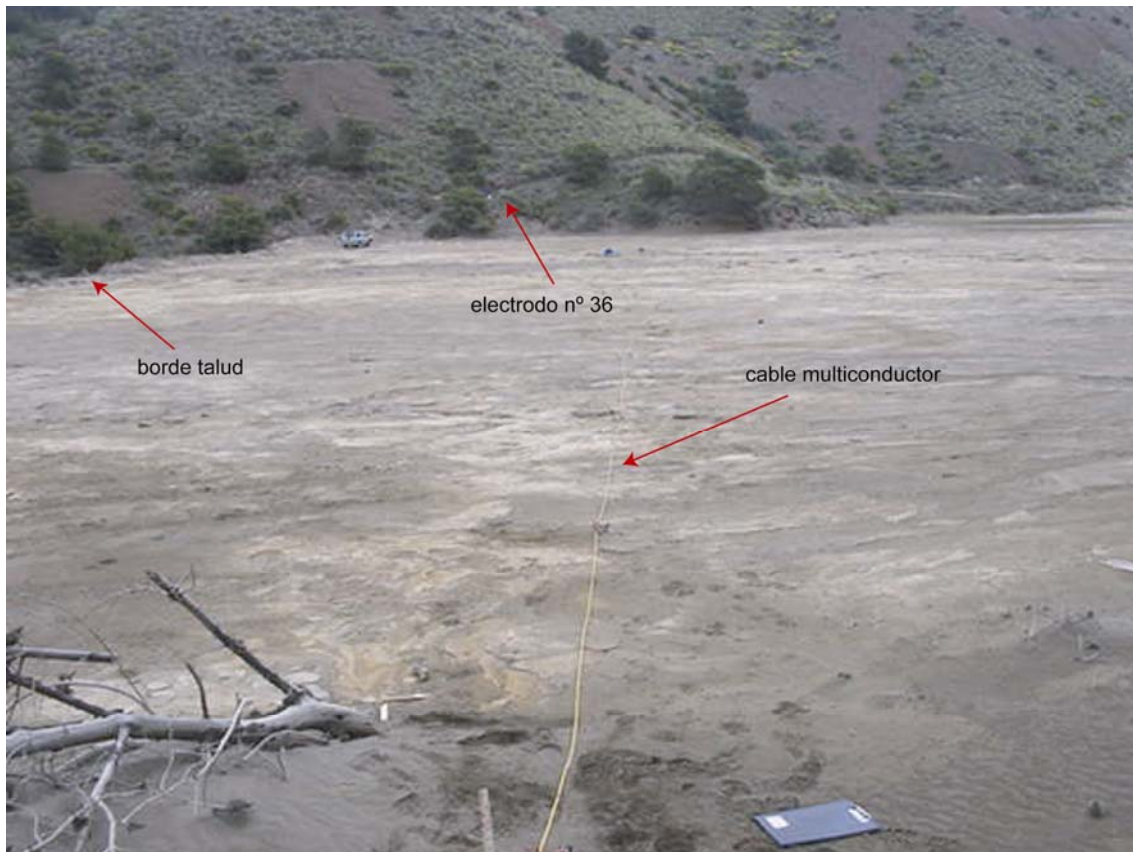


Foto 6. 8. Vista parcial del Perfil n° 5 orientada hacia electrodo n° 36.

La seudosección de la Figura 6.7 vuelve a reflejar un estéril más conductor hacia la derecha, contrastando con el material más resistivo de la parte izquierda de la seudosección (20-65 ohm-m). La profundidad de investigación alcanzada por el perfil ha sido suficiente para obtener información resistiva del sustrato miocénico con resistividades superiores 30 ohm-m.

La seudosección destaca una disminución del espesor del material depositado en relación a los otros perfiles de esta terraza (Figura 6.1), que en su parte central llega a los 23 metros aproximadamente (Figura 6.7). Esto es lógico pues, según los perfiles se van desplazando hacia el norte del depósito en una misma terraza de recremento, los espesores del material depositado van disminuyendo.

### Perfil n° 6

Este perfil está formado, al igual que el anterior, por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5

metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito y sobre todo alcanzar el sustrato formado por limolitas calcáreas (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en febrero de 2003 (Figura 6.8). Este perfil y el Perfil nº 7 se encuentran en una terraza de recrecimiento cuya cota es inferior a la cota sobre la que se situaron los perfiles comentados anteriormente.

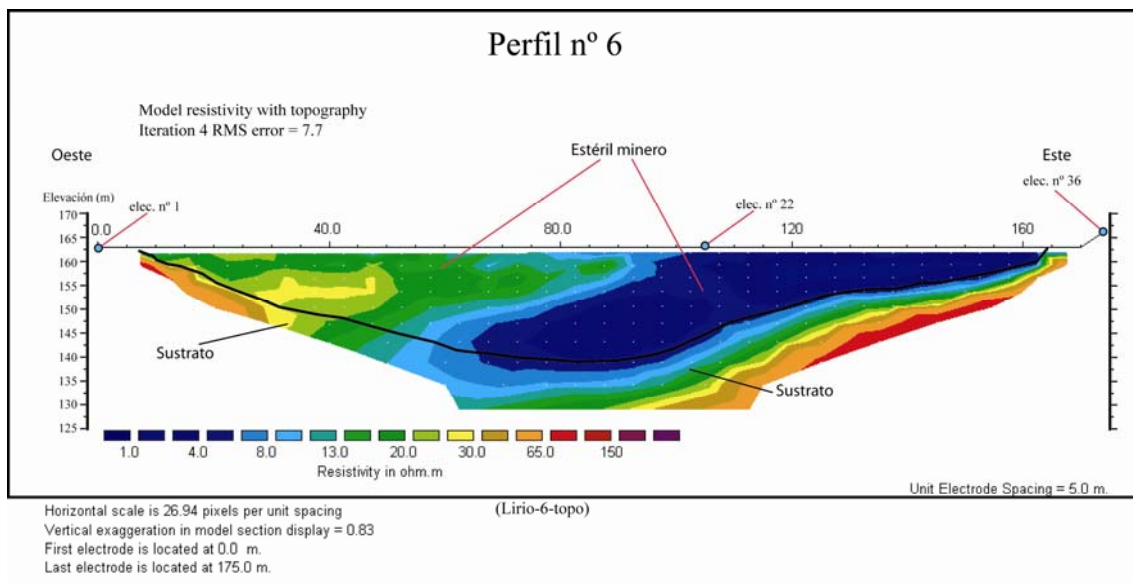


Figura 6. 8. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 6.





Foto 6. 9. Vista parcial del Perfil n° 6 orientada hacia electrodo n° 36.



Foto 6. 10. Vista parcial del Perfil n° 6 orientada hacia electrodo n° 1.

La seudosección eléctrica que aparece en la Figura 4.12 refleja la presencia de una deposición de material conductor en la parte derecha del perfil con valores muy bajos de resistividad (inferiores a 8 ohm-m), y en este sentido, también corrobora la presencia superficial de humedad existente entre el electrodo nº 22 y el electrodo nº 33 (Foto 6.9).

La zona izquierda de estéril minero señalada en la seudosección está caracterizada por valores de resistividad superiores a 10 ohm-m que muestran material minero sin humedad significativa (Foto 6.10). Los valores de alta resistividad, superiores a 30 ohm-m, vienen a caracterizarnos la presencia de material rocoso en el sustrato (limolitas calcáreas del Serravallense).

## Perfil nº 7

Este perfil está formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito y sobre todo alcanzar el sustrato formado por limolitas calcáreas (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en febrero de 2003 (Figura 6.9).

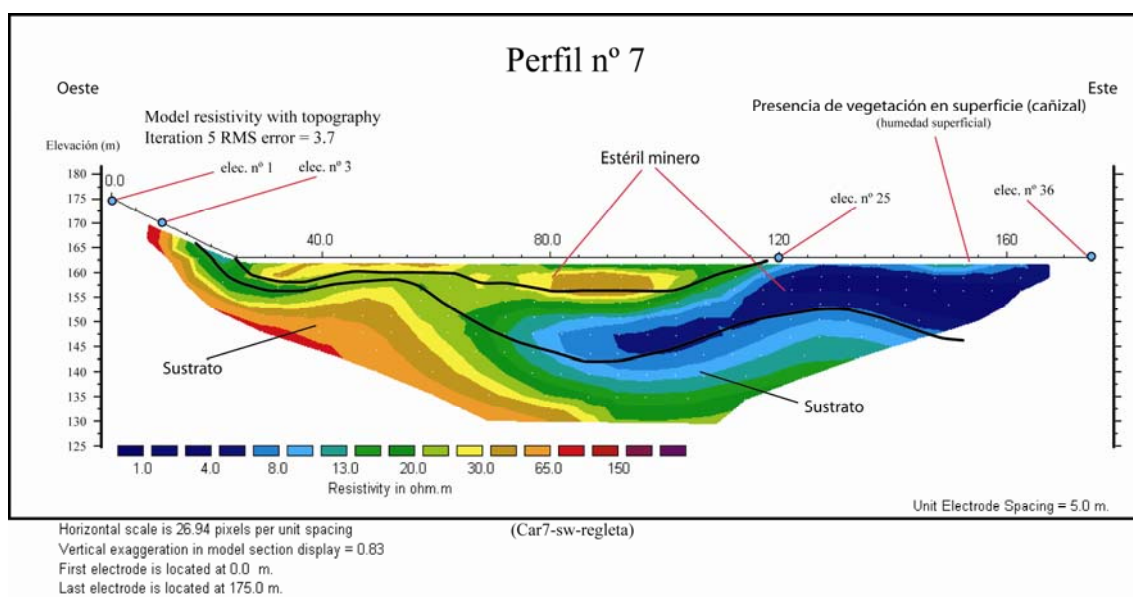


Figura 6. 9. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 7.



Foto 6. 11. Vista parcial del Perfil nº 7 orientada hacia electrodo nº 1.

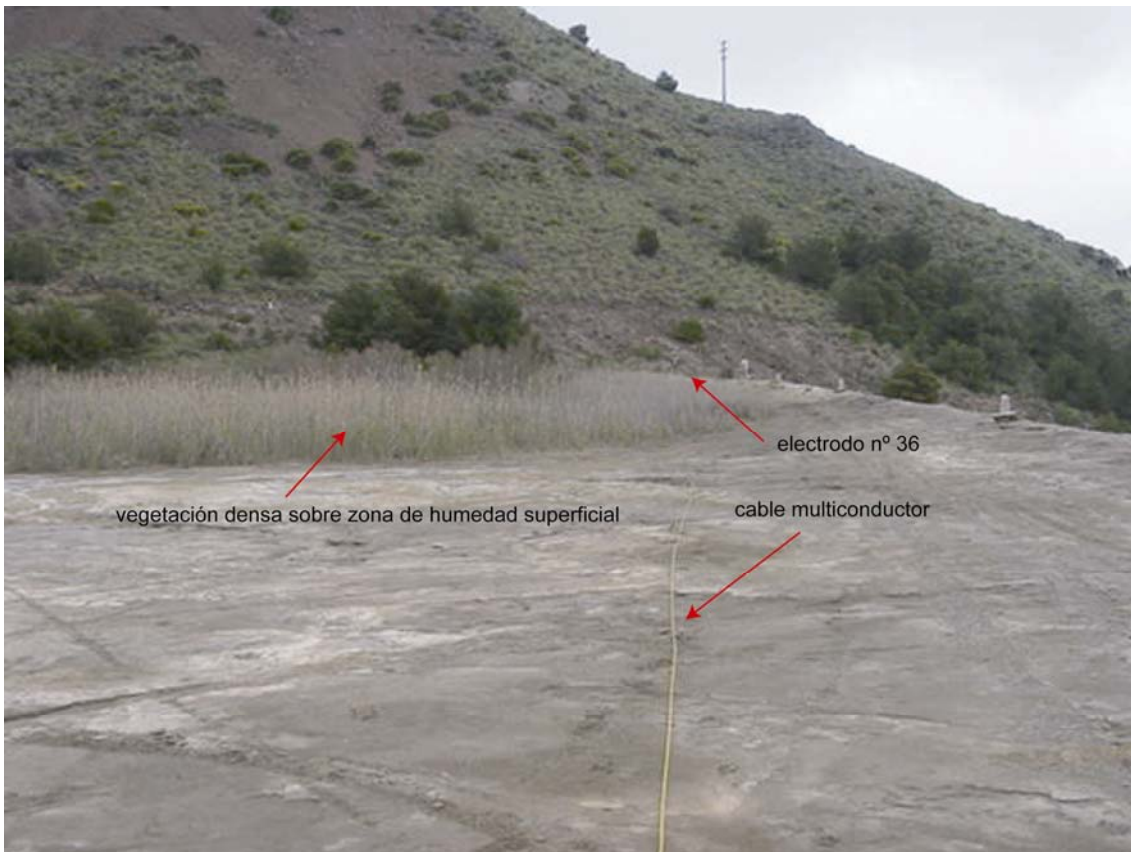


Foto 6. 12. Vista parcial del Perfil nº 7 orientada hacia electrodo nº 36.

El procesamiento de las medidas eléctricas llevadas a cabo en el Perfil n° 7 ha permitido obtener la sección geoelectrica 2D que aparece en la Figura 6.9, la cual sigue una tendencia similar a la dada en el perfil anterior (Figura 6.8) y en todo el depósito, es decir, la presencia de materiales estériles muy conductores en la parte derecha del perfil, con espesores de material de depósito en torno a los 20 metros en la central de la vegetación y espesores entre 25 y 30 metros en la parte central de la pseudosección. Dentro de la zona de la pseudosección clasificada como estéril minero se distinguen dos zonas de resistividad diferente, por un lado la zona derecha, con los valores más bajos de resistividad, que en superficie se encuentra entre el electrodo n° 25 y el electrodo n° 36 y delata la presencia significativa de humedad (Foto 6.12); de otro lado la zona izquierda con valores superiores a 8 ohm·m que muestran un material de características diferentes siendo estas diferencias más importantes en las zonas próximas a la superficie que van desde el electrodo n° 6 al electrodo n° 25.

El límite superior del sustrato se ha señalado en la Figura 6.9 siguiendo el mismo criterio que en los perfiles anteriores para los valores de resistividad superiores a 8 ohm·m.

### **Perfil n° 8**

Este perfil está formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno (Foto 6.13), 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 2 metros con lo que se consiguió un perfil de 70 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito y, sobre todo, permitió alcanzar el sustrato puesto que esta terraza se encuentra en la parte inferior del depósito y el espesor de materiales depositados es poco significativo (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en septiembre de 2003 (Figura 6.10).

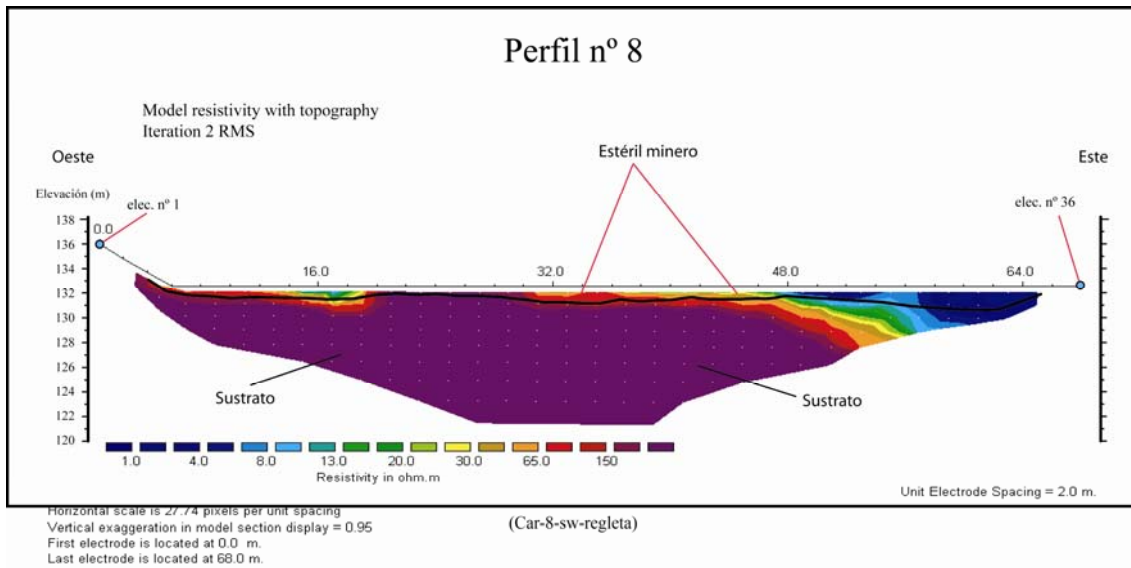


Figura 6. 10. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 8



Foto 6. 13. Vista parcial del Perfil nº 8 orientada hacia electrodo nº 1.

En la Figura 6.10 se presenta la seudosección geoelectrica corregida del Perfil nº 8, mediante establecimiento del mismo rango de valores de resistividad que en los perfiles anteriores (Figura 6.3). Sobre dicha seudosección de resistividad se ha realizado la interpretación que viene a indicarnos una tendencia similar a la encontrada en los perfiles nº 6 y nº 7; si bien, debido a la cota del terreno sobre la que se ha llevado a cabo

este perfil, es esperable que el espesor de los materiales depositados sea inferior al de los vertidos presentes en las cotas superiores. La seudosección estima un espesor de estériles entre 1-1,5 metros en la parte izquierda del perfil, y que va aumentando hacia la derecha del perfil llegando a alcanzar espesores de 1,5-2 metros. El sustrato miocénico viene identificado en la seudosección geoelectrica por los elevados valores de resistividad.

## Perfil nº 9

Este perfil está formado por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente la longitud de la terraza de mayor altitud permitiendo al mismo tiempo alcanzar el sustrato formado por las limolitas calcáreas (Figura 6.1).

Este perfil se realizó en febrero de 2003 (Figura 6.11).

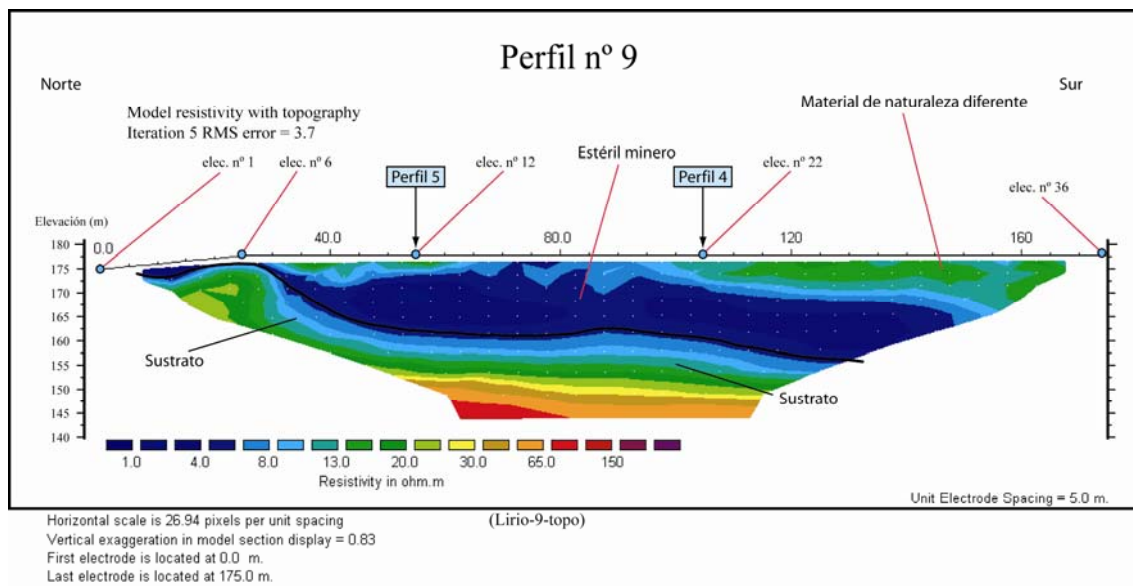


Figura 6. 11. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 9.

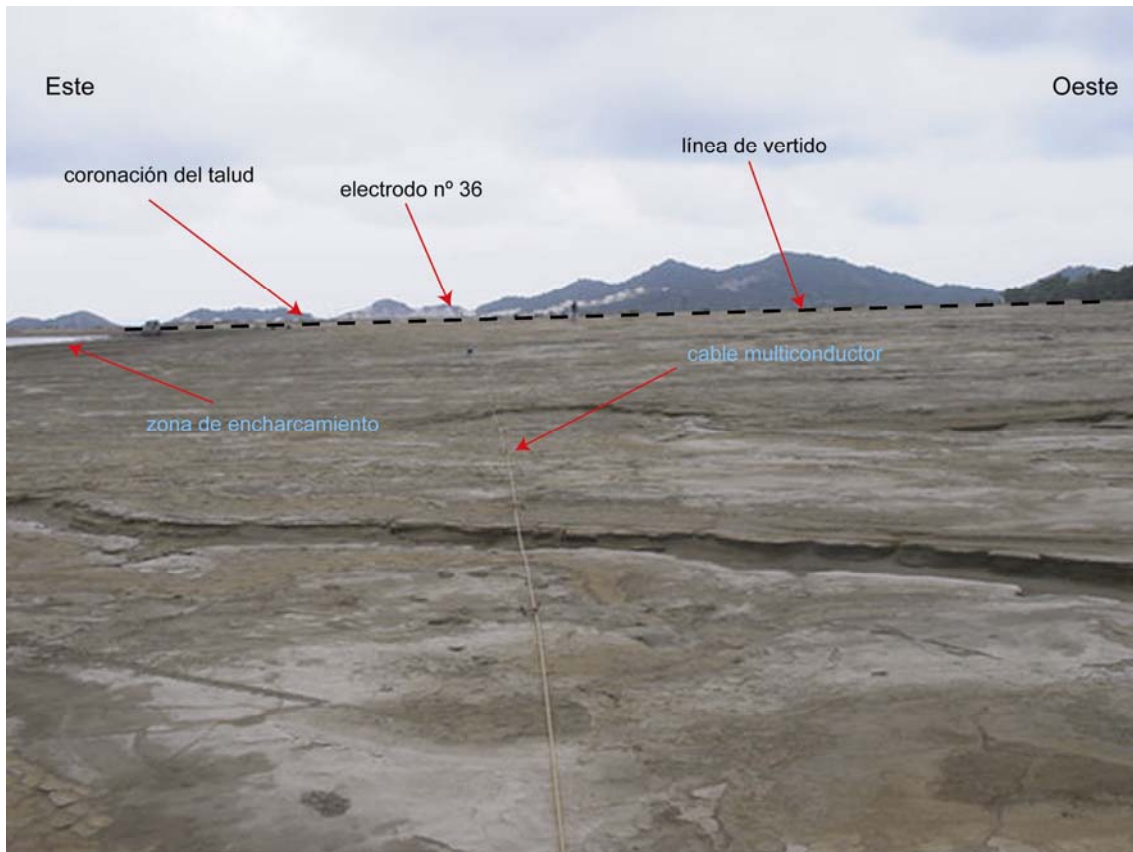


Foto 6. 14. Vista parcial del parcial del Perfil n° 9 orientada hacia electrodo n° 36.

La Figura 6.11 muestra la interpretación del Perfil n° 9 identificando la zona de vaguada cubierta por el estéril minero, caracterizada por los valores de resistividad inferiores a 8 ohm·m; sobre la superficie de la seudosección se han señalado aquellos electrodos del Perfil n° 9 que han coincidido con el emplazamiento de los perfiles transversales (Perfil n° 5 y Perfil n° 4 principalmente). La seudosección geoelectrica pone de manifiesto la pendiente natural del sustrato existente antes del vertido inicial. Por otro lado, los valores de resistividad comprendidos entre 8 ohm·m y 25 ohm·m en el extremo superior derecho de la seudosección muestran estéril minero de características diferentes.

## Vista 3D de las pseudosecciones geoelectricas 2D

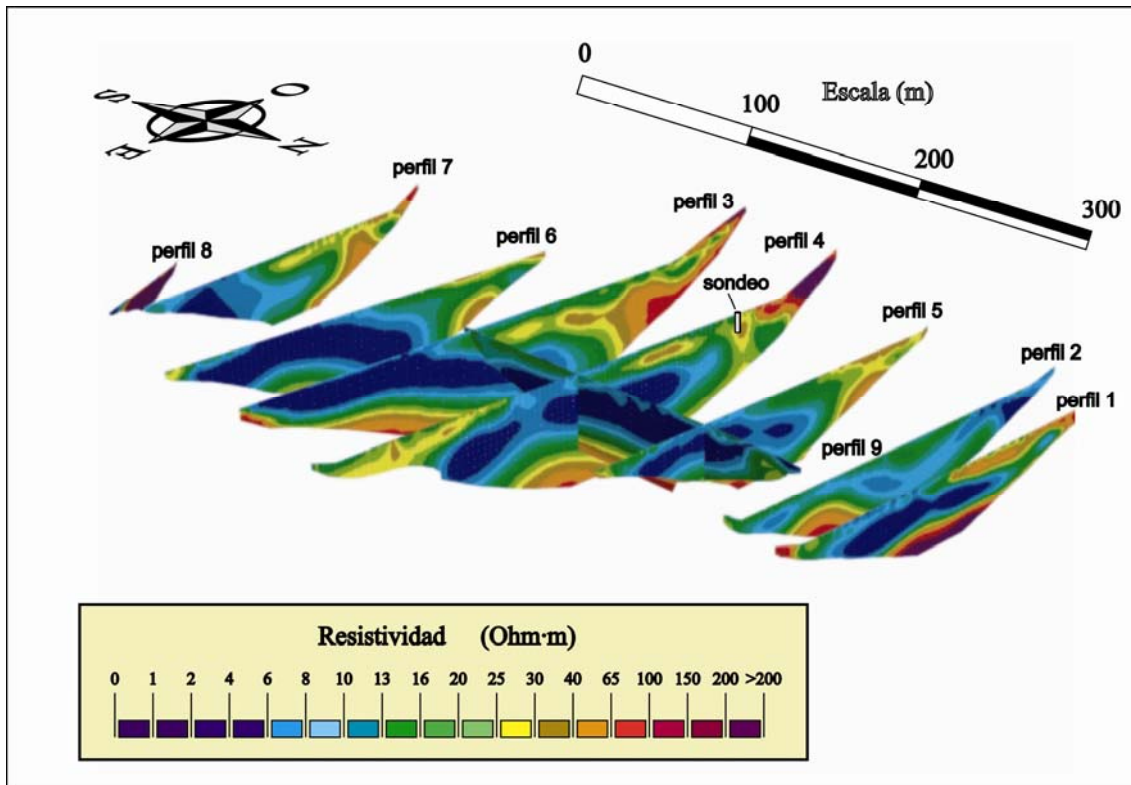


Figura 6. 12. Posición espacial de las diferentes pseudosecciones geoelectricas 2D.

En la Figura 6.12 se facilita una composición espacial de las diferentes pseudosecciones geoelectricas 2D comentadas anteriormente junto con la ubicación del sondeo mecánico que se realizó en el depósito. Se puede observar el buen ajuste que existe en las zonas de intersección lo que confirma la bondad de las medidas tomadas sobre el terreno.

Observando la figura se aprecia lo que se ya se indicado anteriormente, una región menos resistiva (< 8 ohm·m) en la parte más oriental de las pseudosecciones y otra región más resistiva (> 16 ohm·m) que se extiende superficialmente en la parte más occidental de las pseudosecciones.

## Modelo 3D del contacto sustrato-estéril

Las pseudosecciones geoelectricas interpretadas han servido de base para obtener un modelo 3D del contacto entre el sustrato rocoso del Mioceno y el material procedente del vertido minero a través del empleo del programa SURFER 8.0, de



GOLDEN SOFTWARE. El modelo 3D obtenido es el que se presenta en la Figura 6.13 que proporciona las profundidades del contacto desde la superficie del terreno. Este modelo emplea la superficie de las diferentes terrazas de recrecimiento como nivel cero, lo que se traduce en una topografía del sustrato aparente pero fiel a la realidad.

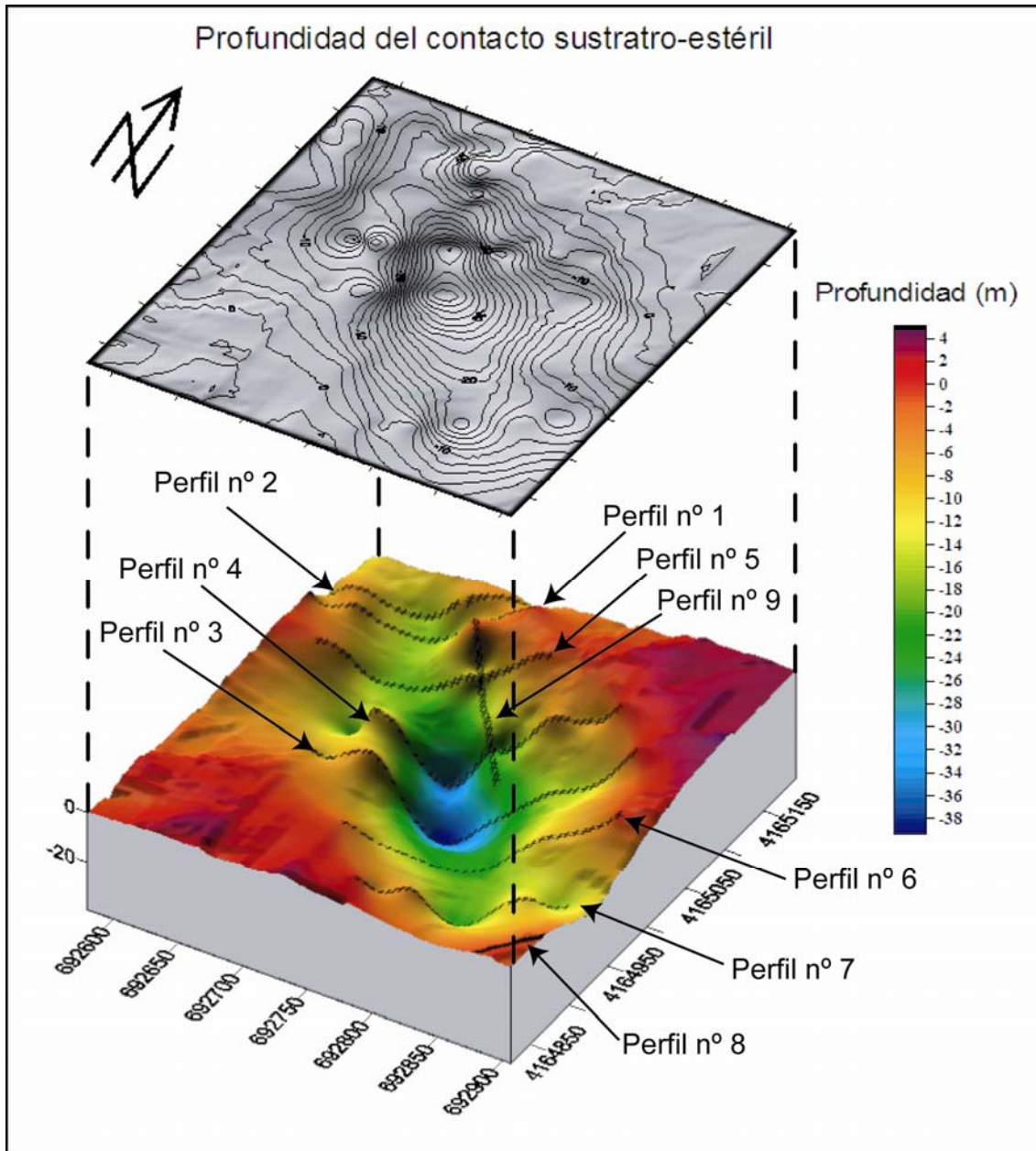


Figura 6. 13. Modelo 3D del zócalo rocoso.

En el modelo 3D (Figura 6.13) se muestra que el mayor volumen de material depositado está localizado bajo el emplazamiento de los perfiles geoelectrónicos 3 y 4, concretamente en la parte central de los mismos, coincidiendo con el fondo de la

vaguada original del terreno, donde se localizan espesores superiores a 38 metros (pudiendo llegar a los 50 metros en puntos centrales de la vaguada).

Estos espesores van disminuyendo hacia los laterales de los perfiles hasta alcanzar el valor 0, punto a partir del cual comienzan a aflorar los materiales naturales de la zona.

Con información aportada por los perfiles geoelectricos se ha cubicado el material existente en este depósito. Para ello se han empleado el método de cubicación trapezoidal, el método de cubicación de Simpson y el método de cubicación 3/8 de Simpson (Press *et al.*, 1992), a través del programa informático SURFER, de Golden Software, obteniéndose un volumen aproximado de 941 000 m<sup>3</sup>. Se hizo un cálculo del volumen de estériles, empleando un modelo digital del terreno a partir de los vuelos de 1956 y 1964, obteniéndose 963 753 m<sup>3</sup> (Faz *et al.*, 2003a). Esta gran coincidencia entre los resultados de ambos métodos de cálculo, demuestra que la información aportada por la tomografía eléctrica es bastante fiable.

### **6.1.2 Tomografía eléctrica 3D**

En el depósito de estériles “El Lirio” se ejecutó una malla compuesta por 7 perfiles paralelos de tomografía eléctrica separados 10 metros entre ellos y con una separación de 5 metros entre electrodos (Figura 6.14). Estos perfiles consistieron en 36 electrodos con una longitud de 175 metros. El dispositivo empleado fue también el Schlumberger-Wenner que es muy adecuado ante cambios laterales y verticales de resistividad eléctrica (ver Capítulo 4). La campaña de tomografía eléctrica se realizó en el mes de abril de 2005.

La situación de estos perfiles se efectuó atendiendo a los siguientes criterios: que la zona cubriera la posición del sondeo mecánico con el fin de poder comparar con los resultados de los análisis geoquímicos y los perfiles de tomografía eléctrica 2D, que existiera una superficie del depósito amplia donde poder implantar los perfiles necesarios y así poder obtener una adecuada información 3D del contacto sustrato-estéril y que la orientación de los perfiles coincidiera con los perfiles de tomografía

eléctrica 2D con el fin de comparar adecuadamente los resultados geoelectrónicos de ambas técnicas.

El procesamiento de los valores eléctricos medidos sobre el terreno se realizó con el programa RES3DINV de Geotomo. Posteriormente a la corrección topográfica y al proceso de inversión 3D se generó un bloque 3D de resistividades reales, el cual se ha manejado a través del programa SLICER DICER de Pixotec para la obtención de los diferentes volúmenes de material obtenidos en la inversión según su resistividad eléctrica (Figura 6.15).

Desde la Figura 6.16 hasta la Figura 6.19 podemos ver diferentes vistas 3D obtenidas con la tomografía eléctrica 3D, en las que se pone de manifiesto la idoneidad de esta técnica para el estudio volumétrico de los estériles mineros, puesto que caracteriza resistivamente la región investigada y corrobora la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D.

De forma idéntica a como se ha comentado para la tomografía eléctrica 2D se detecta una región en la parte más oriental del depósito donde los volúmenes de estéril son más conductivos con valores inferiores a 12 ohm·m y con una tendencia a buzarse hacia el oeste (Figura 6.18 y Figura 6.19). La granulometría de esta región sería más limosa debido a la clasificación granulométrica del sistema de vertido empleado en este depósito. También es en esta región donde se producen los principales encharcamientos de agua durante periodos de lluvias, por lo que si hay algún fenómeno de infiltración hidráulica y la posterior saturación del estéril éste se produciría ahí lo que se manifestaría con valores muy bajos de resistividad eléctrica.

Por otro lado, en la Figura 6.17 se ha querido mostrar el volumen de material del depósito con características más resistivas, encontrándose éste en una región más superficial y situado en la parte más occidental del depósito. La elevada resistividad del material es debida a una simple naturaleza granulométrica de este material estando constituido por material arenoso que se clasificó gravimétricamente durante las diferentes fases del vertido. Según los datos que se disponen del sistema de vertido, éste se realizaba desde la coronación del talud hacia el interior del depósito y desde la parte occidental del depósito, de ahí que la región resistiva en superficie se extienda desde la

parte suroccidental del depósito progresando hacia la zona más nororiental (Figura 6.17).

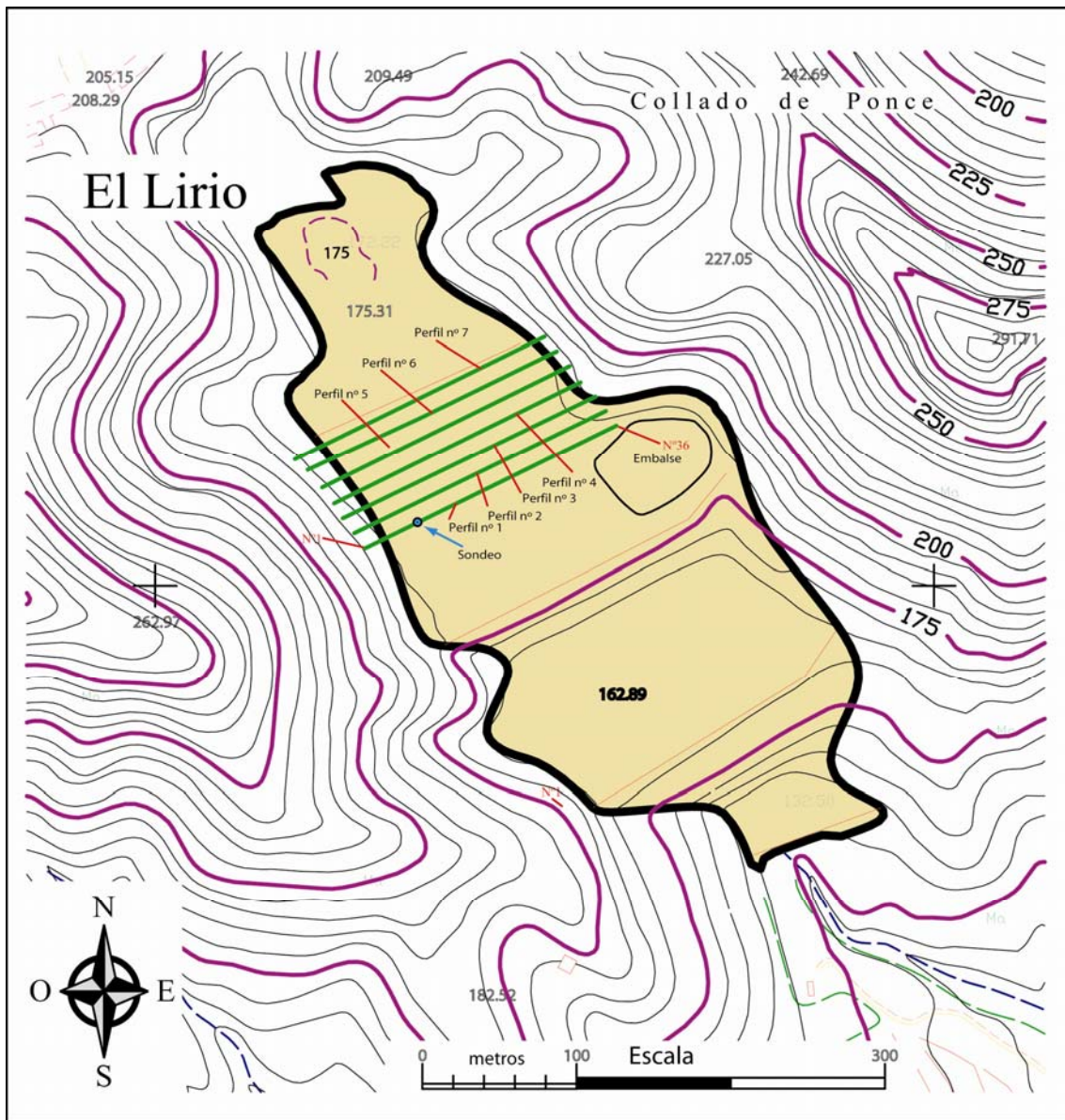


Figura 6. 14. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico sobre el depósito “El Lirio”.

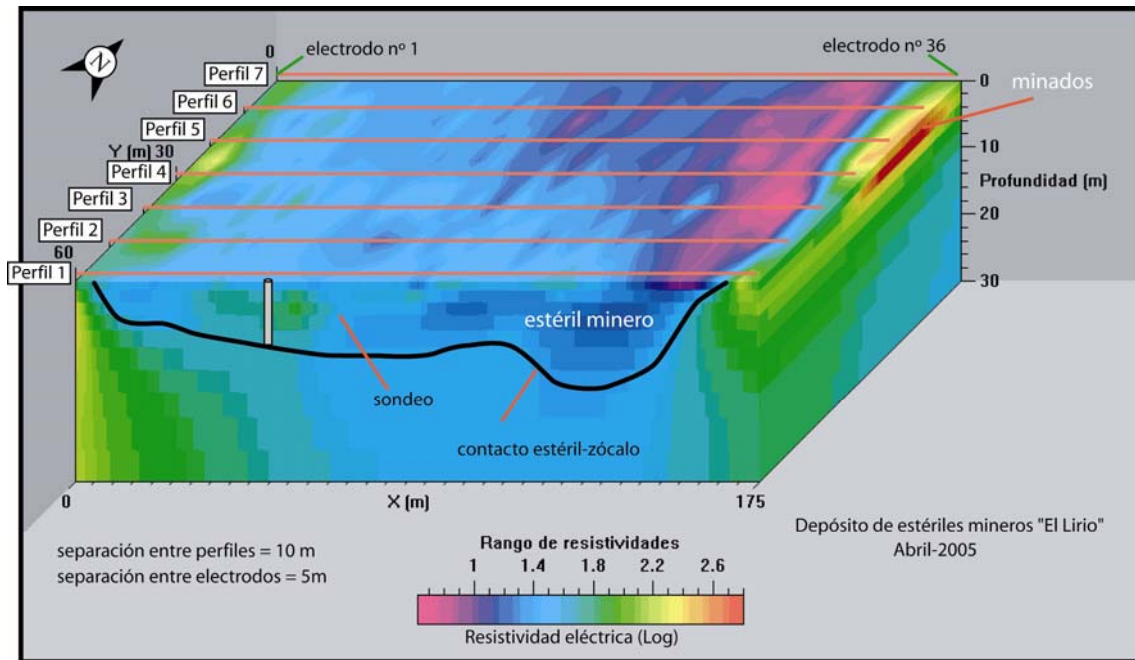


Figura 6. 15. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.

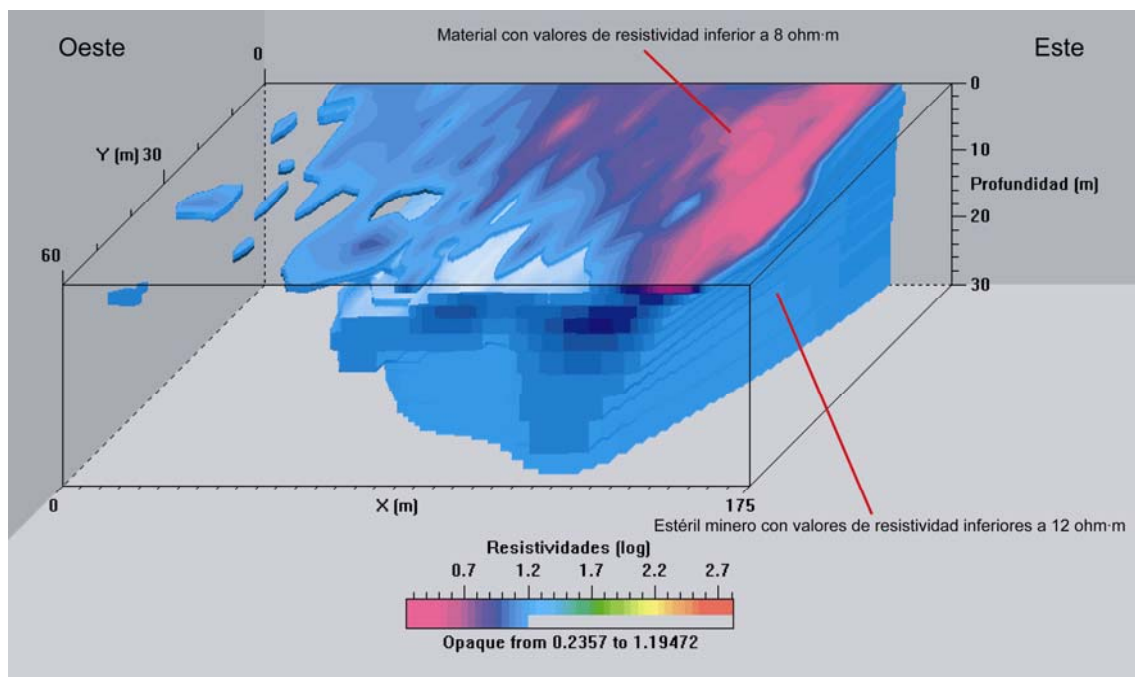


Figura 6. 16. Volumen del depósito del área cubierta por la tomografía eléctrica 3D correspondiente al estéril con valores de resistividad inferior a 12 ohm-m.

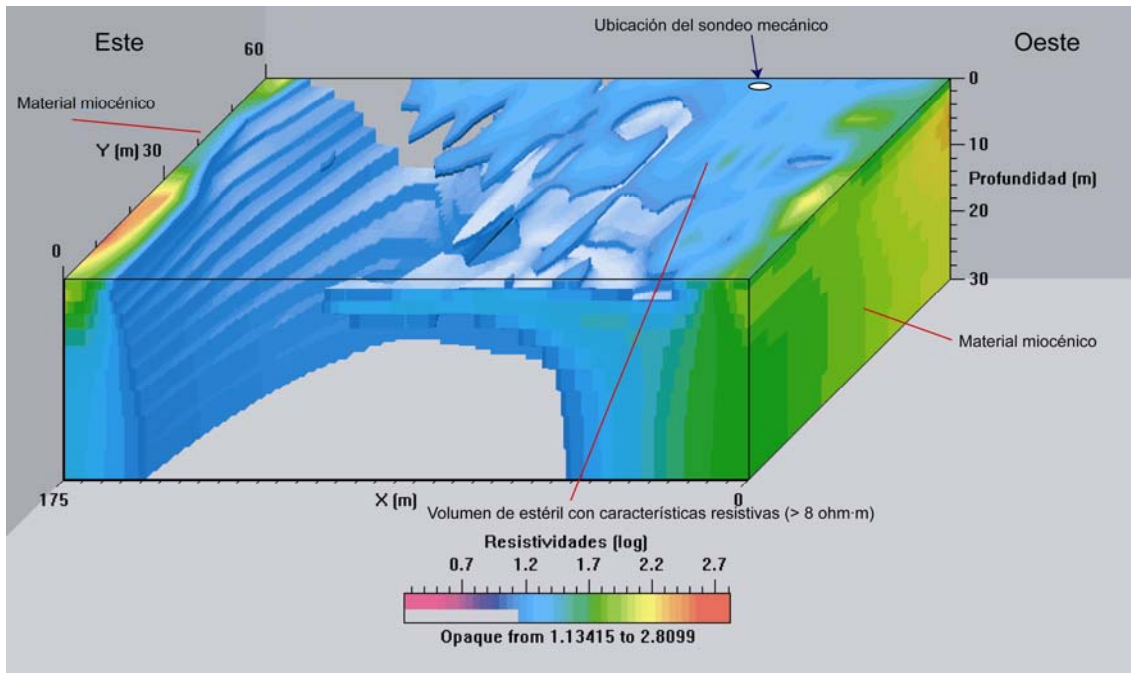


Figura 6. 17. Volumen del material del depósito con características más resistivas (> 8 ohm·m).

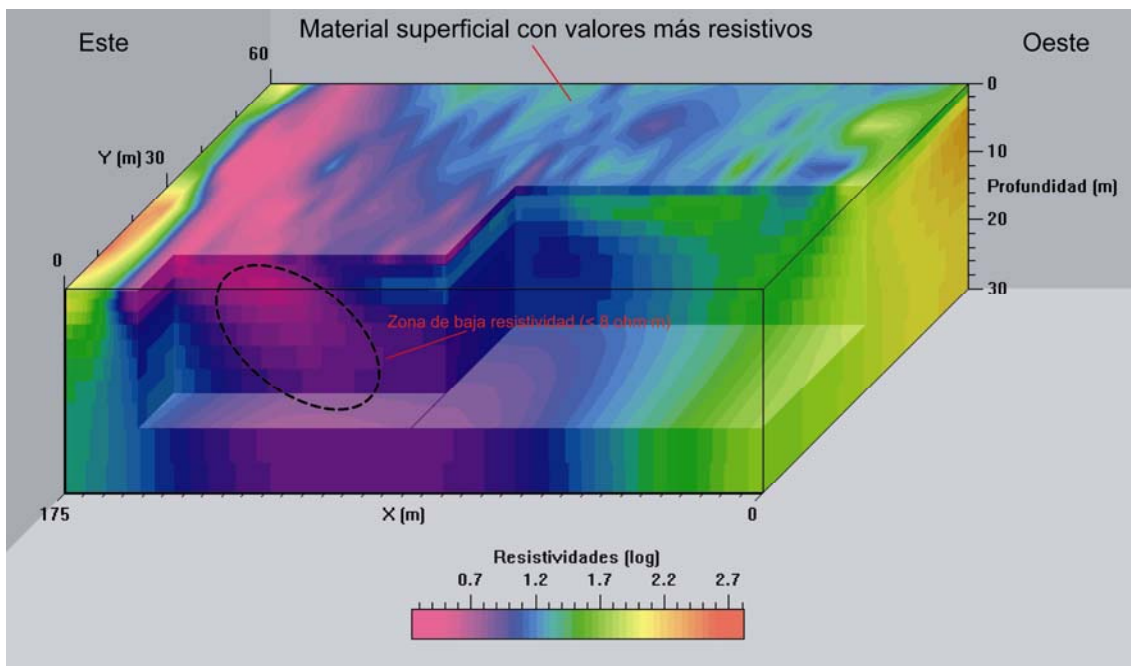


Figura 6. 18. Vista 3D sobre la tendencia del estéril más conductor dentro del depósito.

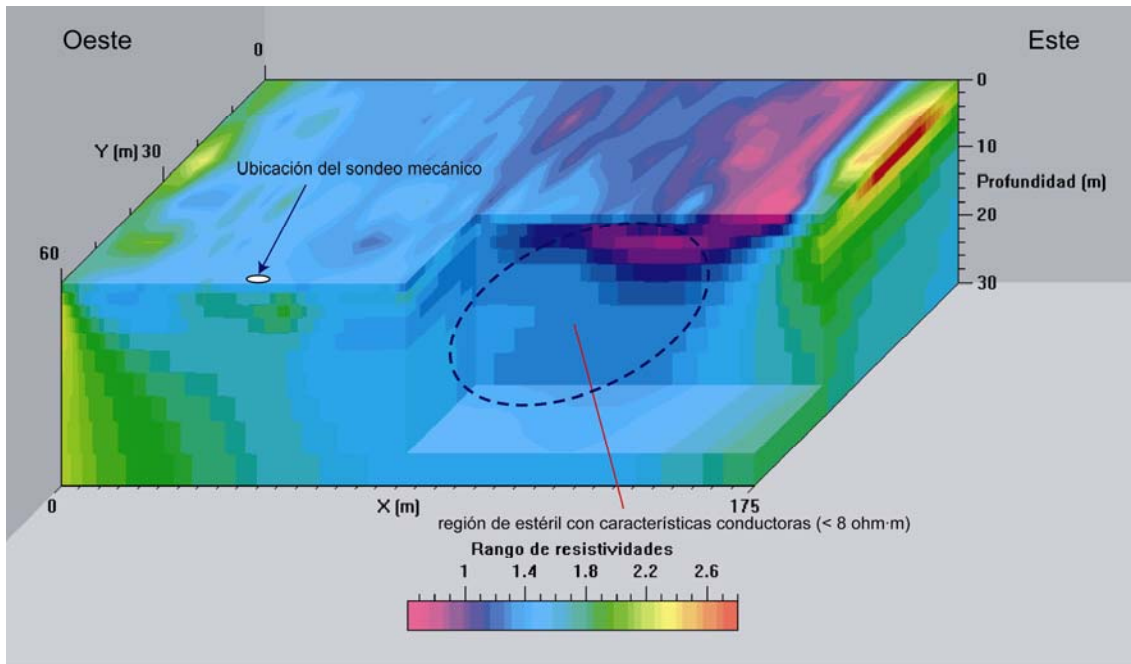


Figura 6. 19. Vista 3D sobre la tendencia del estéril más conductor dentro del depósito.

En las diferentes figuras del bloque 3D se observan los valores elevados de resistividad correspondientes a los materiales miocénicos que forman parte del sustrato rocoso y que afloran lateralmente en el depósito. Estos valores ayudan a delimitar de forma fiable la geometría del depósito tanto en profundidad como lateralmente (Figura 6.15).

### **6.1.3 Sondeo mecánico**

Como ya se ha comentado anteriormente, se realizó un sondeo mecánico con tubería de 101 mm de diámetro en los primeros 3 metros de profundidad, continuando el resto con tubería de 86 mm de diámetro hasta completar un total de 15 metros. A partir de los 13,50 metros se cortó el sustrato continuando el sondeo hasta alcanzar la profundidad citada de 15 metros (Figura 6.1).



Foto 6. 15. Testigo continuo obtenido de 9 a 12 metros.



Foto 6. 16. Emplazamiento del sondeo mecánico en el depósito de estériles "El Lirio".



Se recogieron cinco cajas porta-testigos (Foto 6.15) y se realizó un ensayo de penetración estándar (SPT) a la profundidad de 7 metros y un ensayo de permeabilidad a la profundidad de 9 metros.

A partir de las muestras del sondeo y los valores obtenidos en campo se realizaron ensayos de granulometría, índice de plasticidad, permeabilidad y ensayos de penetración estándar (SPT). Las muestras analizadas se obtuvieron de los tramos 4-4,20 m; 8-8,20 m y 12-12,20 m.

En la siguiente tabla se muestra el pasante, en tanto por ciento, de las diferentes muestras y los tamices empleados. Según el resultado obtenido, las tres muestras tienen un porcentaje superior al 50 % de material que pasa a través del tamiz 0,08 mm, lo que equivale a un suelo de grano fino.

Tamiz (mm)	Muestra 1 (4,00-4,20 m)	Muestra 2 (8,00-8,20 m)	Muestra 3 (12,00-12,20 m)
	Pasante (%)		
1,25	100	100	100
0,4	100	98	100
0,16	92	89	98
0,08	77	72	96

Tabla 6. 2. Granulometría de las muestras analizadas.

En la Tabla 6.3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de plasticidad. Las dos primeras muestras no presentan plasticidad, es decir, los valores muestran una inexistencia de humedad disponiéndose de forma semisólida. La muestra del tramo 12,00-12,20 m presenta un incremento en el límite líquido siendo el valor del índice de plasticidad (IP) bajo lo que equivale a materiales de textura más arenosa con mayor capacidad drenante y filtrante (Faz *et al.*, 2003a).

Muestra	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice de Plasticidad (IP)
4,00-4,20 m	NO PLÁSTICO	-	-
8,00-8,20 m	NO PLÁSTICO	-	-
12,00-12,20 m	45	26	19

Tabla 6. 3. Plasticidad de las muestras analizadas.

Los resultados del ensayo de permeabilidad realizado “*in situ*” se muestran en la siguiente tabla.

t (min)	Intervalo de tiempo $\Delta t$ (s)	Descenso del nivel de agua $\Delta h$ (m)	Altura media del nivel de agua, $h_m$	Diámetro del sondeo d (mm)	Altura del sondeo H (m)	Permeabilidad k (cm/s)
5	300	6,10	3,90	86	10	$2,52 \cdot 10^{-4}$
10	300	1,23	2,67	86	10	$7,41 \cdot 10^{-5}$
15	300	0,94	1,73	86	10	$8,74 \cdot 10^{-5}$
20	300	0,57	1,16	86	10	$7,91 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6. 4. Permeabilidad de las muestras analizadas.

Los valores de permeabilidad obtenidos son ligeramente superiores a los valores considerados característicos para depósitos de lodos con un cierto grado de consolidación, que están en torno a  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  cm/s, correspondiendo a arenas de playa depositadas periféricamente, con hasta un 30 % de finos (Vick, 1990).

Se efectuó un ensayo de penetración estándar (SPT) en el tramo comprendido entre los 7 y 7,60 metros, obteniéndose un parámetro  $N_{SPT}$  igual a 5 que, según Hunt (1984), equivale a un material de consistencia media (firme), con unos valores de peso específico saturado de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  y de resistencia a la compresión simple de  $0,9 \text{ kg/cm}^2$ .

Las tres muestras analizadas se han clasificado según el sistema A.A.S.H.T.O. (del inglés, “*American Association of State Highway and transportation Officials*”) (Faz *et al.*, 2003a). La clasificación obtenida es la que se presenta en la siguiente tabla.

Muestra	A.A.S.H.T.O.
4,00-4,20 m	Suelo Limoso (A-4)
8,00-8,20 m	Suelo Limoso (A-4)
12,00-12,20 m	Suelo Arcilloso (A-7)

Tabla 6. 5. Clasificación de los materiales según A.A.S.H.T.O. (Faz *et al.*, 2003a).

Durante la ejecución del sondeo mecánico no se cortó el nivel freático. Al culminar el sondeo éste fue entubado con PVC con el objetivo de realizar un seguimiento del mismo. Transcurrido el plazo de un mes, se volvieron a realizar medidas piezométricas sin conseguir tocar el nivel freático. Por ello, no se ha podido verificar la posible existencia de agua en la base del depósito de lodos.

Los materiales del sustrato (metro 14 a 15 del sondeo) en este sondeo son limolitas calcáreas, como las que afloran en los costados del valle. El análisis químico de la fase sólida de estos materiales ha dado una concentración de 96 ppm de Pb (0,0096 %) y 375 ppm de Zn (0,0375 %). Estos contenidos, en principio no corresponden a un efecto de contaminación del depósito de lodos suprayacente, sino al fondo geoquímico natural local, característico de los materiales del Mioceno que afloran en la cuenca del Coto Ponce (Faz *et al.*, 2003a).

#### **6.1.4 Análisis geoquímico**

##### **Propiedades físico-químicas de las muestras superficiales y sondeo**

Se realizaron análisis de pH, conductividad eléctrica y textura de suelo sobre muestras recogidas de 0 a 15 cm en tres zonas de muestreo denominadas C1, C2 y C3 (Figura 6.20). Según la Figura 6.21 y la Figura 6.22, el pH medido en agua es ligeramente superior que el medido en KCl en todos los puntos de muestreo. Entre las tres zonas aparecen ligeras variaciones, tanto en pH en agua como KCl 1M. El pH de la muestra C1, cuando se mide en solución de KCl 1M da un valor medio de 6,24 clasificado como pH medianamente ácido a ligeramente ácido y, cuando se mide en agua, da un valor de 6,86, clasificado como pH neutro.

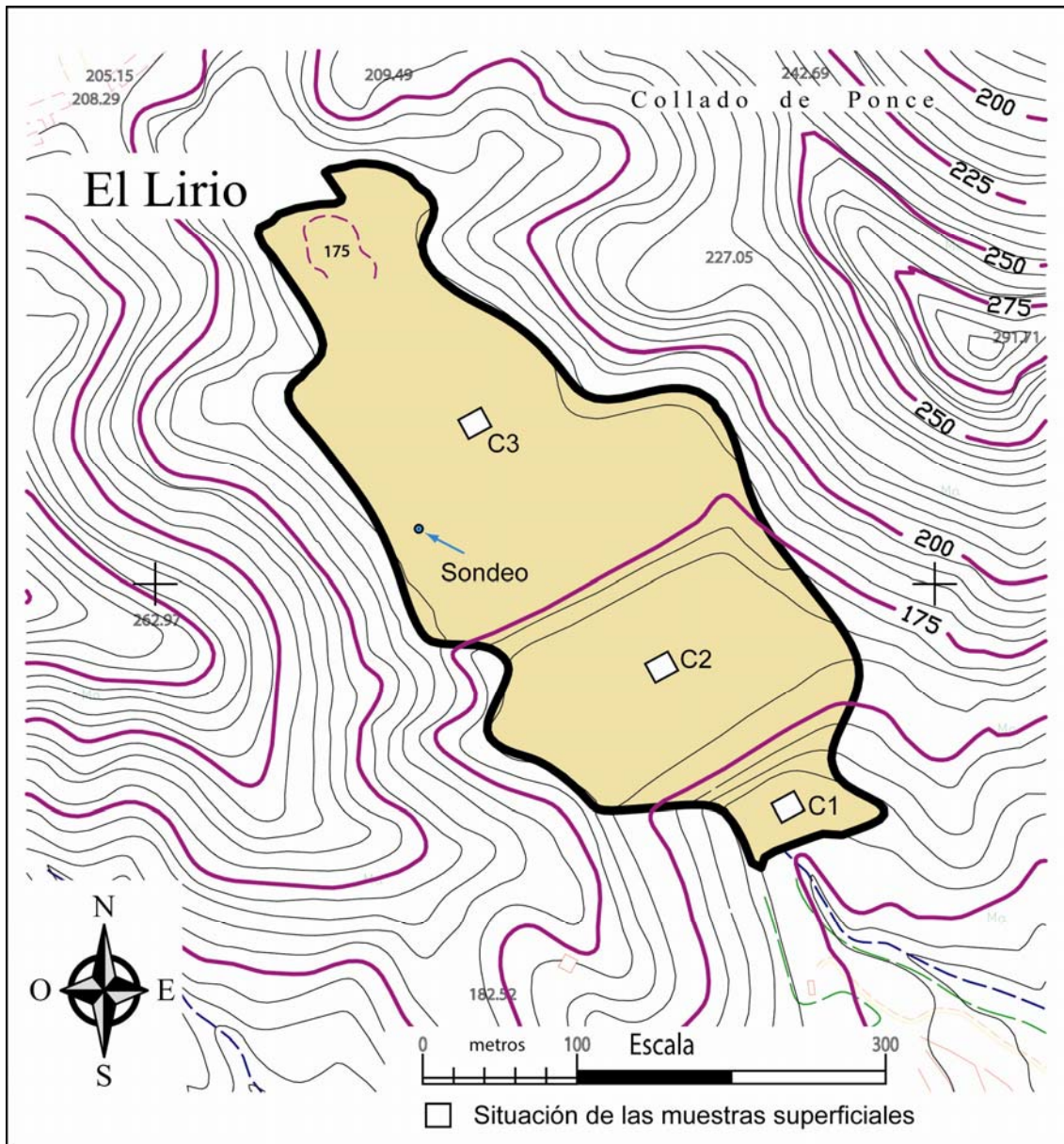


Figura 6. 20. Situación de las zonas de muestreo superficial C1, C2 y C3 en “El Lirio”.

En la zona C2 los valores de pH medidos en agua y en KCl 1M dan valores superiores a 7, clasificados como pH neutro o medianamente básico (Figuras 6.21 y 6.22). En esta zona la movilidad de los metales pesados no se verá favorecida debido a la no existencia de un pH muy bajo.

En la zona C3, los valores de pH medidos en agua y en solución de KCl son catalogados como de muy fuertemente ácidos a neutros. En este caso, la movilidad de los metales se ve favorecida por la bajada del pH en comparación con las zonas anteriores, por lo que el riesgo de migración de metales es mayor.

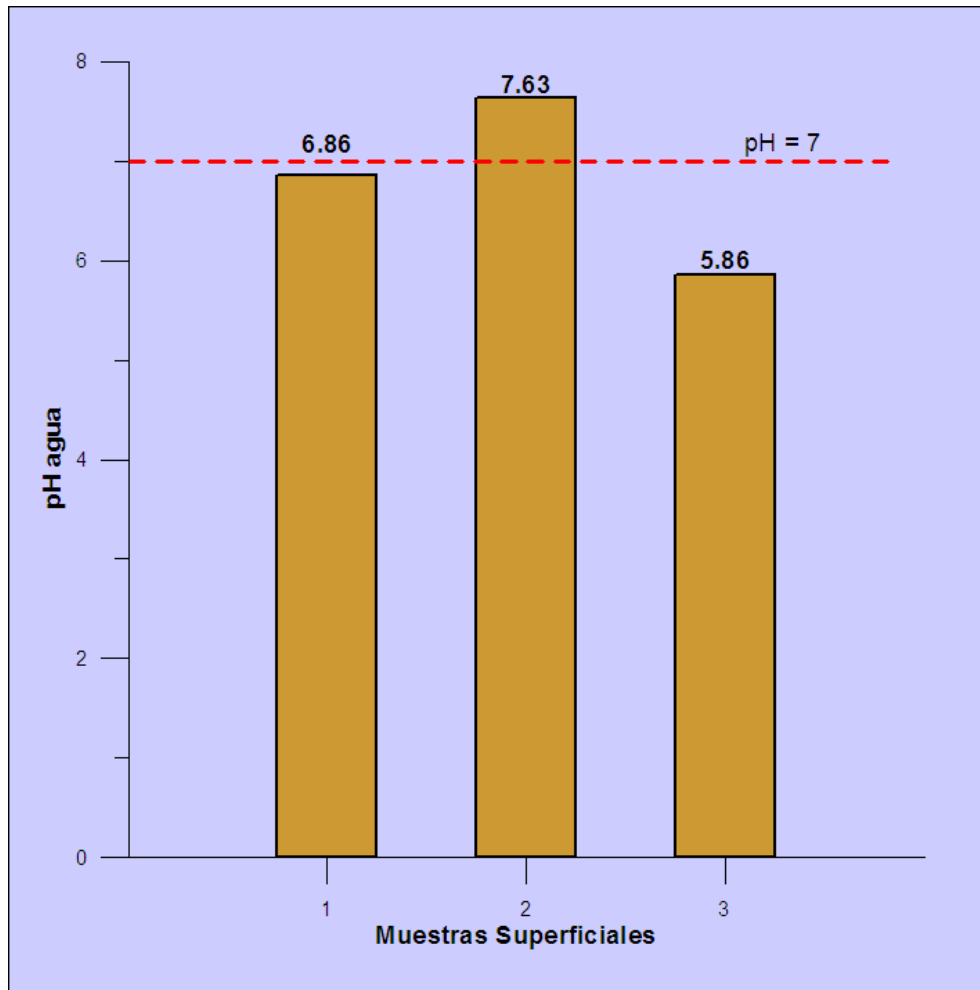


Figura 6. 21. Valores medios de pH medido en agua de las muestras superficiales C1, C2 y C3.

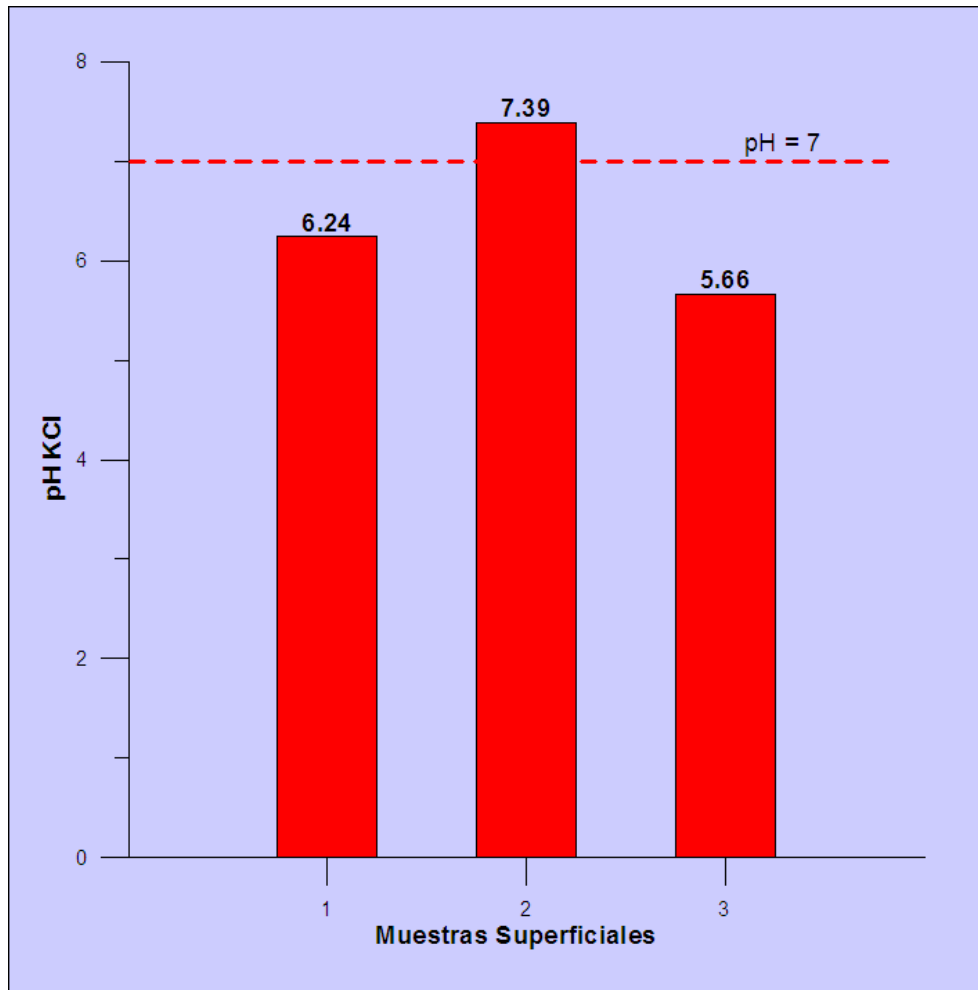


Figura 6. 22. Valores medios de pH medido en KCl de las muestras superficiales C1, C2 y C3.

Con respecto a los datos de conductividad eléctrica, la salinidad en las zonas C1 y C2 es muy inferior a la registrada en la zona C3, alcanzando en este último caso valores superiores a 11,12 dS/m, lo cual es considerado como muy salino. Esto muestra que en la zona C3 se produce un proceso de acumulación de sales, ya sea por arrastre superficial de las mismas y posterior acumulación, o bien, tras evaporación de agua, debido a un ascenso capilar de las sales acumulándose en capas superficiales de suelo (Figura 6.23).

La clase textural predominante en las muestras superficiales es la franco arenosa. Una característica común a todas ellas es el bajo porcentaje de arcilla, junto con un moderado nivel de limo y la importante presencia de arena.

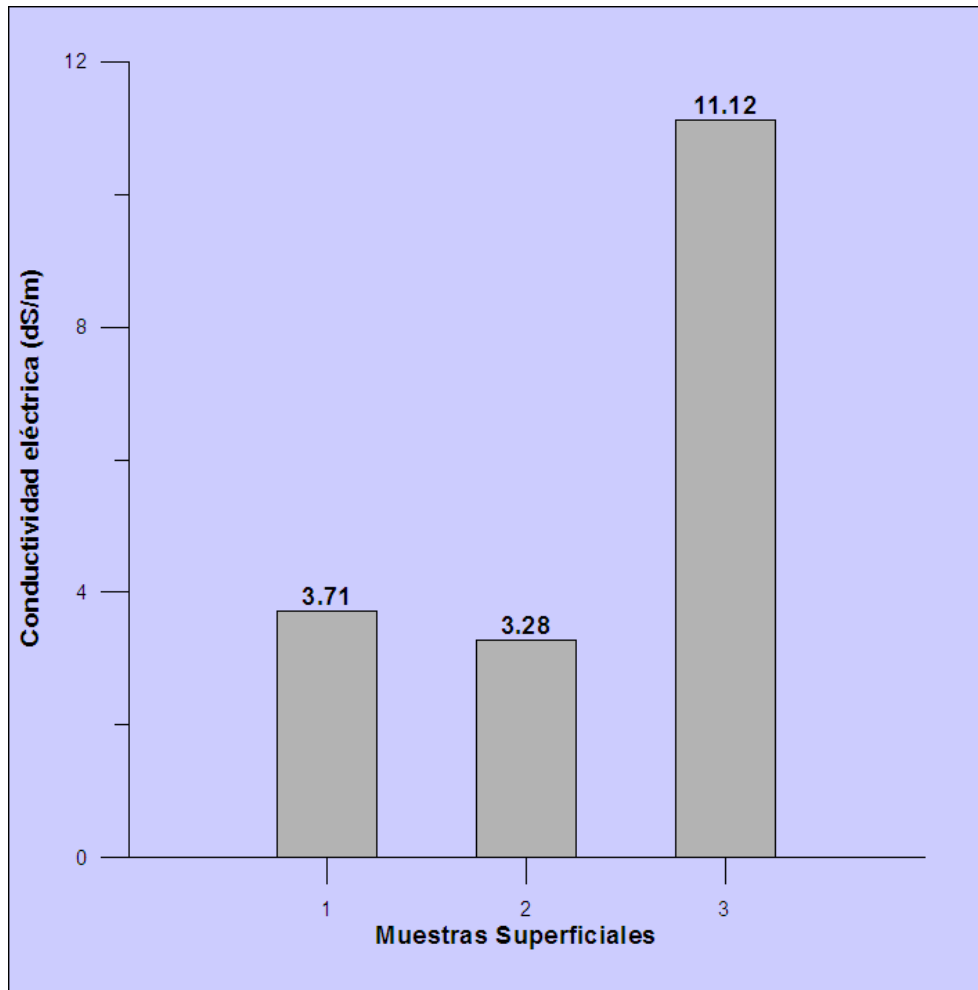


Figura 6. 23. Valores medios de conductividad eléctrica de las muestras superficiales C1, C2 y C3.

Aprovechando la realización del sondeo mecánico en el depósito “El Lirio” (Figura 6.20), se tomaron muestras cada metro de profundidad sobre las que se determinaron las características del pH, de conductividad eléctrica y contenidos totales de metales pesados.

En la Figura 6.24 se aprecia cómo los valores de pH varían en torno a un valor de pH igual 7 en las diferentes capas muestreadas, tanto para el determinado en agua como el medido en solución KCl. Para los valores de pH medidos en agua se pueden apreciar, según la Figura 6.24, cuatro regiones o zonas. La primera de ellas sería la que engloba los dos primeros metros del depósito donde se pasa de un valor alcalino de 7,47 en superficie a un valor ligeramente ácido de 6,7. La segunda zona, que va desde los 2 metros hasta los 6 metros de profundidad, se caracteriza por valores alcalinos comprendidos entre 7,24 y 7,51. La tercera zona, comprendida entre los 6 metros y los

13 metros de profundidad, se caracteriza por una disminución del pH que alcanza valores ligeramente ácidos, de 6,36. Por último la cuarta zona, que comprende los últimos metros del sondeo, desde los 13 metros a los 15 metros de profundidad, se caracteriza por un aumento del pH hasta alcanzar valores alcalinos máximos de 7,89. Las tres últimas muestras de esta zona se tratan de muestras pertenecientes al sustrato, las cuales presentan los mayores niveles de pH, tratándose por tanto de las muestras más alcalinas.

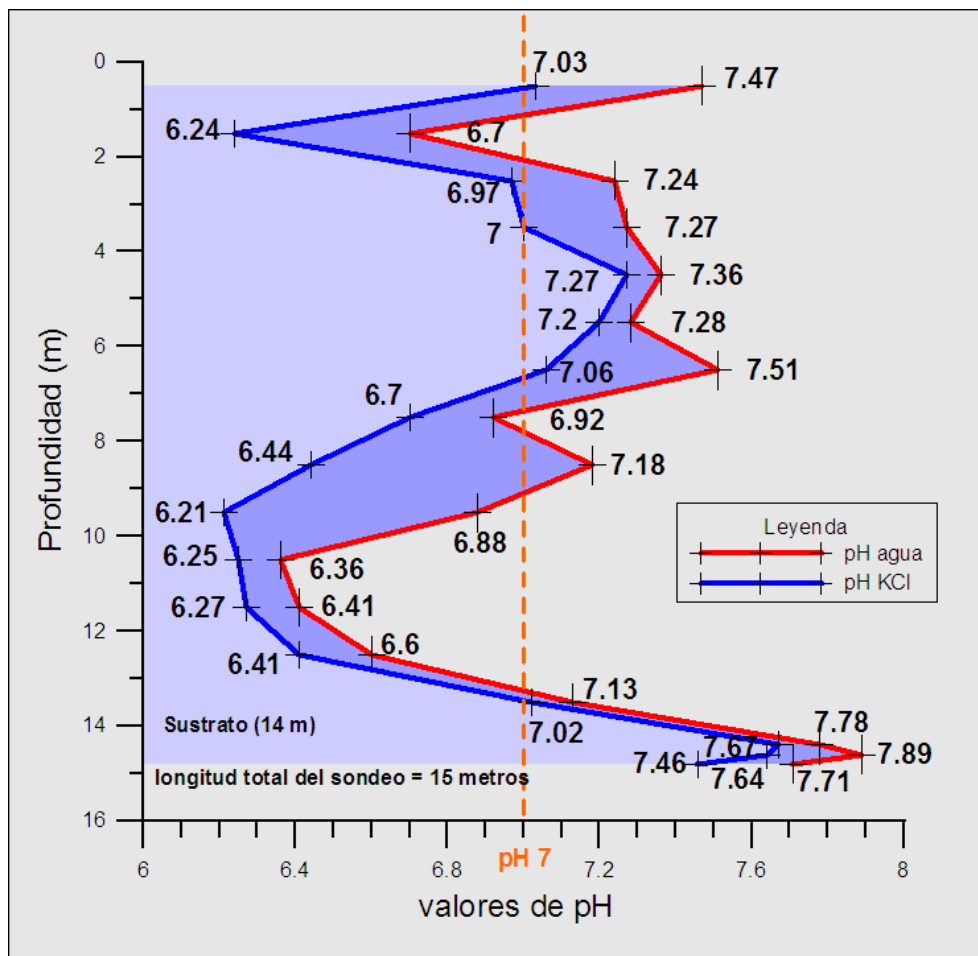


Figura 6. 24. Valores de pH de las muestras del sondeo.

Para el caso del pH medido en KCl la distribución vertical de los valores es semejante al patrón comentado anteriormente. Únicamente se diferencian de los anteriores por una ligera disminución en todos los puntos muestreados, lo cual es debido a que cuando se utiliza esta sal en sustitución del agua, el potasio desplaza a los hidrógenos de los lugares de cambio lo que provoca una ligera bajada del pH (Figura 6.24).



Que los valores de pH sean algo más ácidos en profundidad que en superficie es lógico puesto que existe una oxidación más activa de los sulfuros en superficie, dando lugar a sulfatos, cosa que no ocurre en medios más profundos de naturaleza reductora.

La Figura 6.25 representa los valores de la conductividad eléctrica de las muestras del sondeo. Como se aprecia en la gráfica, también se pueden distinguir cuatro zonas que se ajustan a las cuatro zonas comentadas para el pH; ello es lógico pues a medida que descende el pH aumenta el contenido de sales y esto incrementa el valor de la conductividad eléctrica, y la inversa. Por ello, si se comparan las curvas de la Figura 6.24 y la Figura 6.25, se observa que valores máximos de pH corresponden valores mínimos de conductividad eléctrica y viceversa. La zona que va desde los 7 metros hasta los 13,50 metros de profundidad es la que presenta los valores más importantes de conductividad, catalogándose los puntos muestreados de esta zona como moderadamente salinos.

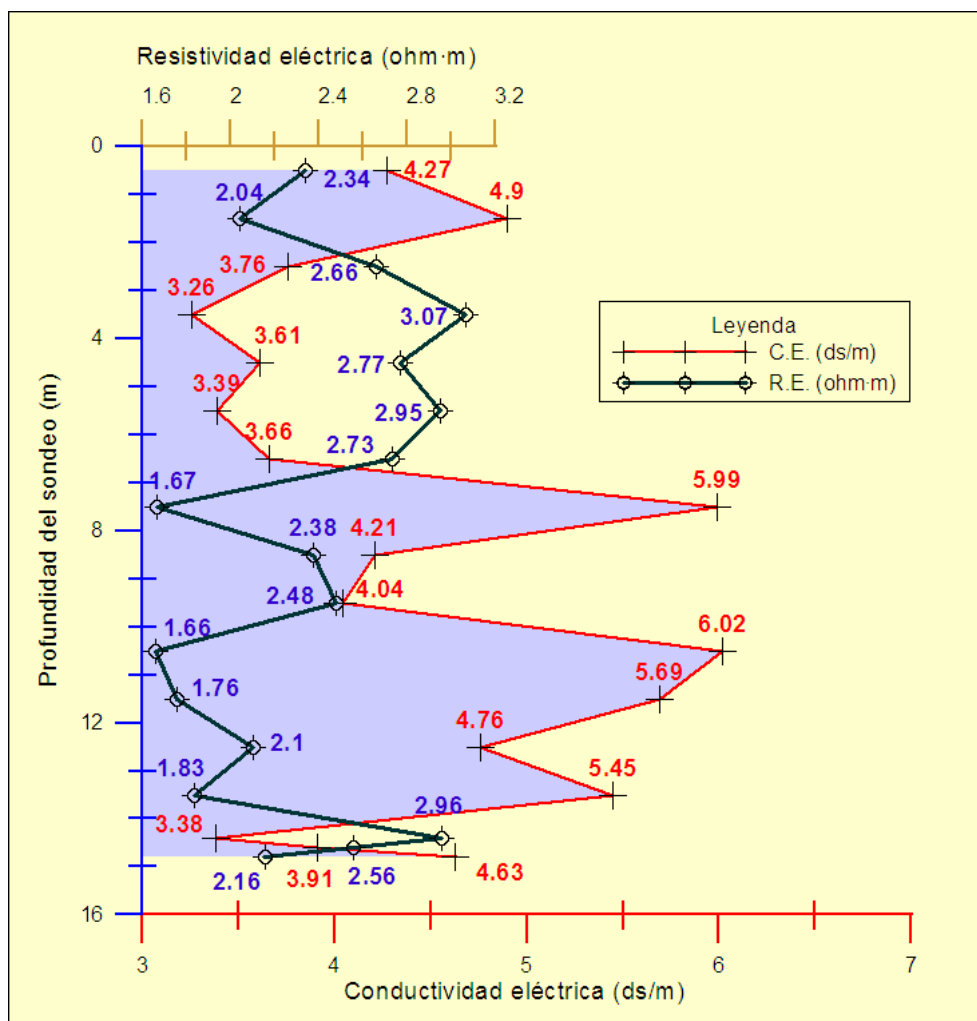


Figura 6. 25. Valores de conductividad eléctrica y de resistividad eléctrica de las muestras del sondeo.

La clase textural predominante del sondeo es la franco limosa, aunque a lo largo del sondeo se suceden varios tipos de texturas. El contenido en arcilla es bajo y medianamente constante hasta los 13 metros de profundidad; a partir de ésta, y en concordancia con la aparición del sustrato, las arcillas aumentan su presencia llegando a valores cercanos al 20 %. Es de destacar la textura franco arenosa de los dos primeros metros del sondeo. La mayor cantidad de arena en superficie se puede explicar debido a una pérdida activa de las partículas más finas debido a la acción hídrica (erosión diferencial), muy fuerte en las zonas desprovistas de vegetación.

### Metales totales en muestras superficiales y sondeo

Los metales analizados en las muestras superficiales C1, C2 y C3 fueron zinc, plomo, cobre y cadmio, por ser estos los metales pesados principales de la zona minera de estudio.

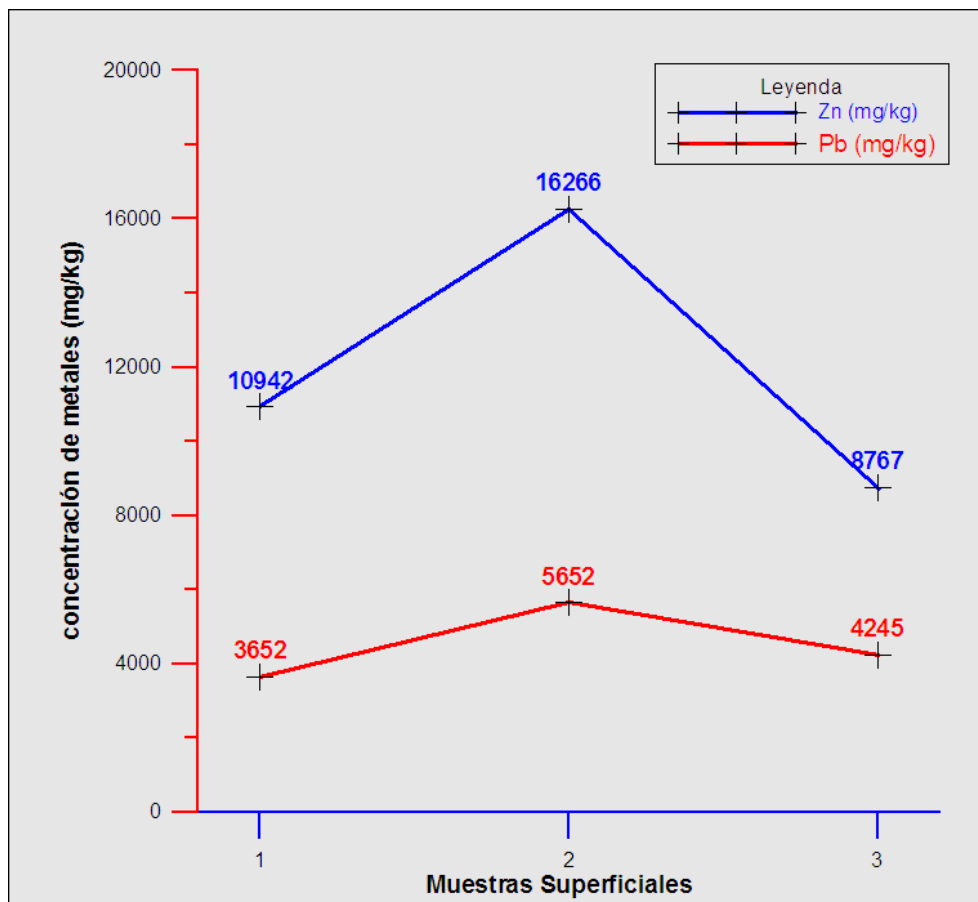


Figura 6. 26. Concentración media de Zn total y Pb total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “El Lirio”.

En la Figura 6.26, son de destacar los altos contenidos de zinc en las muestras superficiales que superan los máximos permitidos por las legislaciones de diversos países (Faz *et al.*, 2003a); particularmente la legislación española establece un máximo de zinc para suelos agrícolas de 150 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 450 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1.990). La muestras superficiales del punto de muestreo C2 alcanza niveles superiores a 15 000 mg/kg del metal.

La concentración de zinc varía de unas zonas de muestreo a otras siendo estos valores superiores en la zona C2. Esto es debido a que cada zona presenta unas características propias en cuanto a relieve, capacidad de retención del metal, etc., dando lugar a zonas de acumulación o bien a zonas de lavado superficial por arrastre. Donde existe una mayor acumulación de zinc en superficie se ha podido producir una acumulación por fijación, mientras que en los puntos con un menor nivel de metal, C1 y C3, ha podido ocurrir un lavado vertical, cierta absorción por parte de la vegetación instalada o un arrastre superficial del metal.

Se puede concluir que los contenidos de zinc en superficie son elevados en las muestras tomadas de 0 a 15 cm, experimentando diferencias entre zonas.

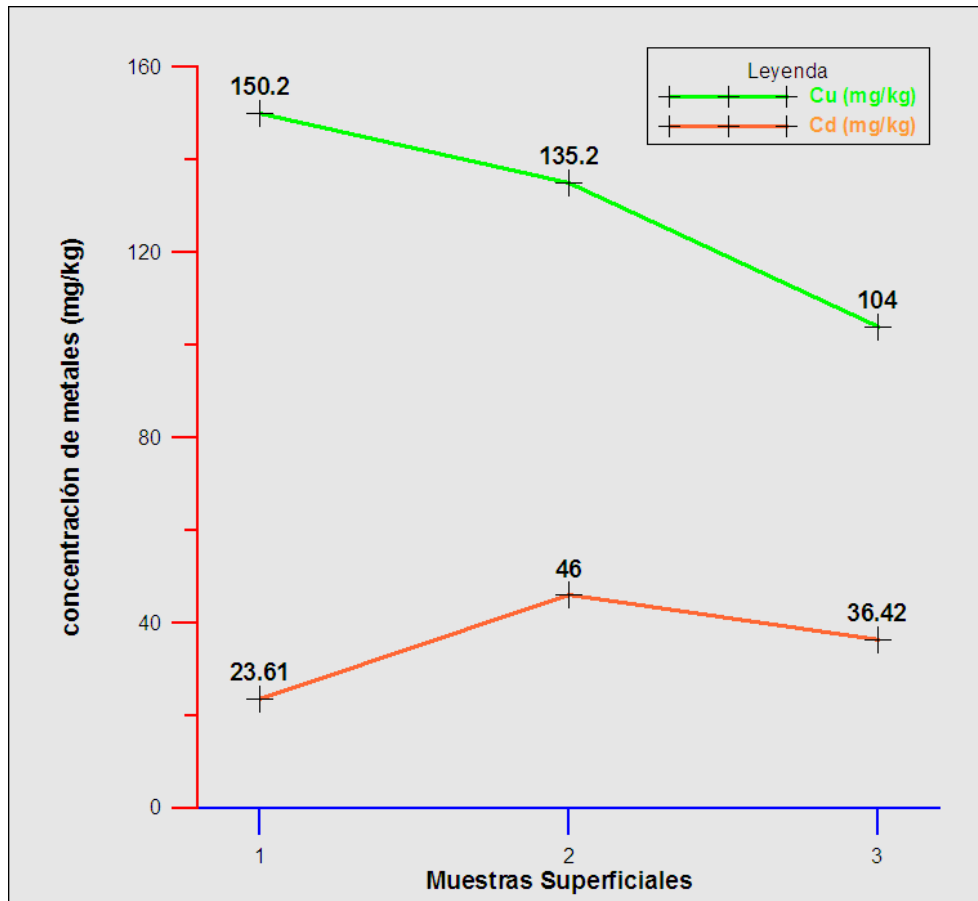


Figura 6. 27. Concentración media de Cu total y Cd total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “El Lirio”.

En cuanto al plomo, la legislación española establece para suelos agrícolas niveles máximos de plomo de 50 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 300 mg/kg para uno de pH>7; por otra parte, los límites máximos de plomo en lodos de depuradora para uso agrícola son 750 mg/kg para un pH<7 y de 1 200 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1.990). Según la Figura 6.26 los contenidos de plomo superan ampliamente estos límites máximos establecidos por la legislación; esto es de esperar pues se trata de residuos procedentes del procesamiento de sulfuros metálicos.

Como en el caso del zinc, la zona C2 es la que presenta la mayor concentración de plomo, seguida por la C3 y posteriormente la C1; al igual que en el caso del zinc existen diversos procesos de erosión eólica y lavado por solubilización, formando sales neutras solubles, que pueden causar estas diferencias.

Para el cobre, la legislación española establece un nivel máximo de 50 mg/kg para un suelo agrícola de pH<7 y de 210 mg/kg para uno de pH>7; por otra parte, el límite máximo de cobre en lodos de depuradora para uso agrícola es de 1 000 mg/kg

para un  $\text{pH} < 7$  y de 1 750 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990). Según la Figura 6.27 los niveles medios de cobre de las diferentes muestras superficiales se encuentran por debajo de los límites máximos permitidos por la legislación española, lo que indica que, a pesar de tratarse de residuos mineros, estos no contienen cantidades del metal que puedan preocupar medioambientalmente.

Las zonas C1, C2 y C3 (Figura 6.27) presentan una concentración media de 150, 135 y 104 mg/kg respectivamente, lo que refleja una homogeneidad en la concentración de cobre a lo largo del depósito, pudiendo establecerse como que los mecanismos que pueden variar los niveles de cobre suceden de forma semejante en las diversas zonas del depósito.

Para el último elemento analizado en las muestras superficiales, el cadmio, la legislación española fija un nivel máximo en suelos agrícolas de 1 mg/kg para un suelo de  $\text{pH} < 7$  y de 3 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$ ; para el caso de lodos de depuradora para uso agrícola estos niveles máximos se fijan a 20 mg/kg para un  $\text{pH} < 7$  y de 40 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990).

A excepción del cobre, la concentración máxima de cadmio vuelve a producirse en la zona C2 al igual que para el zinc y el plomo (Figura 6.27) con una concentración máxima de 46 mg/kg, siendo estos niveles superiores a los establecidos por la normativa española.

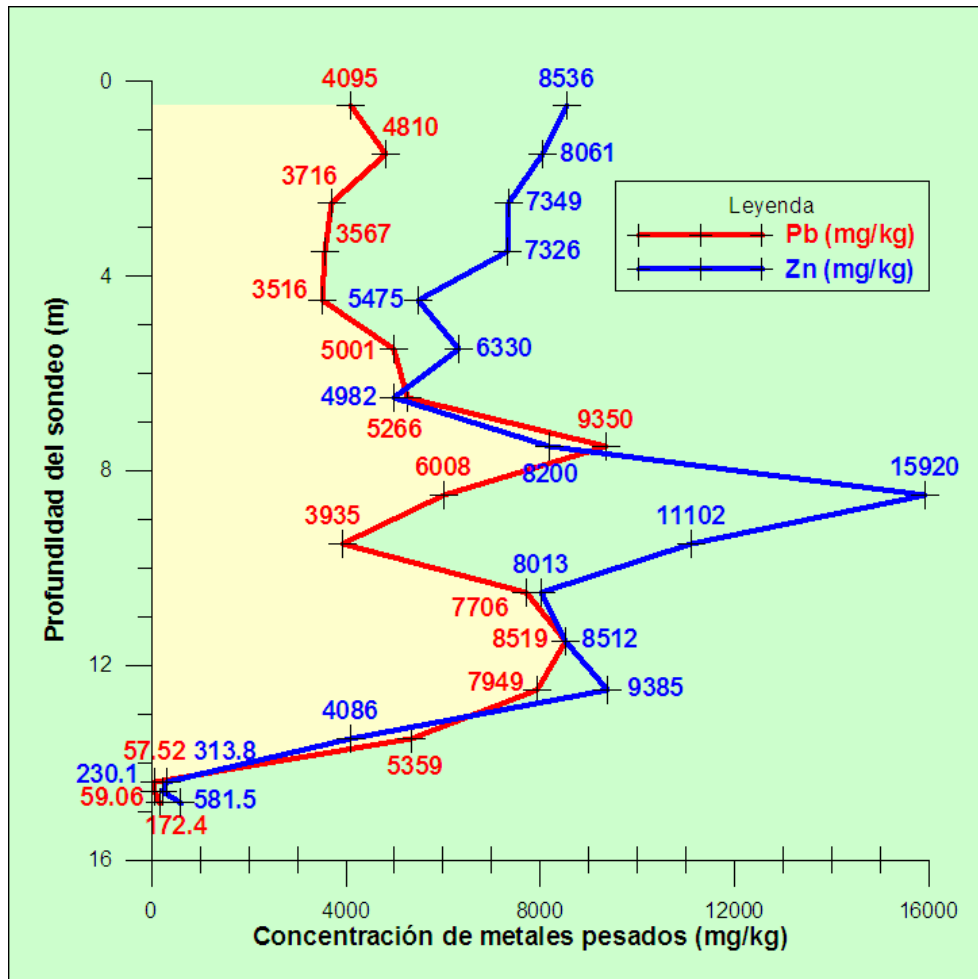


Figura 6. 28. Concentración de Pb total y Zn total en los puntos de muestreo del sondeo.

A través del sondeo mecánico realizado en el depósito “El Lirio” se han podido analizar contenidos de metales en cada metro (zinc, plomo, cobre y cadmio). Comenzando por el zinc, todos los puntos muestreados del sondeo sobrepasan los límites máximos establecidos por la legislación española, a excepción de los tres últimos que corresponden a muestras del sondeo pertenecientes al sustrato miocénico (Figura 6.28). De hecho, la muestra tomada a la profundidad de 13 a 14 metros sufre una disminución notable de zinc en comparación con la capa inmediatamente superior, lo cual es debido a que esta muestra incluye el límite con el sustrato.

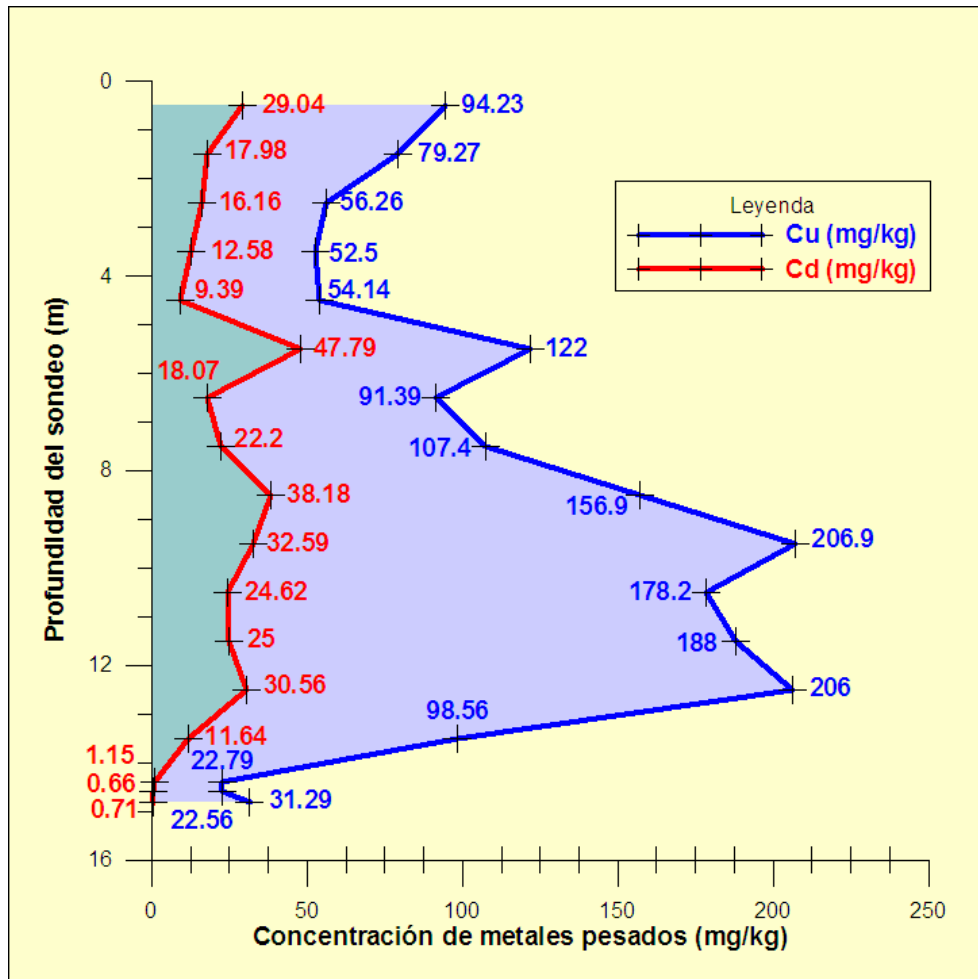


Figura 6. 29. Concentración de Cu total y Cd total en los puntos de muestreo del sondeo.

Observando otra vez la Figura 6.28, para el caso del plomo, los análisis de las muestras dan unos resultados similares a los obtenidos para el zinc, en cuanto a la tendencia de sus contenidos, volviéndose a reproducir una disminución del contenido del plomo para las muestras pertenecientes al sustrato. Entre los 7 y los 13 metros se obtienen las mayores concentraciones de metales por zinc y plomo, exceptuando alguna muestra que está fuera de la tendencia general del intervalo, de todo el sondeo.

En la Figura 6.29, al contrario de lo que sucede para los metales anteriores, presenta unas concentraciones inferiores a los límites establecidos por las diferentes normativas consultadas (Faz *et al.*, 2002a). No obstante en la Figura 6.29 se puede apreciar como los residuos mineros contienen cantidades de cobre superiores a las registradas en el sustrato y, curiosamente, su máximas concentraciones se encuentran en el intervalo comprendido entre los 7 y los 13 metros del sondeo mecánico.

Respecto al contenido de cadmio en las muestras del sondeo, los contenidos a las distintas profundidades son elevados a excepción de las muestras tomadas en el sustrato, donde las concentraciones del metal descienden considerablemente tal y como sucedía en todos los metales anteriores. A pesar de que las concentraciones de cadmio a lo largo del sondeo siguen una tendencia más o menos uniforme, a excepción del sustrato donde estas concentraciones sufren una disminución significativa, no obstante, se puede apreciar que es también en el intervalo entre 7 y 13 metros donde se obtienen concentraciones ligeramente superiores al resto (Figura 6.29), sin considerar el valor de la muestra obtenida a los 5,50 metros.

### **6.1.5 Discusión de los resultados del depósito “El Lirio”**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D han permitido identificar diferentes zonas dentro del depósito de estériles mineros, en base a sus características resistivas, que se sintetizan a continuación.

- Las seudosecciones eléctricas obtenidas han permitido determinar la profundidad de los estériles mineros a lo largo de los perfiles geoelectricos; esto ha sido corroborado por el sondeo mecánico, el cual alcanzó el zócalo miocénico a partir de los 13,50 metros. Esta información geoelectrica ha servido para obtener el volumen de material almacenado en el depósito con bastante precisión, extremo éste que ha sido comparado con la información obtenida a través de la cubicación realizada a partir de las fotografías aéreas realizadas en 1956 cuando el depósito se encontraba en sus primeras fases de recrecimiento (Faz *et al.*, 2003a).
- Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D señalan una región somera en la parte occidental del depósito, caracterizada por valores altos de resistividad eléctrica y, que según la información que se dispone del sondeo mecánico y de los análisis geoquímicos, es debido a la presencia en superficie de un material de naturaleza franco arenosa y con un pH alcalino. La naturaleza franco arenosa es debida a una pérdida de los finos debido a una clasificación gravimétrica durante las etapas de vertido y a efectos de erosión hídrica y eólica. Por otro lado, un pH alcalino demuestra la existencia de procesos oxidativos de meteorización de los



restos de sulfuros en superficie que se ve intensificado por el clima mediterráneo semiárido, además aunque los procesos de salinización ocurren en superficie sin embargo estos valores altos de resistividad eléctrica demuestran que en la medida que estas sales se solubilizan, se van evacuando hacia zonas más bajas (Faz *et al.*, 2006).

- Los análisis geoquímicos han aportado que los valores de pH ligeramente ácidos ocurren a cierta profundidad del depósito. Esto es lógico pues son en estas regiones donde se dan ambientes reductores. Acompañando a una disminución del pH va un aumento de la conductividad eléctrica según los análisis geoquímicos de las muestras del sondeo. Esto último explica el porqué la tomografía eléctrica muestra regiones de resistividad eléctrica baja ( $< 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) a partir de los dos primeros metros de profundidad. Además los análisis geoquímicos de metales pesados han demostrado mayores contenidos de cobre, zinc, plomo y cadmio en las capas profundas del depósito lo cual favorece que las resistividades eléctricas obtenidas con tomografía eléctrica disminuyan (Faz *et al.*, 2005b).
- Los análisis geoquímicos de metales pesados sobre las muestras del sustrato han aportado valores de éstos que indican que no se ha producido una importante incorporación de zinc, cobre, plomo y cadmio al sustrato subyacente. La tomografía eléctrica ha reflejado esto último con contrastes de resistividad eléctrica entre el estéril y el sustrato mioceno.
- Todas las seudosecciones geoelectricas 2D y el bloque geoelectrico 3D, generado a partir de los perfiles de tomografía eléctrica 3D, muestran una región oriental del depósito con valores de conductividad eléctrica altos. Esta región se extiende desde la superficie hasta el contacto estéril-sustrato con una inclinación hacia el oeste. Esta región se caracteriza por presentar humedades significativas en superficie y la aparición de una vegetación autóctona espontánea, lo que se traduce en una posible filtración del agua hacia el interior del depósito durante épocas de lluvias. Si bien sería necesario ejecutar algún sondeo en esta zona puesto que el sondeo mecánico realizado en la parte occidental del depósito no ha detectado el nivel freático en las diferentes inspecciones realizadas (Faz *et al.*, 2004).

## 6.2 Depósito de estériles “Brunita”

### 6.2.1 Tomografía eléctrica 2D

En el depósito de estériles “Brunita” se han llevado a cabo cuatro perfiles de tomografía eléctrica 2D, realizados en septiembre de 2003 y febrero de 2004. Esta última campaña de medidas se realizó para repetir dos perfiles de la campaña de septiembre de 2003 que se consideraron inaceptables por su elevado error.

Perfil	Extremo Noreste			Extremo Sureste		
	X	Y	Z	X	Y	Z
A	686359,00	4164868,00	145,00	686546,00	4164683,00	228,00
B	686424,02	4164868,90	159,00	686611,00	4164685,28	167,00
C	686486,95	4164944,21	155,00	686664,05	4164747,08	-
D	Extremo Suroeste			Extremo Nordeste		
	X	Y	Z	X	Y	Z
	686397,00	4164752,00	160,00	686565,00	4164801,00	158,00

Tabla 6. 6. Coordenadas de los perfiles de tomografía eléctrica 2D.

Excepto el perfil D, el resto de perfiles se orientaron longitudinalmente al depósito de estériles (Figura 6.30). En la Tabla 6.6 se muestran las coordenadas de sus extremos, tomadas con GPS. Estos perfiles se desplegaron cubriendo la principal terraza de recrecimiento del depósito.

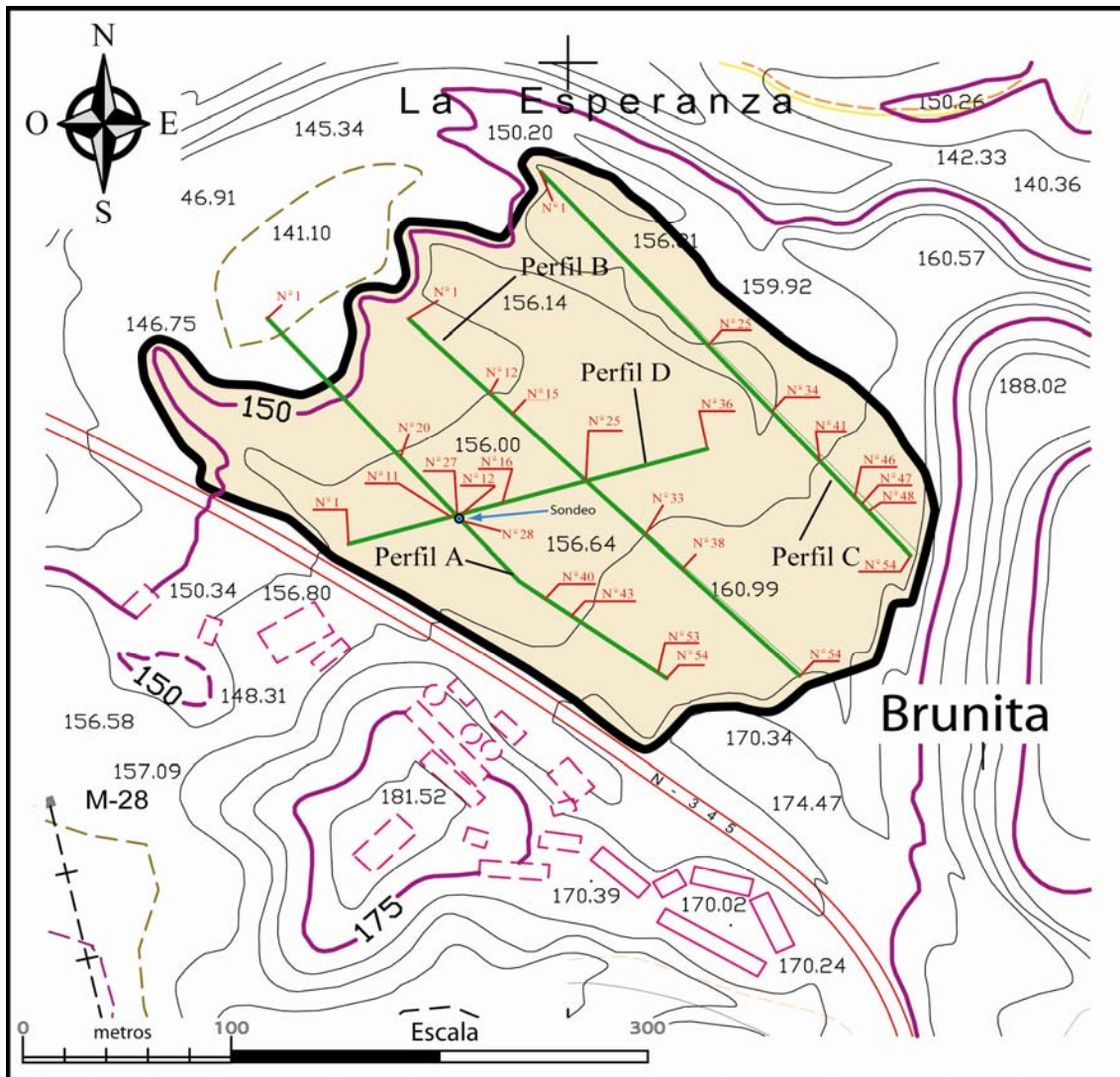


Figura 6. 30. Situación de los perfiles de tomografía eléctrica 2D y el sondeo mecánico sobre el depósito “Brunita”.

### Perfil A

Este perfil está formado por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 265 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito de estériles mineros (Figura 6.30).

El dispositivo de medida empleado fue el Schlumberger-Wenner que ofrece una adecuada sensibilidad a los cambios laterales y verticales de resistividad (ver Capítulo 4). Este perfil se llevó a cabo en febrero de 2004 repitiendo otro realizado en septiembre

de 2003 que dio unos resultados defectuosos por su elevado error, como ya se comentó anteriormente.

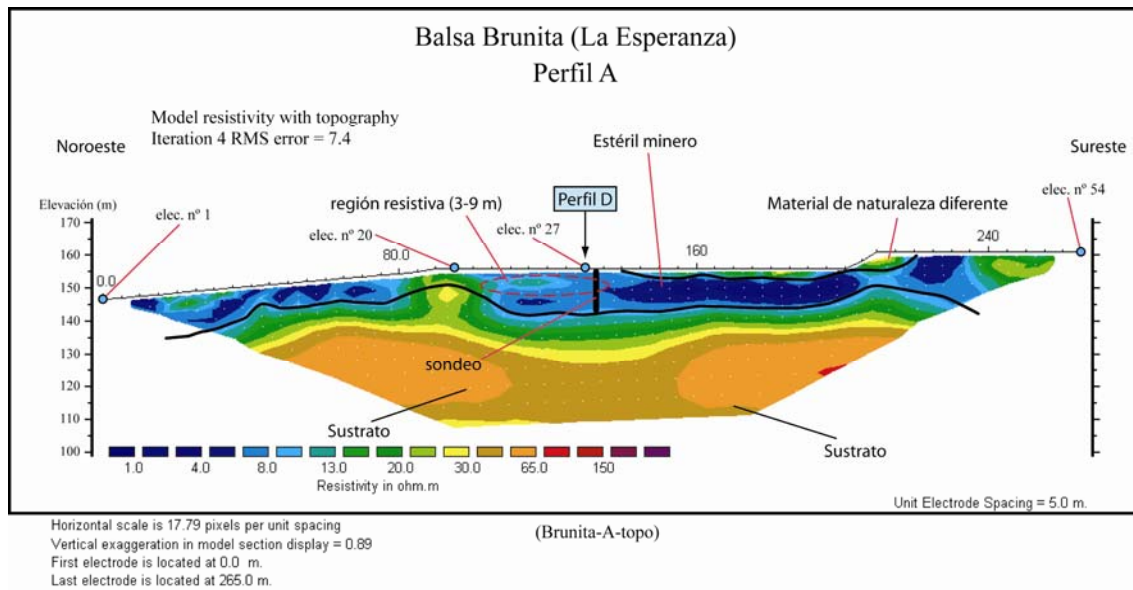


Figura 6. 31. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil A y situación del sondeo mecánico.

En la Figura 6.31 se presenta la seudosección geoelectrica del Perfil A, junto con la regleta de valores de resistividad (ohm-m) que se ha seleccionado para todos los perfiles. Esto último permite tener todas las seudosecciones geoelectricas normalizadas "resistivamente", es decir, que en todos ellos, los mismos colores se refieren a los mismos valores de resistividad, lo cual facilita su comparación. Sobre la superficie de la seudosección se ha indicado la posición de algunos electrodos que sirven de referencia frente a cambios de topografía o de características físico-químicas del material.

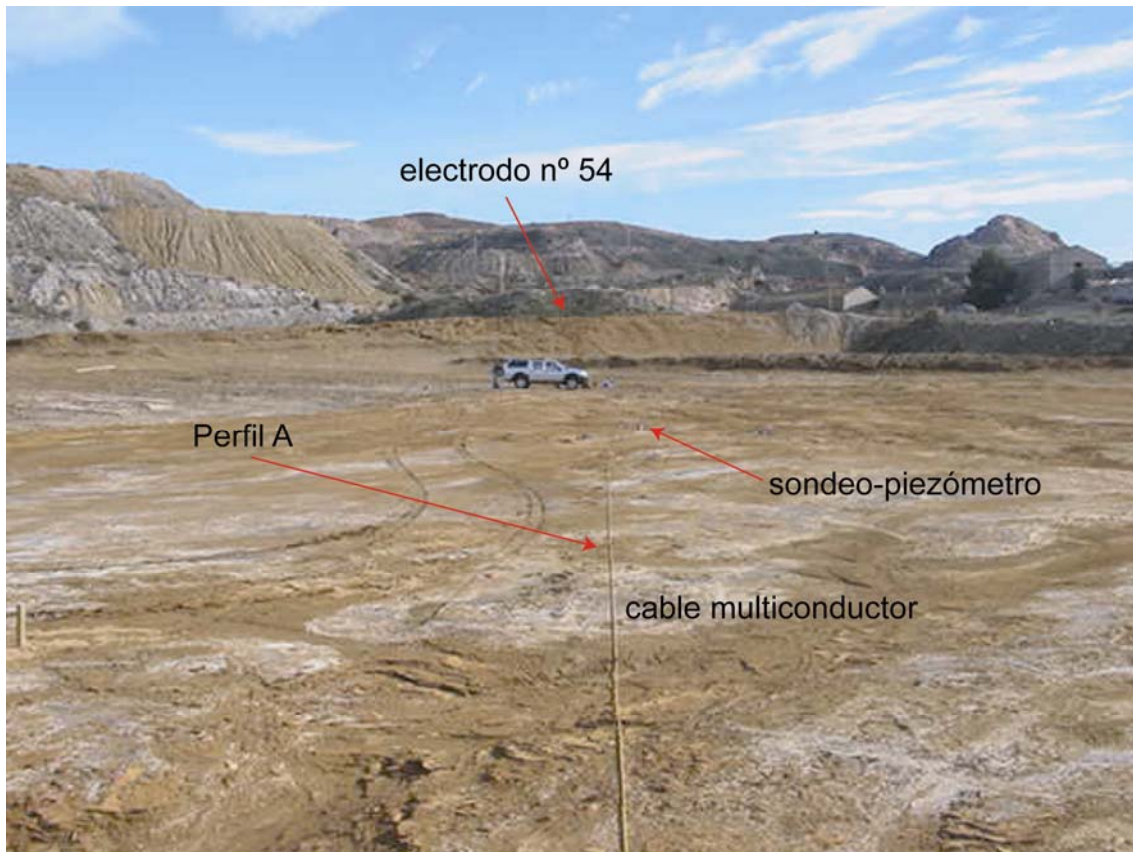


Foto 6. 17. Vista parcial del Perfil A orientada hacia electrodo nº 54.

Al igual que sucedió para lo tomografía eléctrica aplicada en el depósito de estériles “El Lirio”, el material vertido ofrece un contraste resistivo muy claro frente a los materiales del sustrato rocoso formado por calizas y dolomías del Complejo Alpujárride y por esquistos grafitosos y cuarcitas del Complejo Nevado-Filábride. Según la tomografía eléctrica 2D los valores resistivos para el estéril del depósito se encuentran por debajo de 8 ohm·m. Los análisis físico-químicos realizados a las muestras del sondeo mecánico también corroboran dicho valor. A medida que se va profundizando en la seudosección los valores de resistividad se van incrementando por la influencia de los materiales correspondientes al sustrato (Faz *et al.*, 2003b) y también debido a la presencia de material de granulometría arenosa; de manera opuesta a lo que ocurre en los metros iniciales (entre 0 y 9 metros) donde predomina la granulometría tipo limo y esto hace disminuir la resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica de estos materiales se caracteriza en la seudosección geoelectrica con valores superiores a 13 ohm·m.

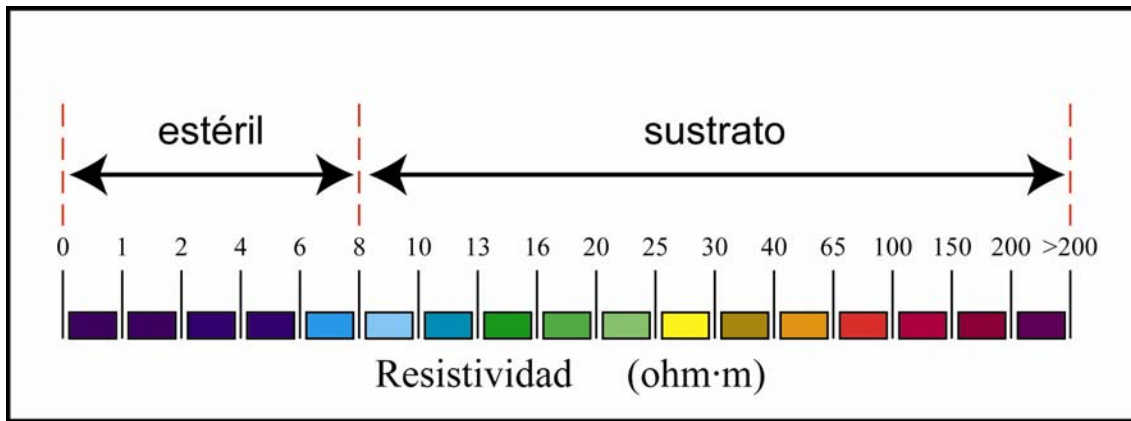


Figura 6. 32. Regleta de valores de resistividad empleada en el depósito “Brunita”.

La pseudosección geoelectrica del Perfil A (Figura 6.31) delimita fielmente el espesor del depósito de estériles, aproximadamente unos 14 metros, que ha sido cotejado por el sondeo mecánico; esto ha sido posible por el contraste de resistividad existente entre los estériles y los materiales del sustrato formado por micaesquistos grafitosos, cuarcitas, calizas y dolomías. La pseudosección señala algunas zonas de interés dentro del depósito. Destaca una zona superficial en la parte oriental del perfil donde las resistividades aumentan por encima de 8 ohm·m y que en superficie se manifiesta por lajas de estéril cementado; próximo al sondeo se refleja otra región resistiva en la que los materiales depositados presentan diferentes características de resistividad eléctrica (> 8 ohm·m), como ha quedado reflejado en los análisis de conductividad y pH realizados sobre las muestras del sondeo. Por último, en la pseudosección se manifiesta de forma clara la región ocupada por los estériles y el sustrato.

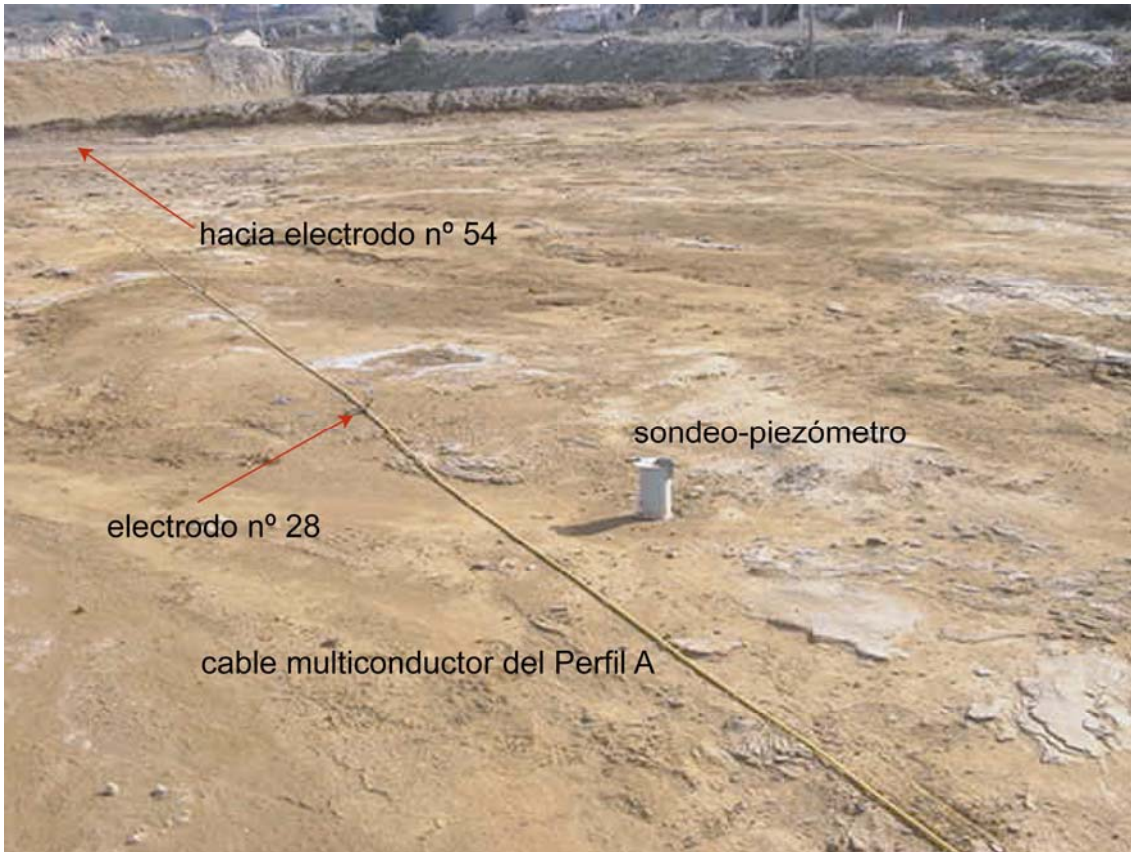


Foto 6. 18. Situación del sondeo-piezómetro en el Perfil A.

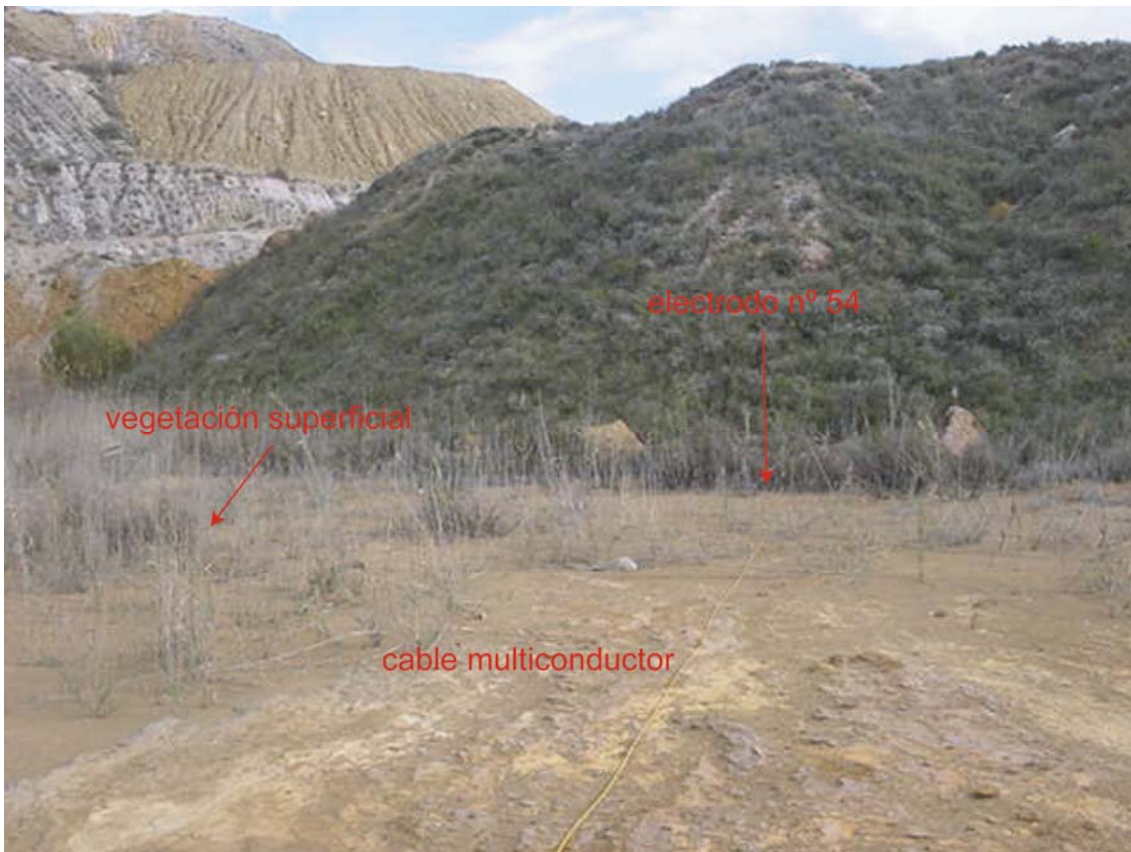


Foto 6. 19. Extremo del Perfil A, mostrando la posición del electrodo n° 54.

## Perfil B

Este perfil está formado por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 265 metros de longitud (Figura 6.30).

El dispositivo de medida empleado fue el Schlumberger-Wenner. Este perfil se realizó en septiembre de 2003.

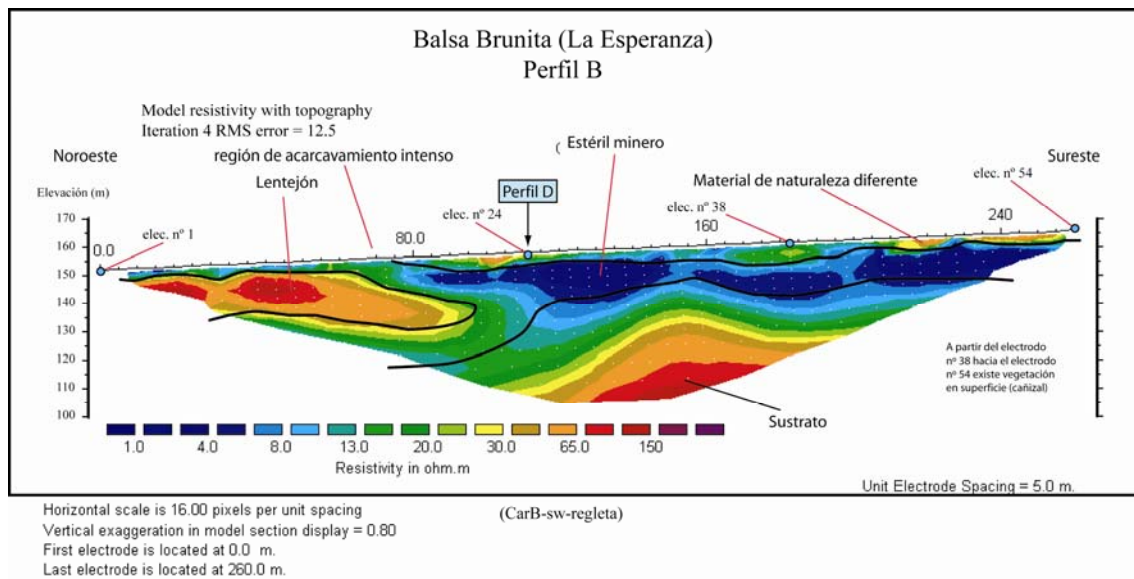


Figura 6. 33. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil B.

La seudosección de la Figura 6.33, al igual que en el perfil anterior, indica de forma nítida la geometría del sustrato sobre el que descansan los materiales vertidos, correspondiéndole a éstos una resistividades inferiores a 8 ohm·m y que hacia la parte occidental del perfil se reflejan las mayores profundidades, superiores a 20 metros, lo que es lógico puesto que se trata de un depósito en ladera y la pendiente de ésta es identificada de forma precisa por la tomografía eléctrica como sustrato. En la parte oriental del perfil se muestra, al igual que en el perfil anterior, una zona superficial con valores muy resistivos (> 30 ohm·m) que corresponden a material de depósito con textura arenosa (Foto 6.21). Sobre la posición del electrodo n.º 38 también se refleja otra zona resistiva (entre 8-30 ohm·m) que en superficie está comprendida por costras de estéril petrificado (Foto 6.22).



Hay que destacar bajo la zona de cárcavas (Foto 6.23) la presencia de una especie de lentejón resistivo que correspondería a materiales de granulometría heterogénea y poco consolidados o con fisuras en su estructura interna, como consecuencia de la erosión hídrica a la que se ve sometida esta zona del depósito y a los efectos de la rotura que sufrió el depósito en el año 1972 (Faz *et al.*, 2003b).



Foto 6. 20. Vista parcial del Perfil B orientada hacia electrodo nº 1.

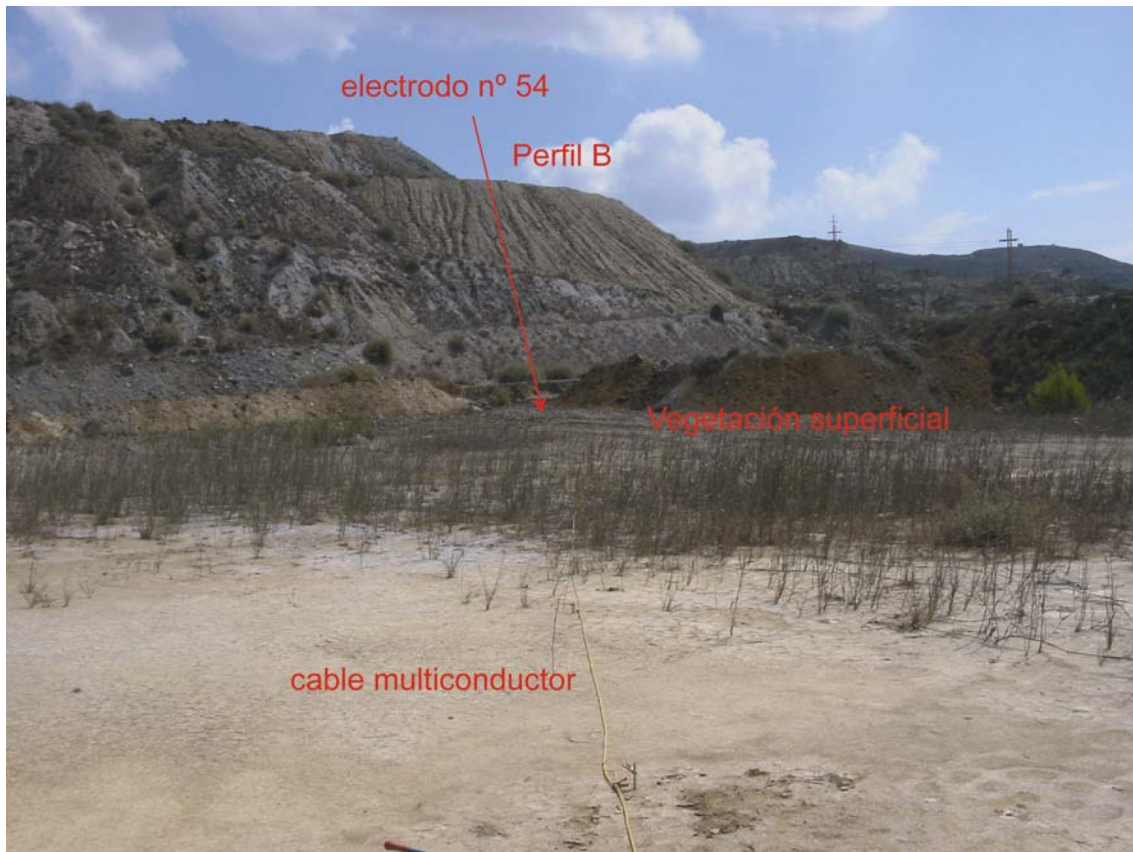


Foto 6. 21. Vista parcial del Perfil B orientada hacia electrodo nº 54.



Foto 6. 22. Costras cementadas en superficie.



Acarcavamiento intenso en el depósito de "Brunita"

Foto 6. 23. Acarcavamiento intenso de la zona noroccidental del depósito "Brunita".

### Perfil C

Este perfil está formado por tres tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 54 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 265 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito en esta zona (Figura 6.30).

Continuando con el dispositivo de medida empleado en los anteriores perfiles, el dispositivo fue el Schlumberger-Wenner. Este perfil se realizó en septiembre de 2003 (Figura 6.34).

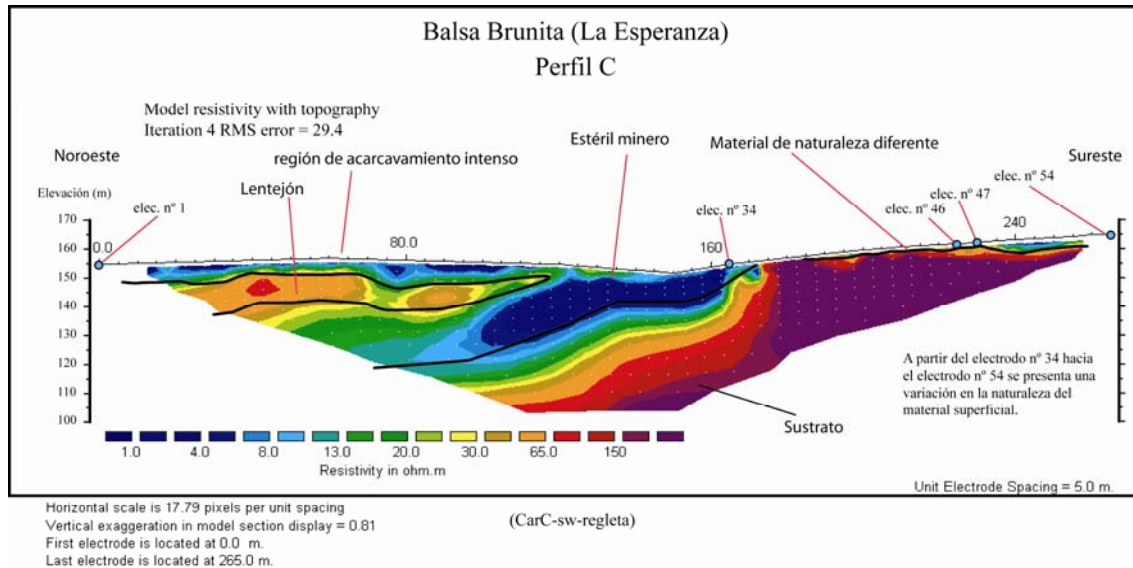


Figura 6. 34. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil C.

En la Figura 6.34, el resultado del procesamiento de las resistividades aparentes ofrece una seudosección de resistividades reales similar a la obtenida para el perfil comentado anteriormente, lo cual es un signo de la coherencia en las medidas. Por ello, lo comentado para el Perfil B se mantiene vigente para este perfil geoelectrico. Únicamente destacar la zona fuertemente resistiva de la parte oriental de la seudosección que limita una zona superficial de alteración química de los materiales depositados (sulfatación, oxidación, etc.).

En la Foto 6.24 y Foto 6.25 pueden verse diferentes vista de este perfil y como se puede apreciar la sulfatación de los materiales superficiales en la Foto 6.25.

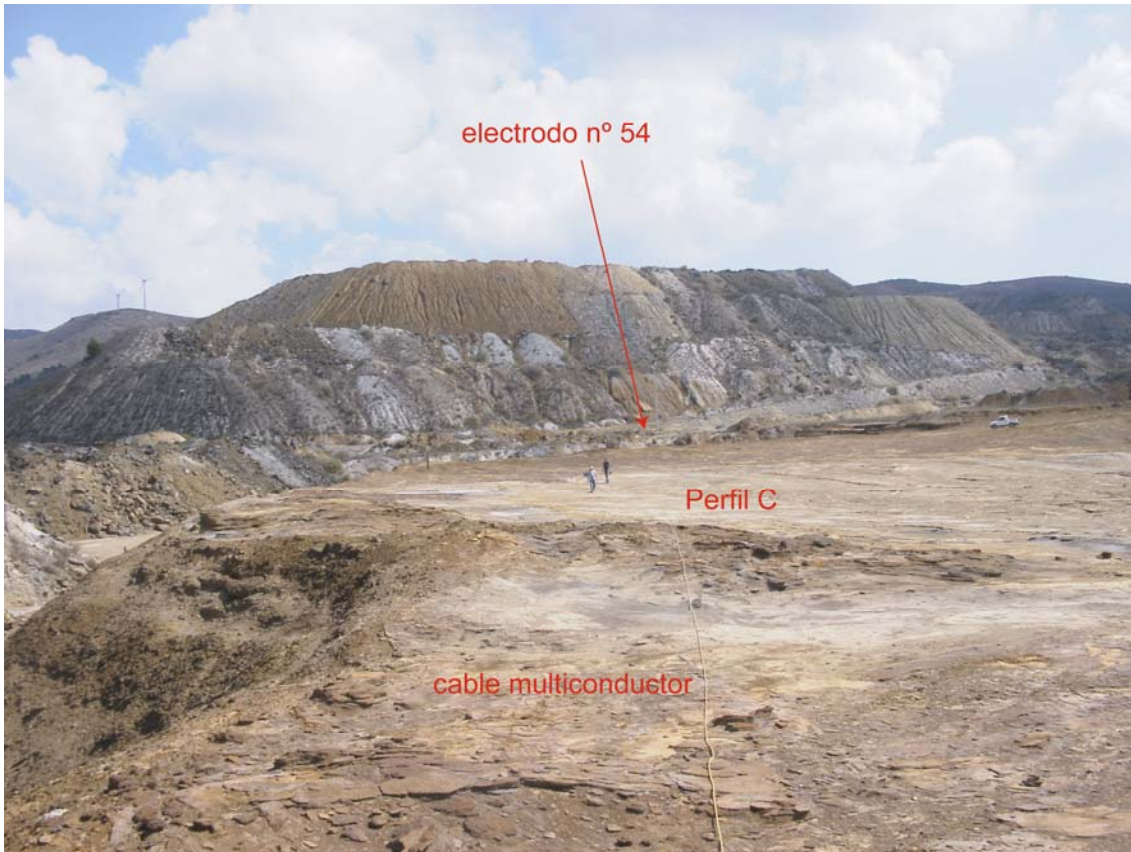


Foto 6. 24. Vista parcial del Perfil C orientada hacia electrodo n° 54.

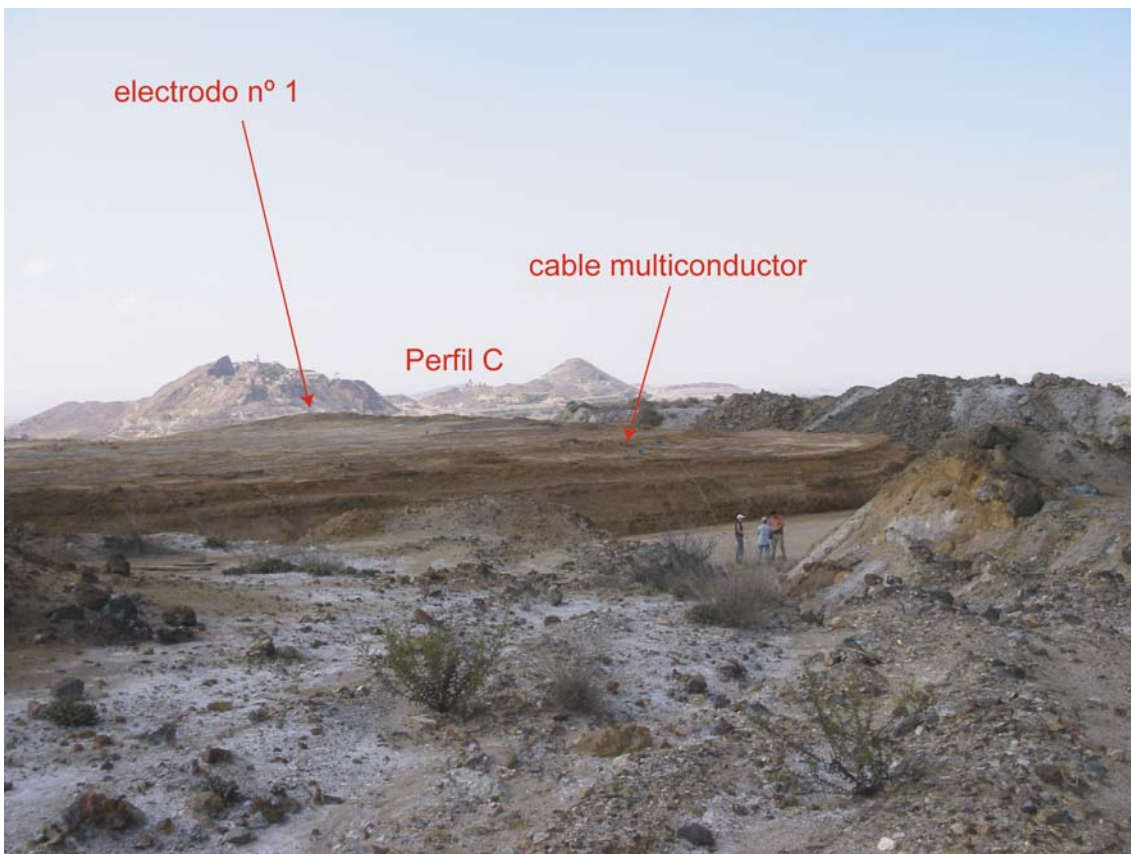


Foto 6. 25. Vista parcial del Perfil C orientada hacia electrodo n° 1.

## Perfil D

Este perfil está formado, por dos tramos de cable de 18 electrodos cada uno, 36 electrodos en total, con una separación entre electrodos de 5 metros con lo que se consiguió un perfil de 175 metros de longitud que cubrió perfectamente el ancho del depósito (Figura 6.30).

El dispositivo de medida empleado también fue el Schlumberger-Wenner. Este perfil se realizó en febrero de 2004 para repetir otro realizado en septiembre de 2003 que se obtuvo con un error inaceptable.

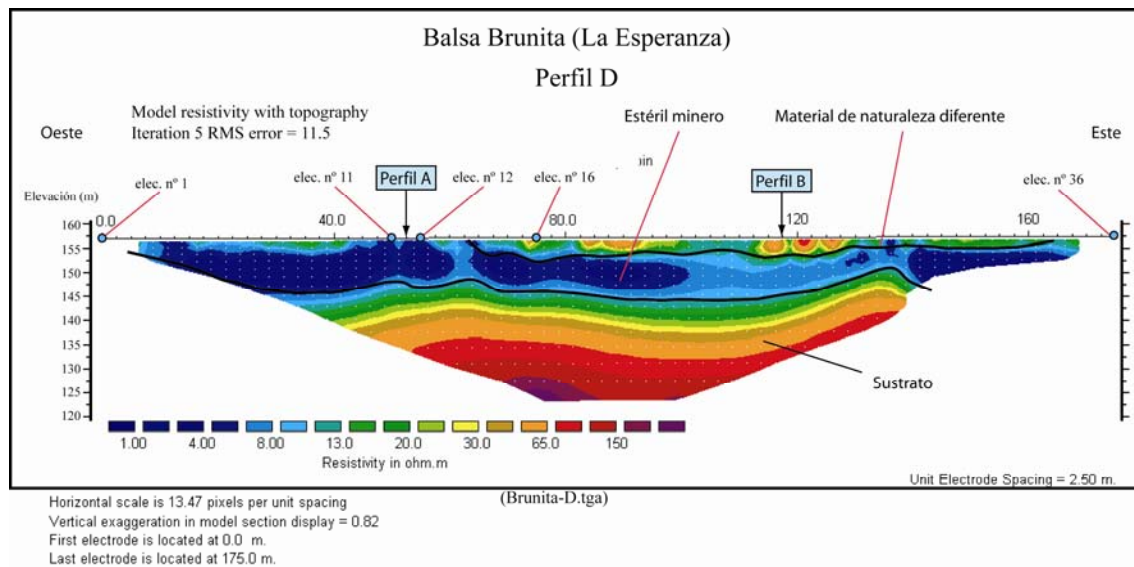


Figura 6. 35. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil D.

En la Figura 6.35 se presenta la seudosección geoelectrica del perfil D mostrando el estéril minero al que se le han asignado valores de resistividad eléctrica inferiores a 8 ohm·m. Se puede apreciar como hacia la izquierda de la seudosección el espesor de los materiales depositados va decreciendo puesto que es el límite del depósito con la carretera N-345 (Figura 6.30), por otro lado hacia la derecha de la seudosección el espesor se mantiene casi uniforme debido a que es donde se encuentra el talud de cierre del depósito. Entre el electrodo n° 16 y el electrodo n° 34 se identifica una región somera de resistividad eléctrica superior a 8 ohm·m, que puede superar en algún punto los 100 ohm·m, y que según la inspección sobre el terreno correspondería a material intensamente cementado y alterado químicamente en superficie (Foto 6.22). Se aprecia una región resistiva entre los 8 ohm·m y los 13 ohm·m próxima al contacto

sustrato-estéril que podría ser atribuible a material de granulometría arenosa como se ha puesto de manifiesto en los análisis granulométricos obtenidos a través del sondeo mecánico.

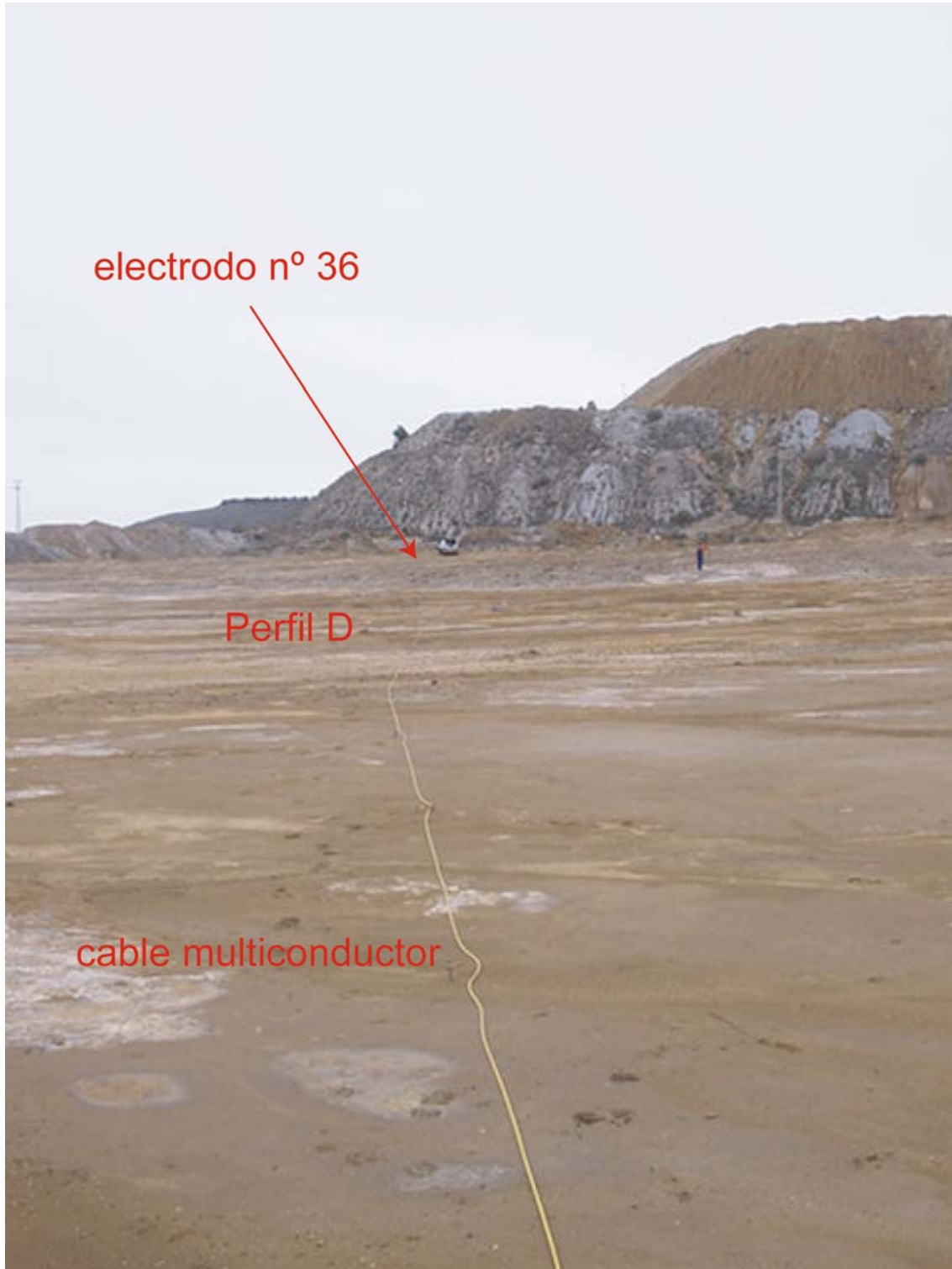


Foto 6. 26. Vista parcial del Perfil D orientada hacia electrodo nº 36.

En la seudosección de la Figura 6.35 se ha señalado el punto de cruce con el Perfil A, donde se ha realizado el sondeo mecánico, coincidiendo aproximadamente los espesores de ambas seudosecciones con el espesor de estéril obtenido a través del sondeo.

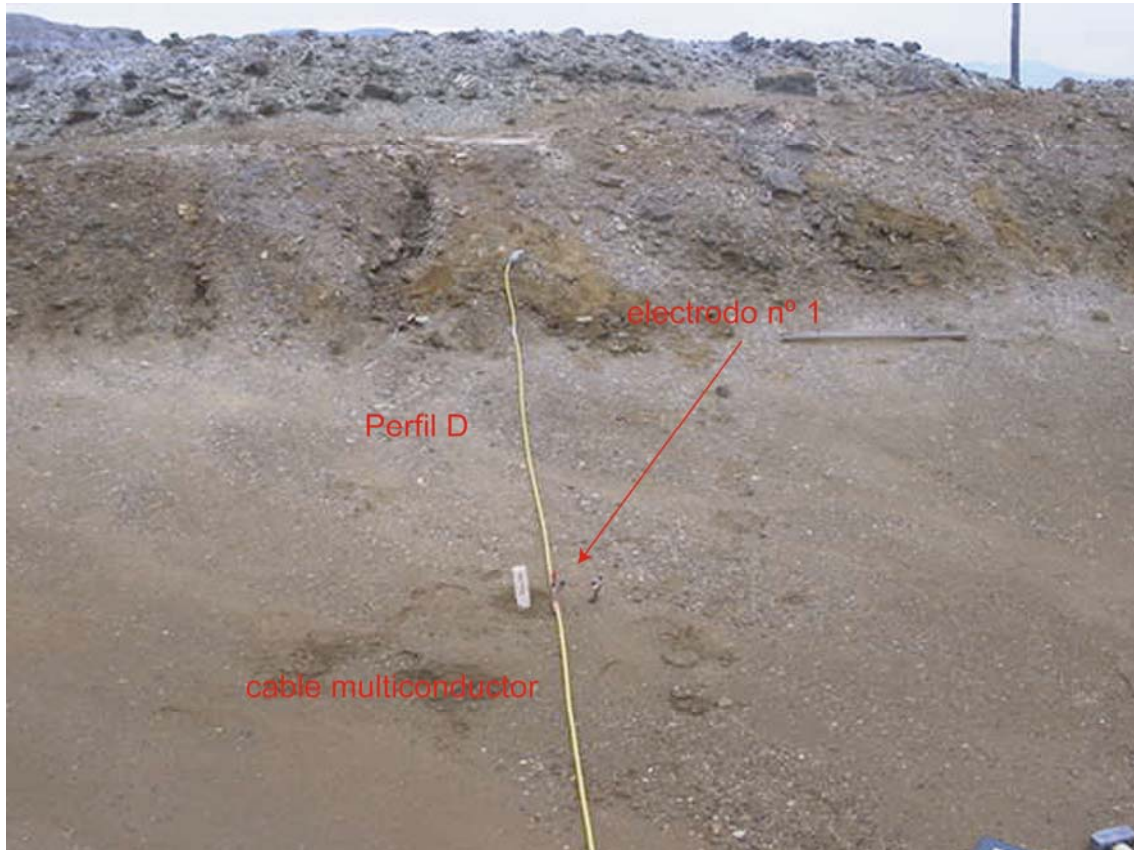


Foto 6. 27. Posición del electrodo n° 1 del Perfil D.



### Vista 3D de las pseudosecciones geoelectricas 2D

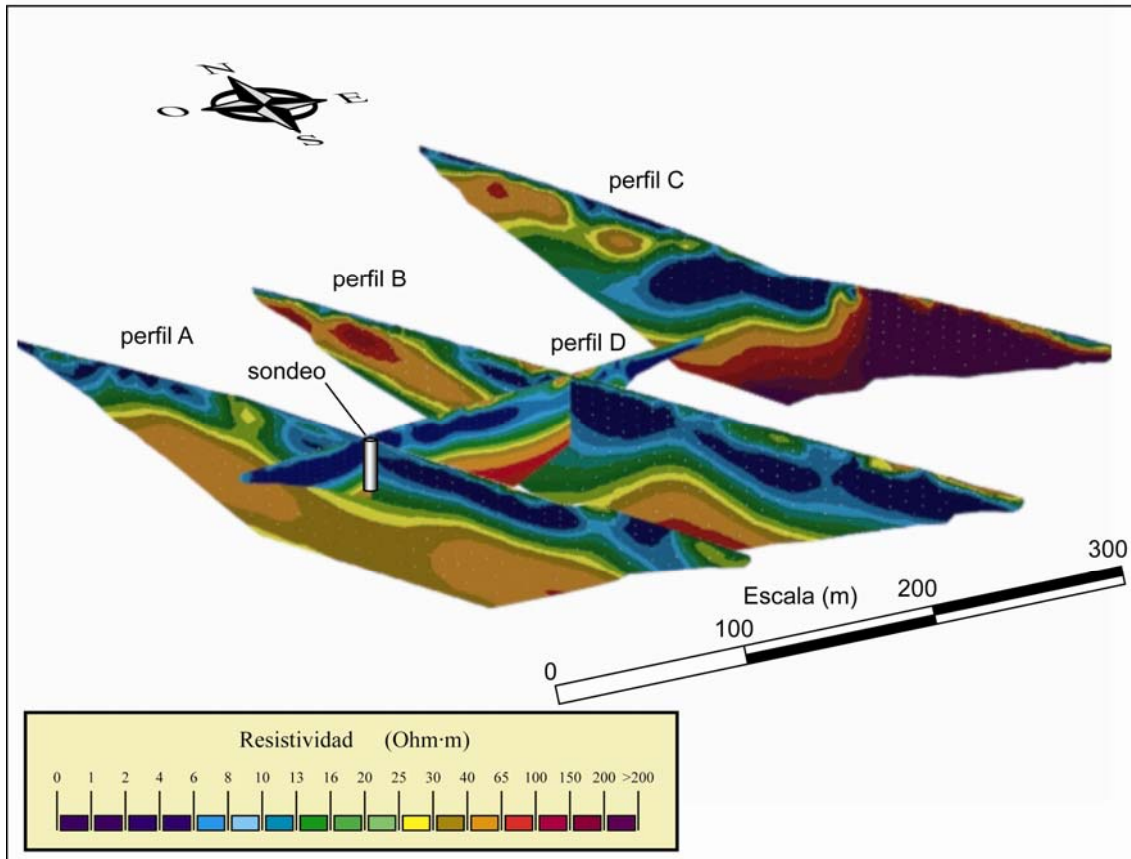


Figura 6. 36. Posición espacial de las diferentes pseudosecciones geoelectricas 2D.

En la Figura 6.36 se facilita una composición espacial, al igual que se hizo para el depósito de estériles “El Lirio”, de las diferentes pseudosecciones geoelectricas 2D comentadas anteriormente junto con la ubicación del sondeo mecánico que se realizó en el depósito. También aquí se observa un buen ajuste en las zonas de intersección de las pseudosecciones 2D lo que confirma la bondad de las medidas tomadas sobre el terreno y el procesamiento efectuado sobre ellas.

Observando la Figura 6.36 se aprecia claramente la región menos resistiva ( $< 8$  ohm·m) correspondiente al estéril minero vertido en el depósito. El espesor de este estéril crece hacia el norte y noreste del depósito; esto es lógico pues es donde la topografía de la ladera tiene sus menores cotas. En esta composición 3D se puede observar como en los perfiles B y C destaca la región resistiva ( $> 16$  ohm·m) que forma lentejones y que se ha comentado anteriormente. Esta región se ve muy sometida a erosión hídrica y filtraciones a partir de escorrentía superficial por lo que estos valores

de resistividad elevados se deben a pequeñas fisuraciones en la estructura interna del depósito, además esta zona fue afectada en el episodio de rotura que sufrió este depósito en el año 1972 (Faz *et al.*, 2003b).

### **Modelo 3D del contacto sustrato-estéril**

Las seudosecciones geoelectricas interpretadas han servido de base para obtener un modelo 3D del contacto entre el sustrato rocoso en ladera y el material procedente del vertido minero a través del empleo del programa informático SURFER 8.0 de GOLDEN SOFTWARE. El modelo 3D obtenido es el que se presenta en la Figura 6.37 que proporciona las profundidades del contacto desde la superficie del terreno. Este modelo emplea la superficie del depósito como nivel cero, lo que se traduce en una topografía del sustrato aparente pero fiel a la realidad.

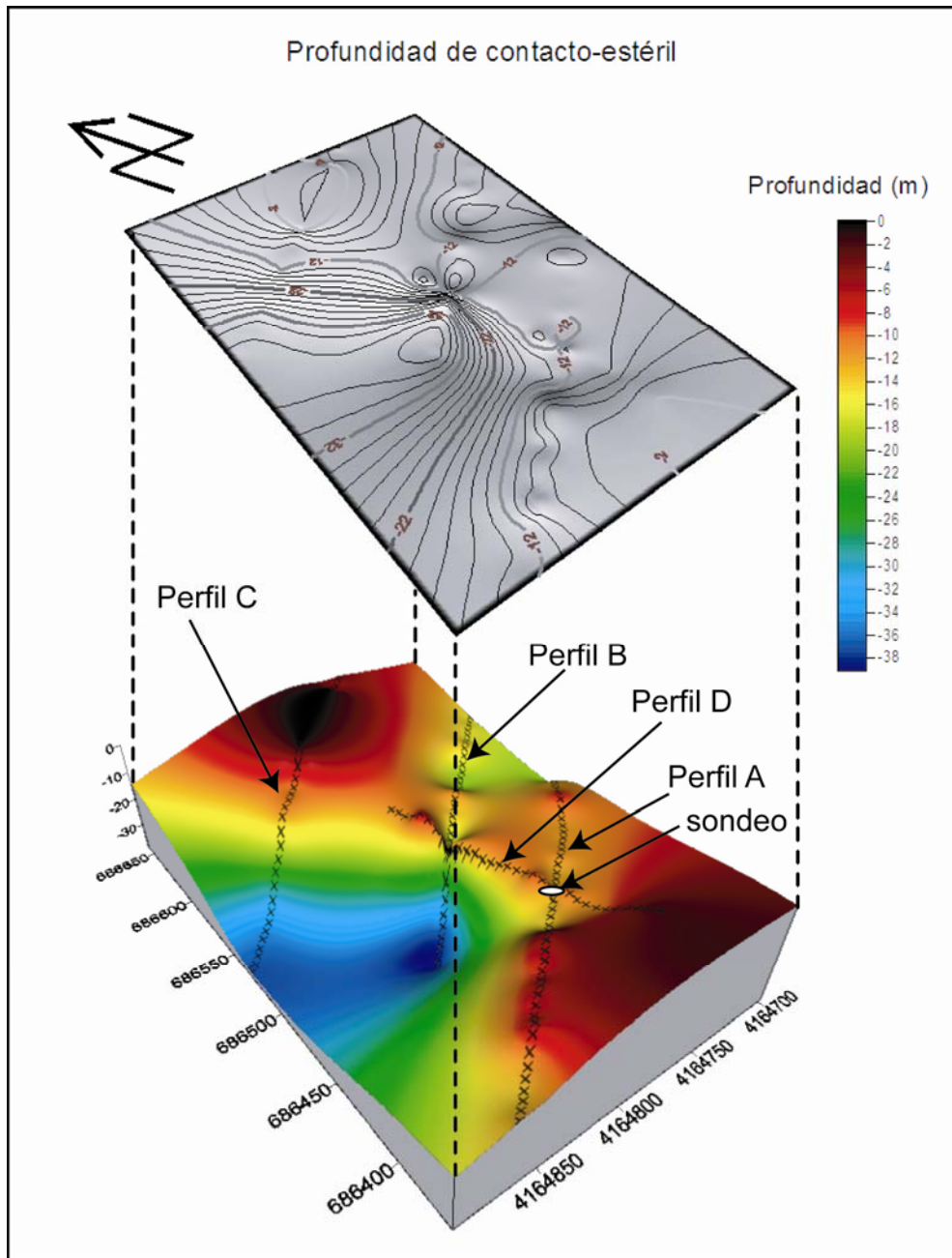


Figura 6. 37. Modelo 3D del zócalo rocoso.

En el modelo 3D (Figura 6.37) se muestra que el mayor volumen de material depositado está localizado bajo el emplazamiento de los perfiles geoelectrónicos B y C concretamente en la parte central de los mismos, coincidiendo con la pendiente original del terreno.

Con información aportada por los perfiles geoelectrónicos se ha cubicado el material existente en este depósito. Para ello se han empleado el método de cubicación trapezoidal, el método de cubicación de Simpson y el método de cubicación 3/8 de

Simpson (Press *et al.*, 1992), a través del programa de informático SURFER de Golden Software, obteniéndose un volumen aproximado de 864 170 m<sup>3</sup>. Se hizo un cálculo del volumen de estériles, empleando un modelo digital del terreno a partir de los vuelos de 1956 y 1964, obteniéndose un volumen de 1 083 158, 568 m<sup>3</sup> (Faz *et al.*, 2003b). Esta diferencia se debe a que los perfiles de tomografía eléctrica presentan zonas oscuras de información en los bordes, por lo que estos espesores de material no ha sido posible incorporarlos al cálculo del volumen total; además, tampoco se ha tenido en cuenta el material de escollera situado frente al depósito que actúa como dique de contención.

### **6.2.2 Tomografía eléctrica 3D**

En el depósito de estériles “Brunita” se ejecutó una malla compuesta por 7 perfiles paralelos de tomografía eléctrica separados 10 metros entre ellos y con una separación de 5 metros entre electrodos (Figura 6.38). Estos perfiles consistieron en 36 electrodos con una longitud de 175 metros. El dispositivo empleado fue el Schlumberger-Wenner que es muy adecuado ante cambios laterales y verticales de resistividad eléctrica (ver Capítulo 4). La campaña de tomografía eléctrica se realizó en el mes de abril de 2005.

La situación de estos perfiles se efectuó atendiendo a los siguientes criterios: que la zona cubriera la posición del sondeo mecánico con el fin de poder comparar con los resultados de los análisis geoquímicos y los perfiles de tomografía eléctrica 2D y que existiera una superficie del depósito amplia donde poder implantar los perfiles paralelos y así poder obtener una adecuada información 3D del contacto sustrato-estéril.

El procesamiento de los valores eléctricos medidos sobre el terreno se realizó con el programa RES3DINV de Geotomo. Posteriormente a la corrección topográfica y al proceso de inversión 3D se generó un bloque 3D de resistividades reales el cual se ha manejado a través del programa SLICER DICER de Pixotec para la obtención de los diferentes volúmenes de material obtenidos en la inversión según su resistividad eléctrica (Figura 6.39).

Desde la Figura 6.39 hasta la Figura 6.45 podemos ver diferentes vistas 3D obtenidas con la tomografía eléctrica 3D, en las que se pone de manifiesto la idoneidad de esta técnica para el estudio volumétrico de los estériles mineros, puesto que caracteriza resistivamente la región investigada y corrobora la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D.

El rango de valores de resistividad eléctrica está representado en forma logarítmica decimal, así según la escala un valor de 0,7 corresponde a 5,01 ohm·m, un valor de 1,2 corresponde a 15,85 ohm·m, y así sucesivamente.

Es interesante observar cómo con la tomografía eléctrica 3D resuelve la investigación sobre el depósito de estériles “Brunita”, pues ha sido capaz de delimitar el contacto sustrato-estéril (Figura 6.40 y Figura 6.41) reflejando la existencia del lentejón resistivo en la región noroeste del depósito, el cual ya fue detectado por los perfiles de tomografía eléctrica 2D y comentado anteriormente (Figura 6.33 y Figura 6.34). En la Figura 6.42 es interesante ver la similitud de la sección 3D obtenida con la seudosección geoelectrica del Perfil D, a pesar de que la orientación de los perfiles de tomografía eléctrica 3D y el Perfil D no son exactamente paralelos (Figura 6.30 y Figura 6.38).

La tomografía eléctrica 3D ha resuelto mejor que la tomografía eléctrica 2D la zonificación resistiva de la superficie donde destaca la presencia de una superficie somera resistiva con valores superiores a 12 ohm·m y que según la inspección realizada sobre el terreno corresponde a material fuertemente cementado y alterado químicamente en relación al resto del depósito, presentándose en forma de lajas metalizadas donde disminuye la conductividad eléctrica en vertical, de ahí ese horizonte resistivo (Figura 39 y Figura 6.44).

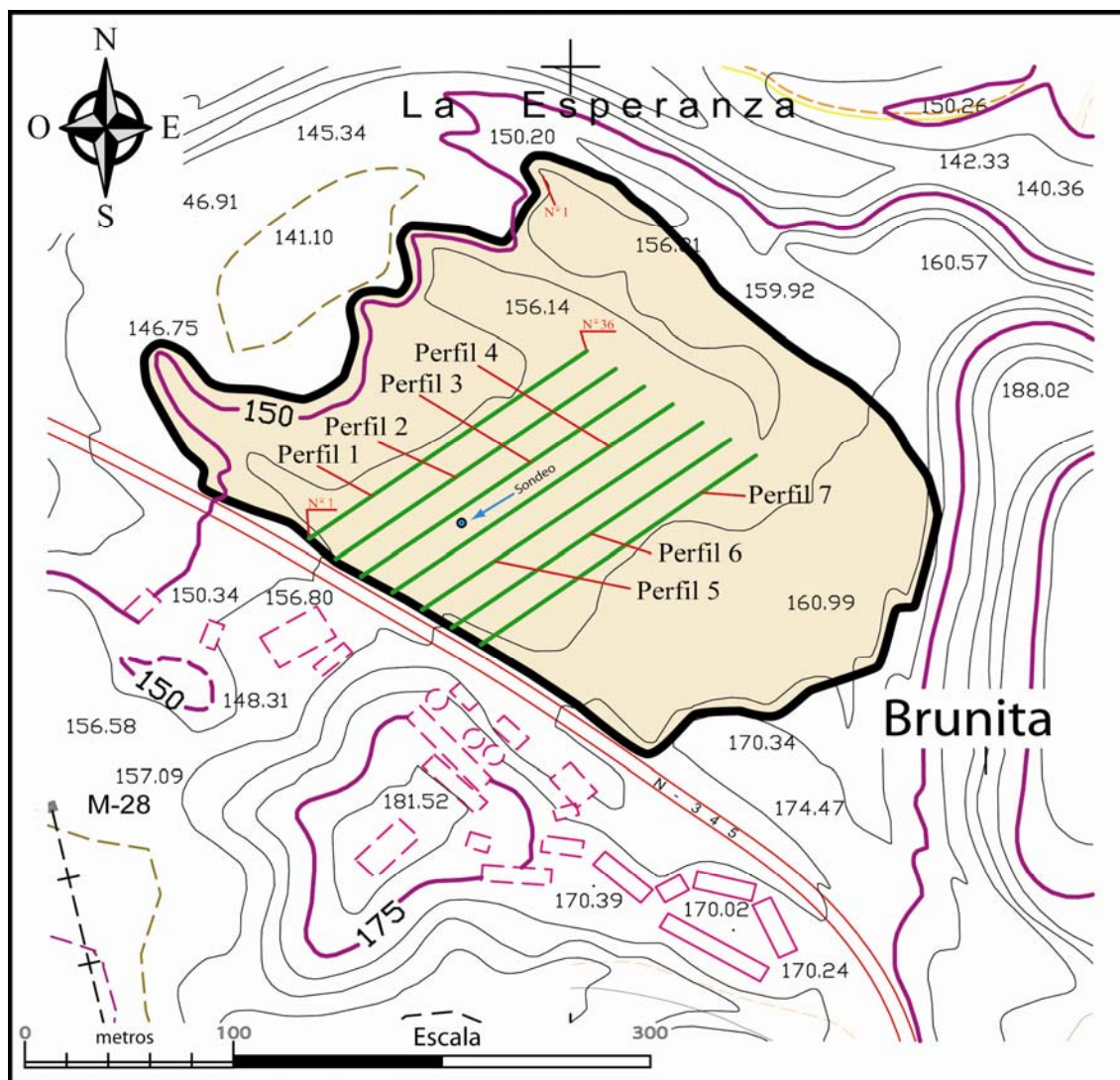


Figura 6. 38. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico sobre el depósito “Brunita”.

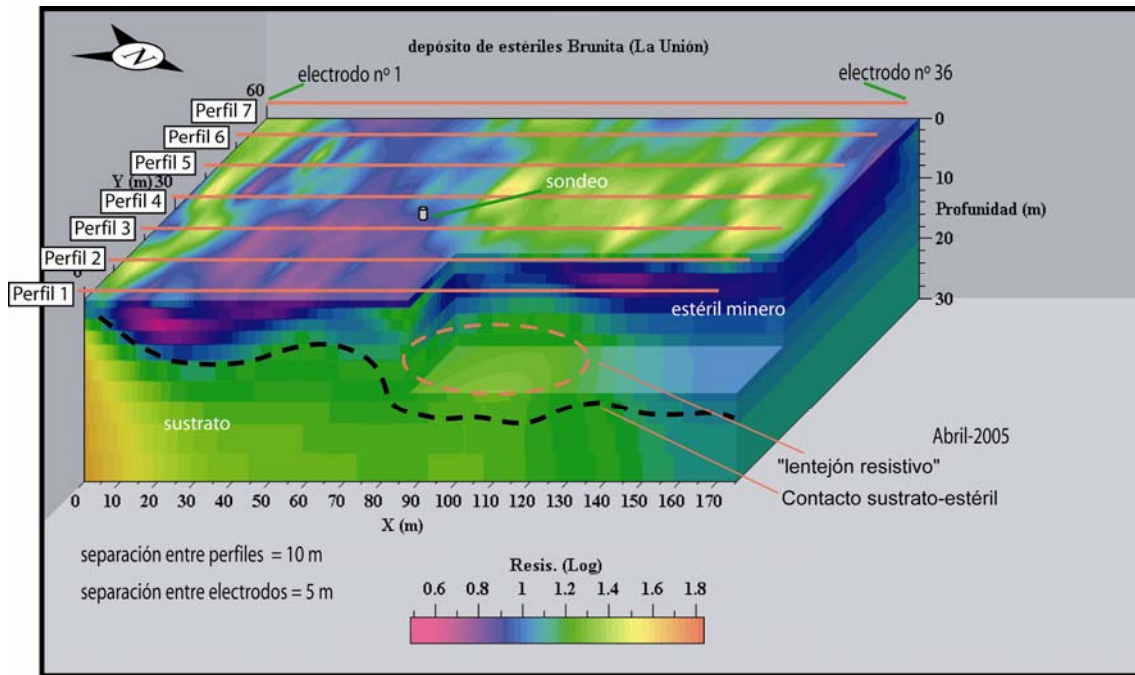


Figura 6. 39. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.

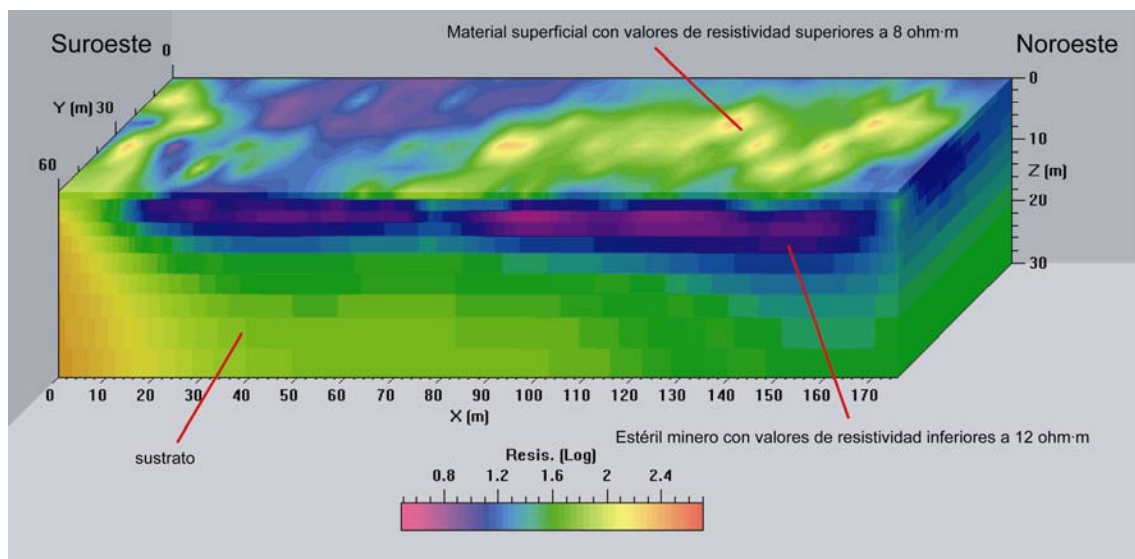


Figura 6. 40. Vista 3D orientada hacia el Oeste de la zonificación del depósito "Brunita" en función de los valores de resistividad eléctrica.

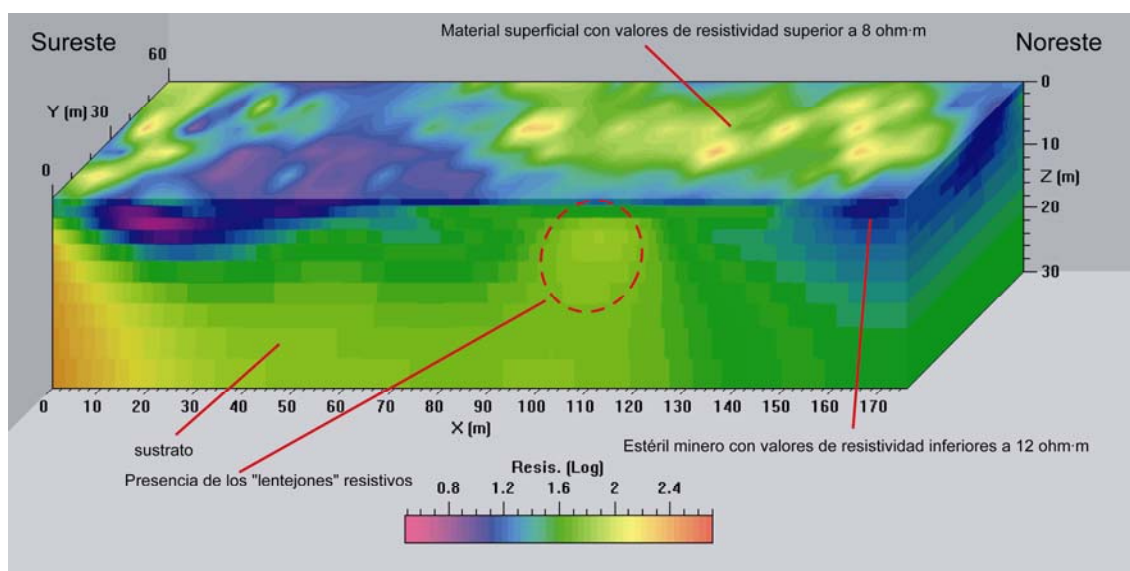


Figura 6. 41. Vista 3D orientada hacia el Este de la zonificación del depósito "Brunita" en función de los valores de resistividad eléctrica.

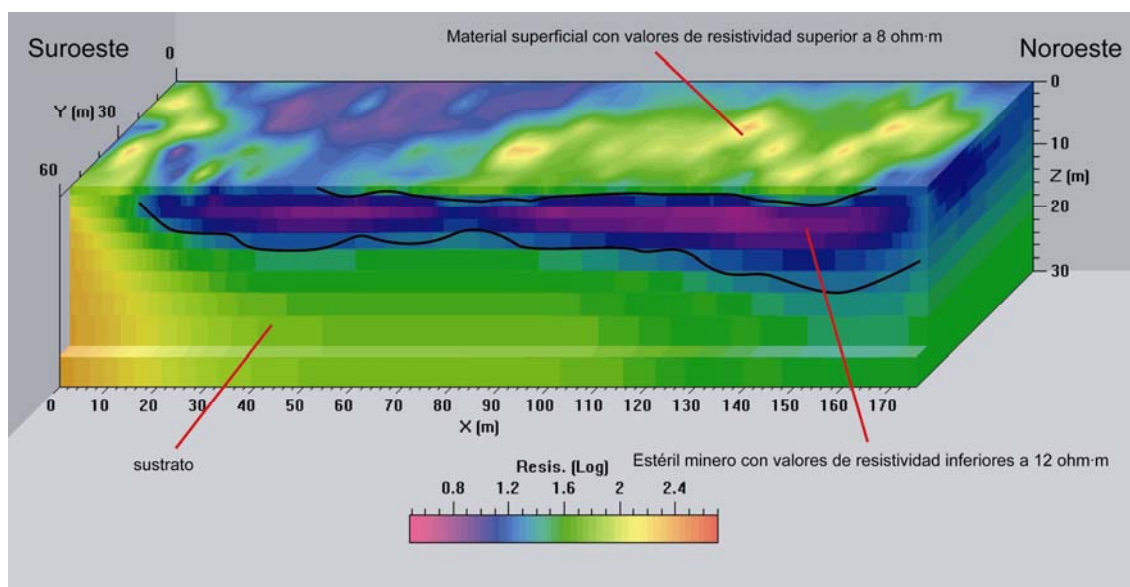


Figura 6. 42. Sección del bloque 3D donde se aprecia el espesor del material depositado.



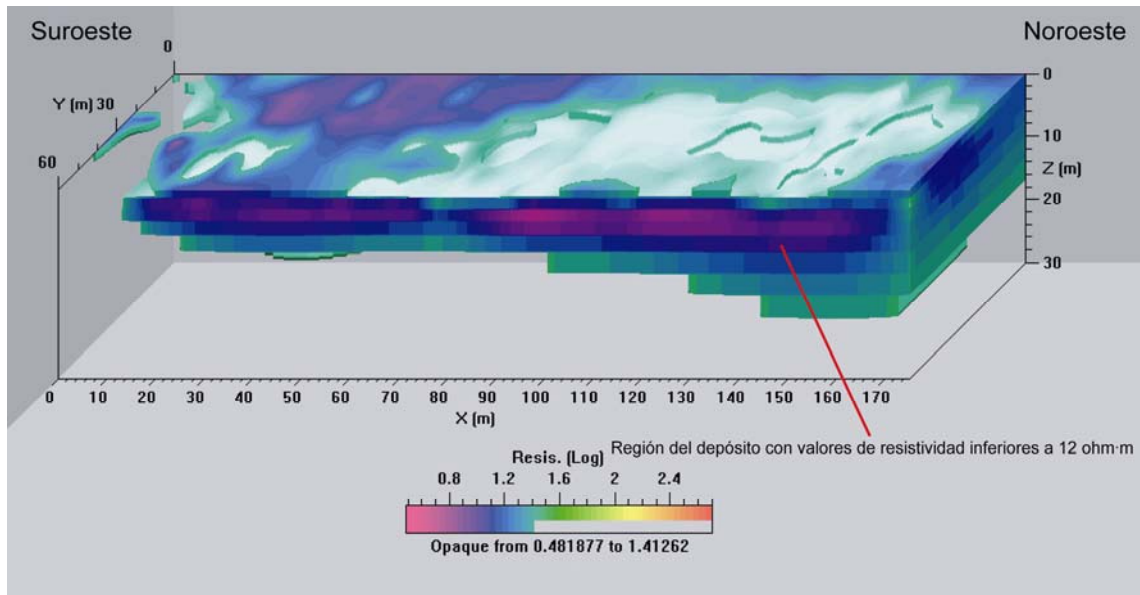


Figura 6. 43. Volumen del depósito correspondiente al estéril con valores de resistividad eléctrica inferiores a 12 ohm·m.

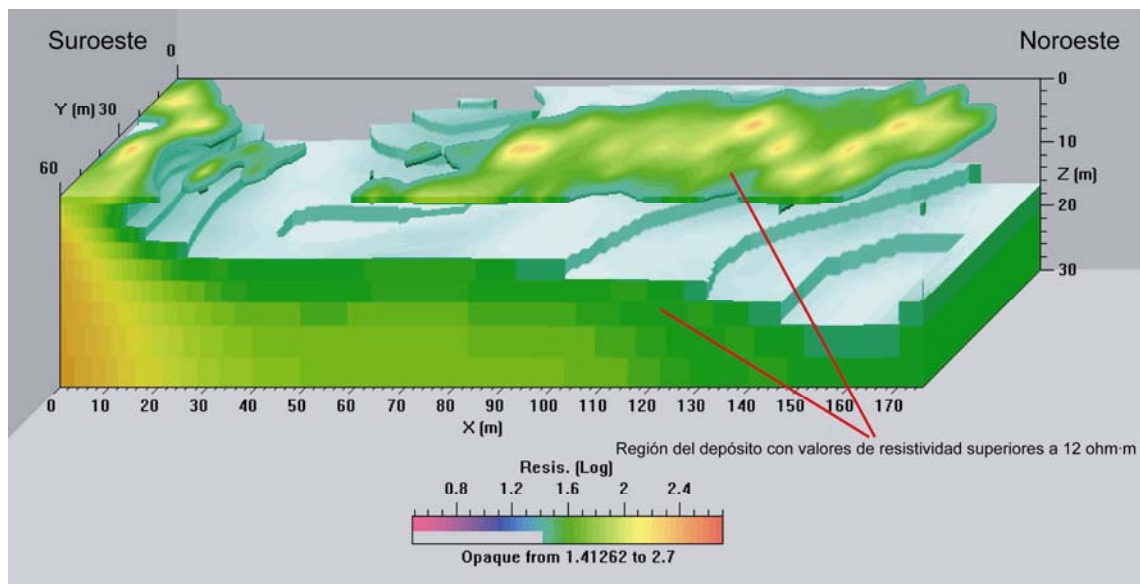


Figura 6. 44. Volumen correspondiente al zócalo y a materiales de estéril con valores de resistividad eléctrica superiores a 12 ohm·m.

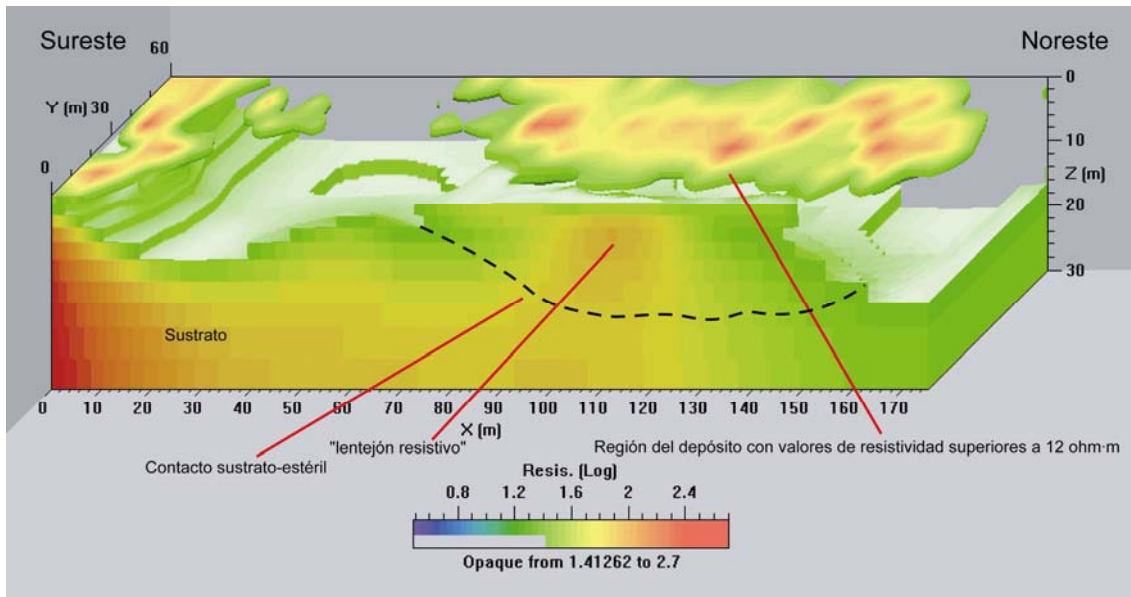


Figura 6. 45. Volumen correspondiente al zócalo orientado hacia el Este para apreciar el "lentejón resistivo" que aparece próximo al Perfil n° 1.

Gracias al fuerte contraste resistivo entre los estériles mineros y el sustrato, los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 3D han sido muy importantes, aportando información sobre la profundidad de los estériles mineros, ayudando a conocer la morfología del contacto sustrato-estéril y delimitar en superficie regiones con diferentes características resistivas correspondientes a materiales con diferentes características físico-químicas.

### **6.2.3 Sondeo mecánico**

Se ejecutó un sondeo mecánico con tubería de 101 mm de diámetro en los primeros 3 metros de profundidad, continuando el resto con tubería de 86 mm de diámetro hasta completar un total de 15 metros. A partir de los 13,70 metros se cortó el sustrato continuando el sondeo hasta alcanzar la profundidad citada de 15 metros (Figura 6.30).



Foto 6. 28. Máquina para sondeos emplazada sobre el depósito “Brunita”.



Foto 6. 29. Testigo continuo obtenido entre los 12 y los 15 metros.

Se recogieron cinco cajas porta-testigos (Foto 6.29) y se realizó un ensayo de penetración estándar (SPT) a la profundidad de 7 y de 12 metros.

Para la obtención de la permeabilidad se realizó un nuevo sondeo, a unos 6 metros de distancia del anterior, el cual se perforó con tubería de 101 mm de diámetro hasta 5 metros de profundidad, considerada adecuada para realizar el ensayo.

A partir de las muestras del sondeo y los valores obtenidos en campo se realizaron ensayos de granulometría, índice de plasticidad, permeabilidad y ensayos de penetración estándar (SPT). Las muestras analizadas se obtuvieron de los tramos 2-2,20 m; 7,60-7,80 m y 11,50-11,70 m.

En la siguiente tabla se muestra el pasante, en tanto por ciento, de las diferentes muestras y los tamices empleados. Según el resultado obtenido, las dos primeras muestras tienen un porcentaje superior al 50 % de material que pasa a través del tamiz 0,08 mm, lo que equivale a un suelo de grano fino, mientras que en la tercera es inferior al 50 %, lo que identifica a los suelos granulares.

Tamiz (mm)	Muestra 1 (2,00-2,20 m)	Muestra 2 (7,60-7,80 m)	Muestra 3 (11,50-11,70 m)
	Pasante (%)		
1,25	100	100	100
0,4	98	100	90
0,16	92	96	50
0,08	76	91	32

Tabla 6. 7. Granulometría de las muestras analizadas.

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de plasticidad, la primera y la última no presentan plasticidad, es decir, los valores muestran una inexistencia de humedad disponiéndose de forma semisólida. La muestra del tramo 7,60-7,80 m presenta un incremento en el límite líquido siendo el valor del índice de plasticidad (IP) bajo lo que equivale a materiales de textura más arenosa con mayor capacidad drenante y filtrante (Faz *et al.*, 2003b).

Muestra	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice de Plasticidad (IP)
2,00-2,20 m	NO PLÁSTICO	-	-
7,60-7,80 m	37	21	16
11,50-11,70 m	NO PLASTICO	-	-

Tabla 6. 8. Plasticidad de las muestras analizadas.

Los resultados del ensayo de permeabilidad realizado “*in situ*” se muestran en la siguiente tabla.

t (min)	Intervalo de tiempo $\Delta t$ (s)	Descenso del nivel de agua $\Delta h$ (m)	Altura media del nivel de agua, $h_m$	Diámetro del sondeo d (mm)	Altura del sondeo H (m)	Permeabilidad k (cm/s)
5	300	0,03	4,97	89	5	$1,17 \cdot 10^{-6}$
10	300	0,02	4,96	89	5	$7,37 \cdot 10^{-7}$
15	300	0,02	4,94	89	5	$8,71 \cdot 10^{-7}$
20	300	0,01	4,93	89	5	$4,36 \cdot 10^{-7}$
25	300	0,02	4,91	89	5	$7,01 \cdot 10^{-7}$
30	300	0,02	4,90	89	5	$6,59 \cdot 10^{-7}$
5	300	0,02	4,98	89	5	$6,9 \cdot 10^{-7}$
10	300	0,01	4,97	89	5	$5,62 \cdot 10^{-7}$
15	300	0,01	4,96	89	5	$6,07 \cdot 10^{-7}$
20	300	0,02	4,94	89	5	$6,96 \cdot 10^{-7}$
5	300	0,01	4,99	89	5	$6,47 \cdot 10^{-7}$
10	300	0,01	4,97	89	5	$4,75 \cdot 10^{-7}$

Tabla 6. 9. Permeabilidad de las muestras analizadas.

Los valores de permeabilidad obtenidos están dentro del rango de valores considerados característicos para depósitos de lodos con un cierto grado de consolidación, que están en torno a  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  cm/s, correspondiendo a la categoría de lamas de baja plasticidad (Vick, 1990).

Se efectuaron dos ensayos de penetración estándar (SPT); en el tramo comprendido entre los 7 y 7,60 metros y en el tramo comprendido entre los 12 y 12,60 metros, obteniéndose parámetros  $N_{SPT}$  de 1 y 14 respectivamente. Según Hunt (1984), equivale a un material de consistencia media (firme), con unos valores de peso específico saturado de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  y de resistencia a la compresión simple de  $0,9 \text{ kg/cm}^2$ .

Las tres muestras analizadas se han clasificado según el sistema A.A.S.H.T.O. (del inglés, “*American Association of State Highway and transportation Officials*”) (Faz *et al.*, 2003a). La clasificación obtenida es la que se presenta en la siguiente tabla.

Muestra	A.A.S.H.T.O.
2,00-2,20 m	Suelo Limoso (A-4)
7,60-7,80 m	Suelo Arcilloso (A-6)
11,50-11,70 m	Arena Limosa (A-2-4)

Tabla 6. 10. Clasificación de los materiales según A.A.S.H.T.O. (Faz *et al.*, 2003b).

Durante la ejecución del sondeo mecánico no se cortó el nivel freático. Al culminar el sondeo este fue entubado con PVC con el objetivo de realizar un seguimiento del mismo. Transcurrido el plazo de un mes, se volvieron a realizar medidas piezométricas sin conseguir tocar el nivel freático. Por esa razón, no se ha podido verificar la posible existencia de agua en la base del depósito de lodos.

Se puede concluir, según los resultados obtenidos de las muestras del sondeo, que los materiales que forman el depósito poseen una baja permeabilidad hidráulica, no hay presencia de agua en el interior del depósito que sea detectable a través de mediciones con piezómetro y que se puede diagnosticar la existencia de dos capas, una entre los 0 y los 9 metros de granulometría limo-arcillosa, y otro a partir de los 9 metros de granulometría arenosa. Esto último también ha sido detectado con las seudosecciones geoelectricas por incrementos de resistividad eléctrica (entre 8 ohm·m y 13 ohm·m) en la región próxima al contacto sustrato-estéril.

#### **6.2.4 Análisis geoquímico**

#### **Propiedades físico-químicas de las muestras superficiales y sondeo**

Se realizaron análisis de pH, conductividad eléctrica y textura de suelo sobre muestras recogidas de 0 a 15 cm en tres zonas de muestreo denominadas D1, D2 y D3 (Figura 6.46); D1 es un punto de muestreo superficial que se encuentra situado cerca del borde de las cárcavas, D2 es un punto de muestreo superficial situado en el centro del depósito y D3 se encuentra situado a la derecha del depósito. Según las Figuras 6.47 y

6.48, el pH medido en agua es ligeramente superior que el medido en KCl en todos los puntos de muestreo. Entre las tres zonas se presenta cierta homogeneidad, tanto en pH en agua como KCl 1M. Los suelos, según la clasificación propuesta por Porta *et al.* (1999), serían extremadamente ácidos en los primeros 15 cm, puesto que los valores de pH de todas las muestras fueron inferiores a 4,5.

En la zona D3 (Figura 6.47 y Figura 6.48) es donde se obtuvieron los valores más elevados de pH; no obstante aún siguen catalogados como suelos extremadamente ácidos.

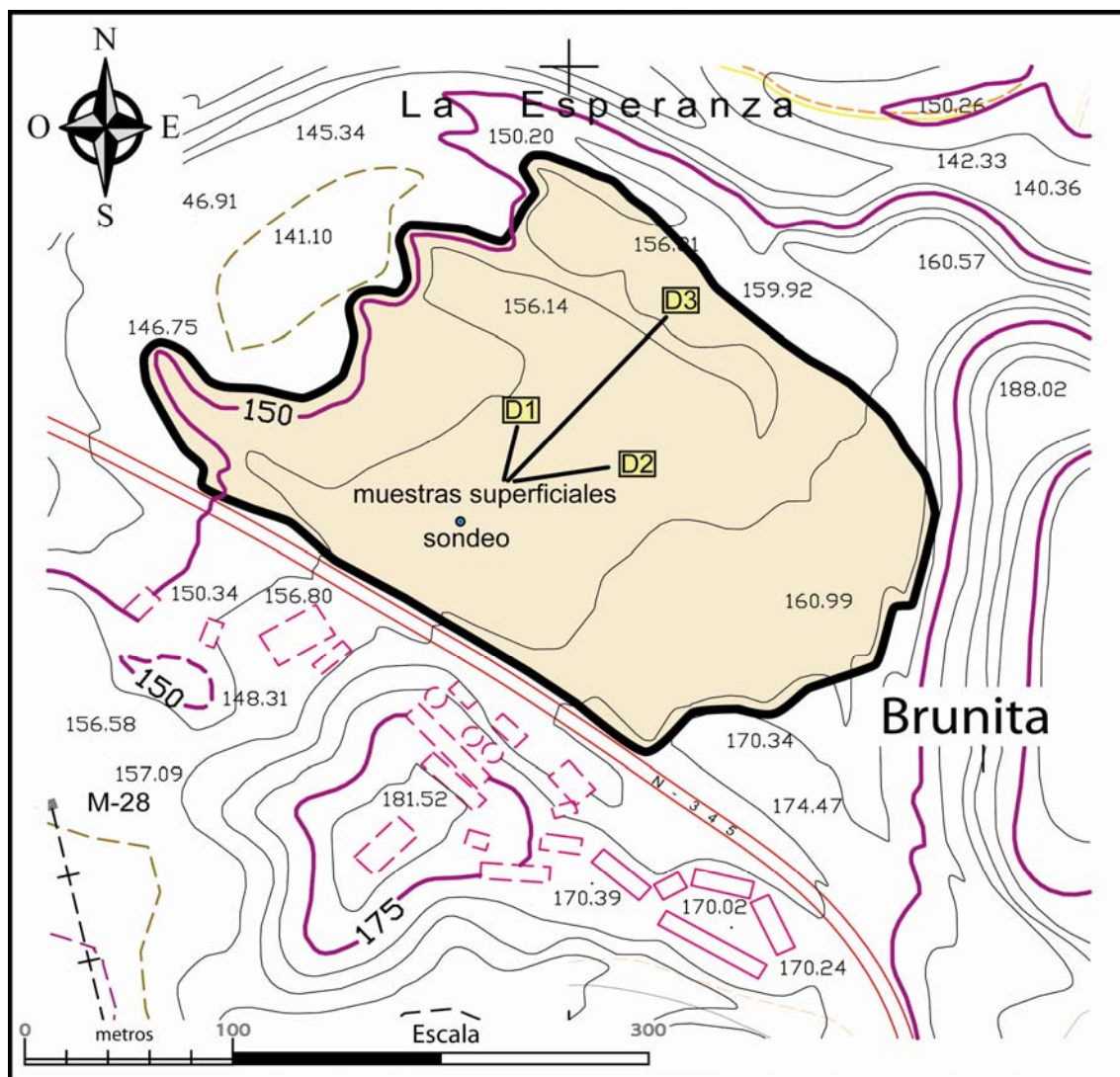


Figura 6. 46. Situación de las zonas de muestreo superficial D1, D2 y D3 en “Brunita”.

En esta situación de suelos extremadamente ácidos, la movilidad de los metales se verá favorecida, por lo que el riesgo de migración de metales es mayor que en condiciones de suelo alcalino.

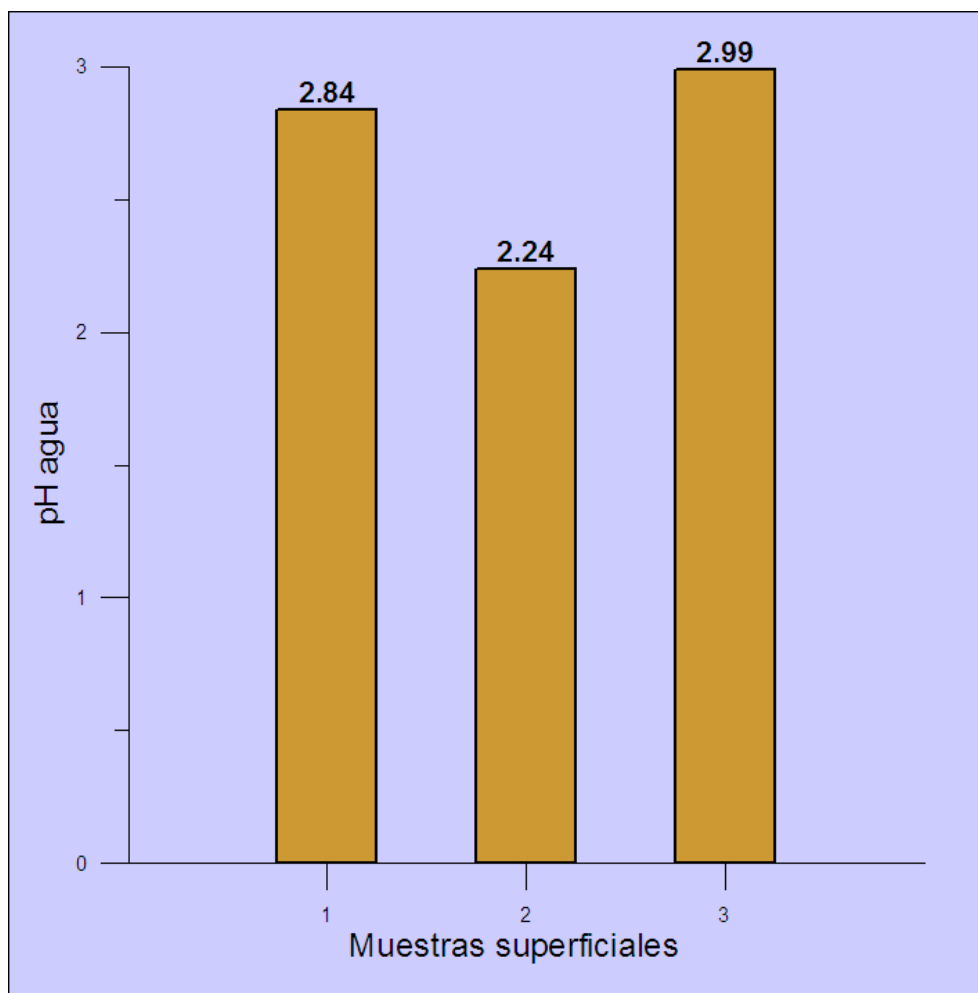


Figura 6. 47. Valores medios de pH medido en agua de las muestras superficiales D1, D2 y D3.



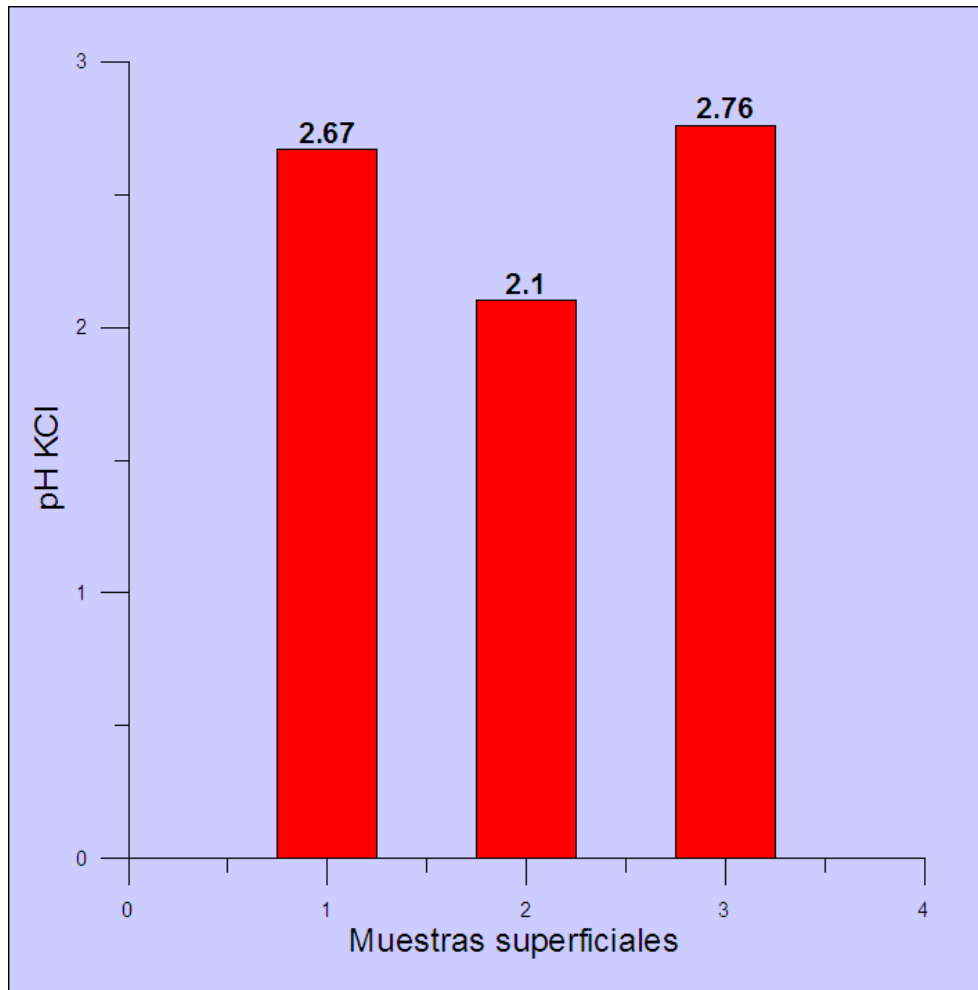


Figura 6. 48. Valores medios de pH medido en KCl de las muestras superficiales D1, D2 y D3.

Con respecto a los datos de conductividad eléctrica, los valores medios de la zona D1 y la zona D2, en los 15 cm superficiales, superan el valor de 16,1 dS/m, con lo que de acuerdo a la clasificación establecida por U.S.D.A. (1996) los suelos de estas zonas se caracterizan como muy salinos. Por otra parte, la zona D3 tiene un valor medio de conductividad eléctrica menor al resto de los casos (14,89 dS/m).

La clase textural predominante de las zonas D2 y D3 es la franco arenosa mientras que en la zona D1 es la franco limosa. Esto es lógico si se tiene en cuenta que el vertido de los lodos se aplicaba desde la parte sureste del depósito, con lo cual las zonas D2 y D3 tendrían una clasificación granulométrica más gruesa que la zona D1 (Figura 6.46).

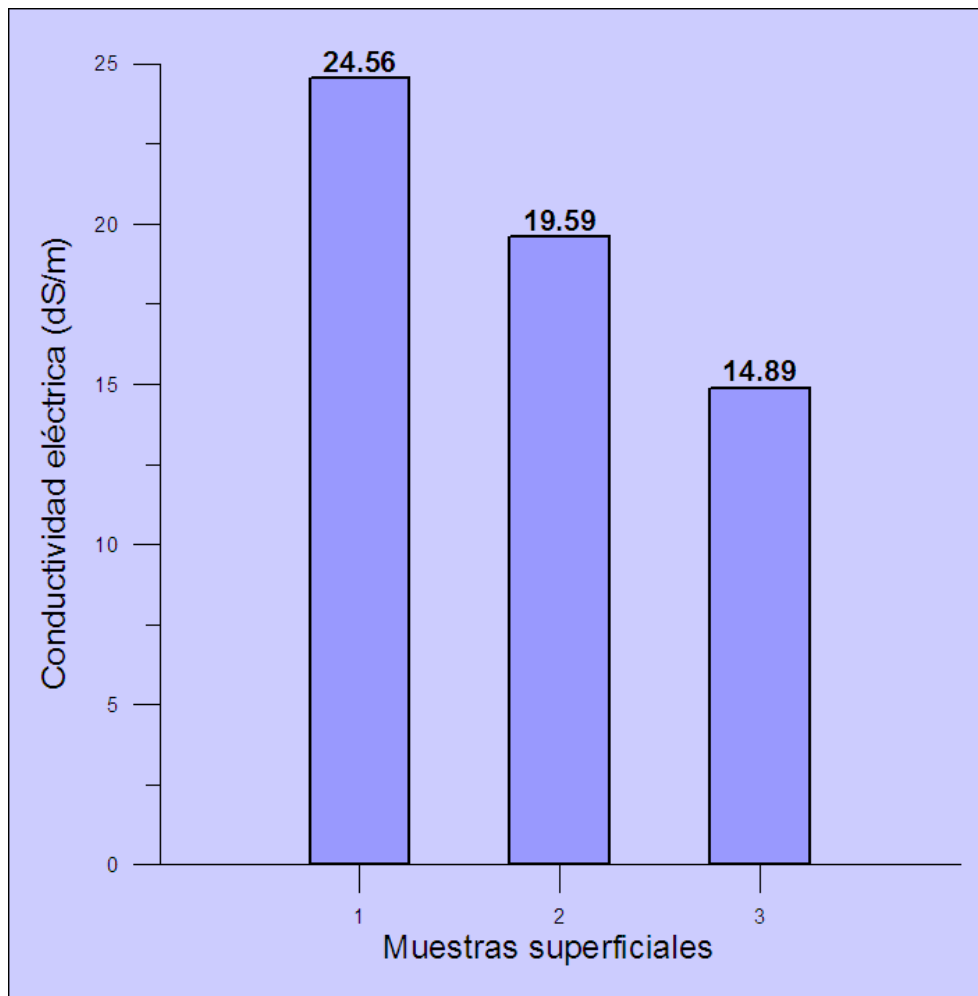


Figura 6. 49. Valores medios de conductividad eléctrica de las muestras superficiales D1, D2 y D3.

Como ya se ha comentado anteriormente, se realizó un sondeo mecánico que permitió la toma de muestras cada metro de profundidad sobre las que se determinaron las características del pH, de conductividad eléctrica y contenidos totales de metales pesados. A continuación se describen los resultados obtenidos en las mismas.

En la Figura 6.50 se aprecia como los valores de pH en agua y en la solución iónica KCl 1M siguen una tendencia equivalente, siendo los valores de pH en KCl ligeramente inferiores, como ya ocurría también con los valores de las muestras superficiales. A continuación analizamos las Figuras 6.50 y 6.51, esta última representando la conductividad eléctrica de las muestras del sondeo, puesto que los parámetros de ambas figuras están relacionados; a medida que disminuye el pH, la muestra se caracteriza por ser más salina y esto favorece un incremento de la conductividad eléctrica. El pH del primer metro es de 4,89, resultando ser fuertemente

ácido y esto hace que la conductividad alcance los mayores valores de las muestras del sondeo, hasta los 11,83 dS/m. Entre los 2 metros y los 7 metros de profundidad, las muestras han dado valores ligeramente ácidos, próximos al pH neutro, lo que ha condicionado que el valor de la conductividad eléctrica disminuya hasta valores en torno a 2,76 dS/m; esta región se indica en la Figura 6.50 como región A y en la Figura 6.51 como región C. A continuación de la región A, aparece otra región denominada región B (Figura 6.50) donde el pH vuelve a disminuir para convertirse en fuertemente ácido entre los 9 y los 13 metros, teniendo su correspondencia en la Figura 6.51 con la región D con incrementos ligeros de la conductividad eléctrica. A partir de aquí comienza la influencia del sustrato motivando incrementos del pH hasta alcanzar valores alcalinos, y en este mismo sentido, disminuciones de la conductividad eléctrica hasta valores en torno a 1,83 dS/m.

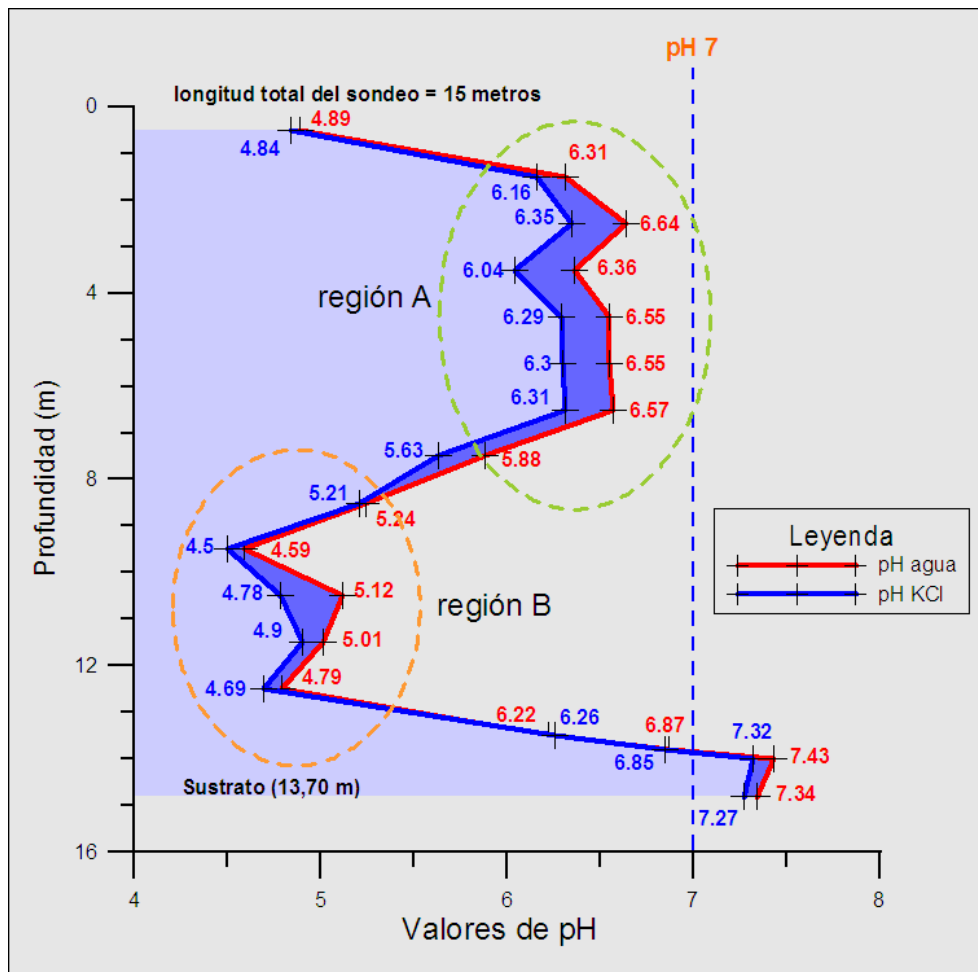


Figura 6. 50. Valores de pH de las muestras del sondeo.

Lo anteriormente expuesto ha tenido su reflejo en los resultados obtenidos a través de la tomografía eléctrica 2D/3D puesto que el perfil A, que pasa por el emplazamiento del sondeo mecánico, ha proporcionado la pseudosección geoelectrica de la Figura 6.31 donde se pueden apreciar, a lo largo de la posición del sondeo, varias regiones resistivas. Una región superficial conductora de valores inferiores a 8 ohm-m que se corresponde con un material salino fuertemente ácido; a continuación vendría una región resistiva (entre 8-20 ohm-m), comprendida aproximadamente entre los 3 y los 9 metros, que coincide con la región C de la Figura 6.51; después seguiría de nuevo una región conductora (< 8 ohm-m) coincidente con la región D y por último se presenta de forma inequívoca el sustrato con valores dada vez mayores de resistividad eléctrica (> 20 ohm-m). El bloque 3D geoelectrico, obtenido con la tomografía eléctrica 3D, ha señalado la región conductora en superficie y la situación de sustrato rocoso (Figura 6.39 y Figura 6.42).

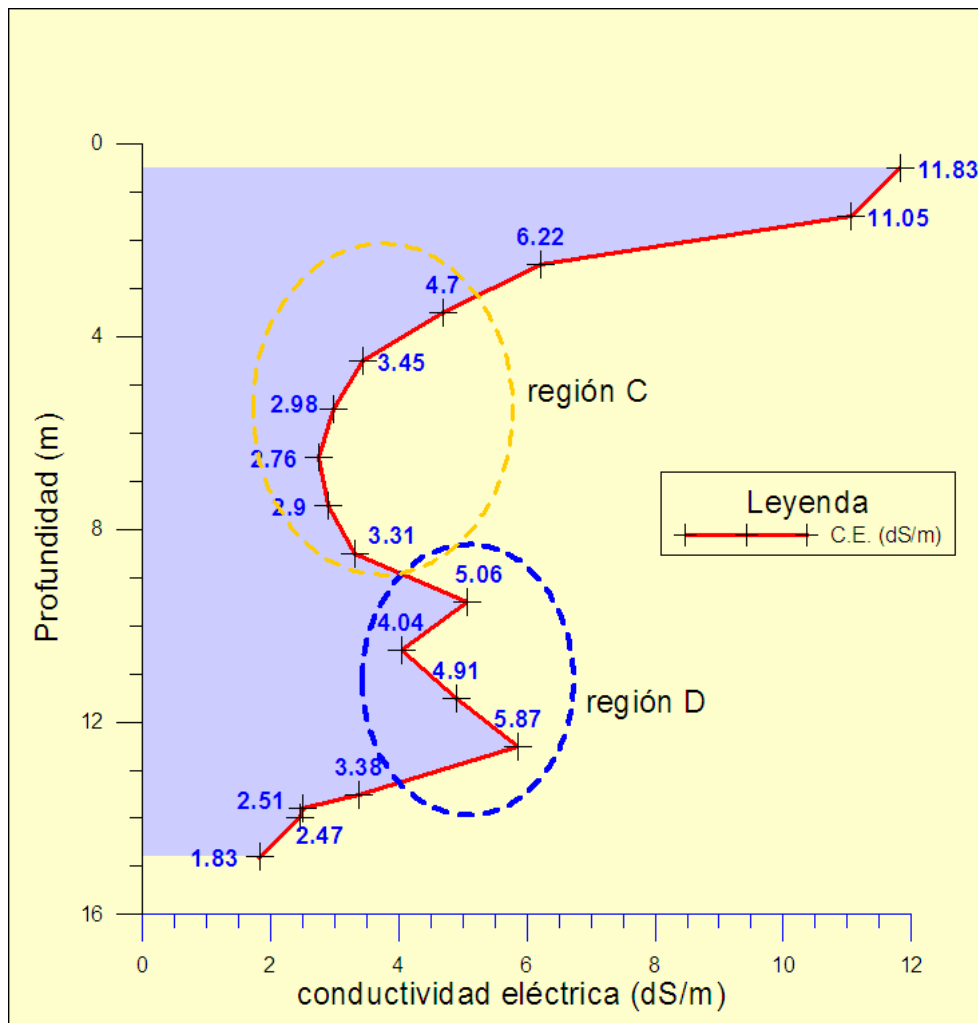


Figura 6. 51. Valores de conductividad eléctrica de las muestras del sondeo.

En cuanto a la textura, en los dos primeros metros predomina la clase textural franco limosa; de los 2 a los 3 metros se aprecia un aumento importante de la fracción arenosa; en el intervalo comprendido entre los 3 y los 7 metros el porcentaje de limo es considerablemente mayor a las otras dos fracciones siendo por tanto la textura limosa predominante; entre los 7 y los 9 metros predomina la textura franco limosa; a continuación, cambia de nuevo la clase textural, siendo arenoso franca hasta los 13 m de profundidad; finalmente, el intervalo de suelo desde los 13 m hasta los 14 se caracteriza por ser franco arenoso, siendo la muestra de sustrato tomada a los 14,8 m, franca.

### Metales totales en muestras superficiales y sondeo

Los metales analizados en las muestras superficiales D1, D2 y D3 fueron zinc, plomo, cobre y cadmio, por ser estos los metales pesados principales de la zona minera de estudio.

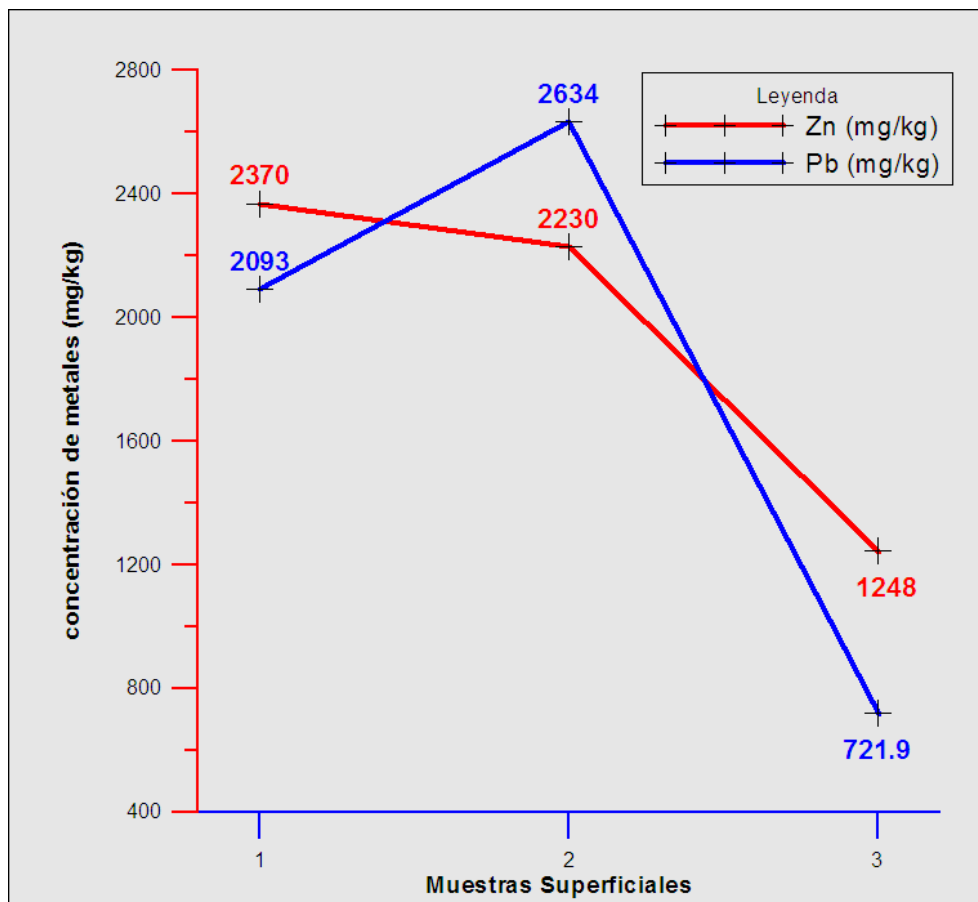


Figura 6. 52. Concentración media de Zn total y Pb total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito "Brunita".

De acuerdo a la Figura 6.52, son de destacar los altos contenidos de zinc en las muestras superficiales de las zonas D1 y D2, que superan los máximos permitidos por las legislaciones de diversos países (Faz *et al.*, 2003b); particularmente la legislación española establece un máximo de zinc para suelos agrícolas de 150 mg/kg para un suelo de  $\text{pH}<7$  y de 450 mg/kg para uno de  $\text{pH}>7$  (R.D. 1310/1.990). Por otro lado, el límite máximo de este metal en lodos de depuradora para uso agrícola es de 2 500 mg/kg para un  $\text{pH}<7$  y de 4 000 mg/kg para uno de  $\text{pH}>7$  (R.D. 1310/1.990). La muestras superficiales del punto de muestreo D3 son inferiores a 1 500 mg/kg.

La concentración de zinc se puede establecer que homogénea a lo largo de la superficie del depósito, a diferencia de lo comentado para el depósito de estériles “El Lirio”, y con unos niveles de zinc no tan altos como en este último caso pero aún por encima de los límites establecidos por la normativa española vigente. Sin embargo, hay que indicar que la zona D3 es la que menor concentración de zinc total presenta en superficie de todas muestras superficiales analizadas.

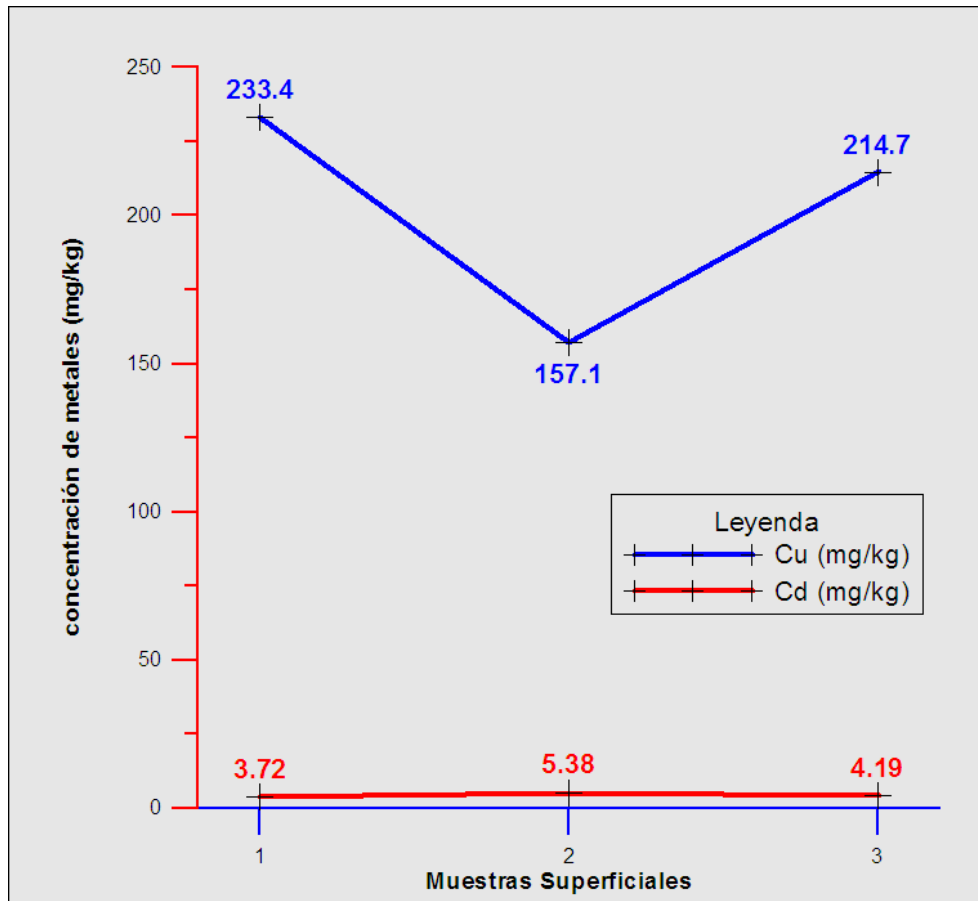


Figura 6. 53. Concentración media de Cu total y Cd total en cada una de las zonas de muestreo superficial del depósito “Brunita”.

En cuanto al plomo, la legislación española establece para suelos agrícolas niveles máximos de plomo de 50 mg/kg para un suelo de  $\text{pH} < 7$  y de 300 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$ ; por otra parte, los límites máximos de plomo en lodos de depuradora para uso agrícola son 750 mg/kg para un  $\text{pH} < 7$  y de 1 200 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990). Según la Figura 6.52 los contenidos de plomo de la zonas D1 y D2 superan ampliamente estos límites máximos establecidos por la legislación, esto es de esperar pues se tratan de residuos procedentes del procesamiento de sulfuros metálicos.

Como en el caso del zinc, la zona D3 es la que presenta la menor concentración de plomo.

Para el cobre, la legislación española establece un nivel máximo de 50 mg/kg para un suelo agrícola de  $\text{pH} < 7$  y de 210 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$ ; por otra parte, el límite máximo de cobre en lodos de depuradora para uso agrícola es de 1 000 mg/kg para un  $\text{pH} < 7$  y de 1 750 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990). Según la Figura

6.53 los niveles medios de cobre de las diferentes muestras superficiales se encuentran por encima de los niveles establecidos para suelos agrícolas por la normativa española vigente, sin embargo en base a otras normativas como la canadiense o la italiana, estos niveles se encontrarían por debajo (Faz *et al.*, 2003b).

Las zonas D1, D2 y D3 (Figura 6.53) presentan una concentración media de 233,4, 157,1 y 214,7 mg/kg respectivamente, lo que refleja una homogeneidad en la concentración de cobre a lo largo del depósito, pudiendo establecerse como que los mecanismos que pueden variar los niveles de cobre suceden de forma semejante en las diversas zonas del depósito.

Para el último elemento analizado en las muestras superficiales, el cadmio, la legislación española fija un nivel máximo en suelos agrícolas de 1 mg/kg para un suelo de  $\text{pH} < 7$  y de 3 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$ ; para el caso de lodos de depuradora para uso agrícola estos niveles máximos se fijan a 20 mg/kg para un  $\text{pH} < 7$  y de 40 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990).

Observando la Figura 6.53 se ve que los valores medios de cadmio total de las muestras superficiales presentan niveles superiores a los establecidos por la normativa española para suelo agrícola, sin embargo estarían por debajo de los límites establecidos para los lodos de depuradora con fines agrícolas, puesto que en ningún caso se superan los 20 mg/kg para suelos de  $\text{pH}$  ácido.



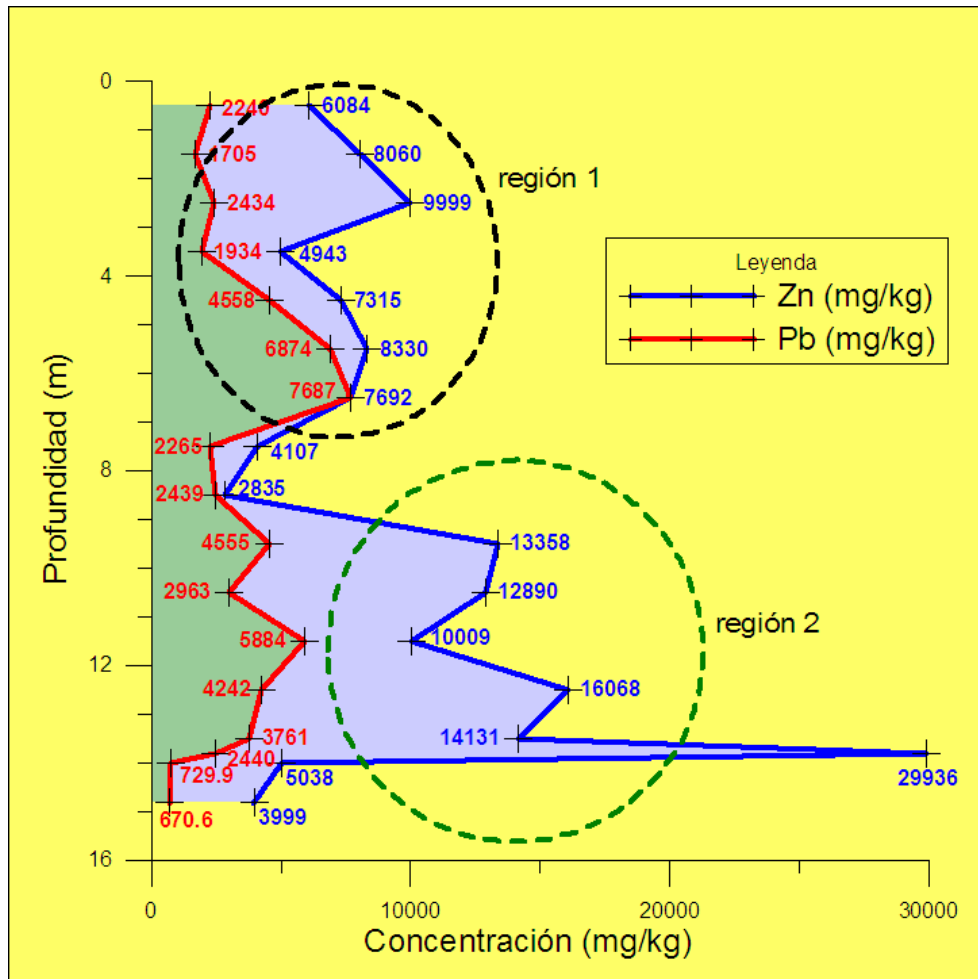


Figura 6. 54. Concentración de Pb total y Zn total en los puntos de muestreo del sondeo.

A través del sondeo mecánico realizado en el depósito “Brunita” se han podido analizar contenidos de metales en cada metro (zinc, plomo, cobre y cadmio). Comenzando por el zinc, todos los puntos muestreados del sondeo sobrepasan los límites máximos establecidos por la legislación española, hasta el punto de que algunas de las muestras del depósito tomadas en el sondeo presentan contenidos de zinc superiores a los 10 000 mg/kg, lo que muestra la elevada contaminación de estas capas de residuos. Es apreciable como el nivel de zinc cae bruscamente en los análisis de las muestras del sustrato, por lo que se desprende que aunque los residuos mineros se apoyen sobre calizas del Complejo Alpujárride y esquistos grafitosos y cuarcitas grises paleozoicas del Complejo Nevado-Filábride, los niveles de contaminantes en los materiales no son elevados, lo que supone una baja lixiviación del metal. En la Figura 6.54 se destacan dos regiones denominadas región 1 y región 2 debido a la diferencia existente entre sus concentraciones de zinc total; destaca la región 2 donde se presentan los valores más altos. Con la tomografía eléctrica también esta región ha sido la que ha

producido los valores de resistividad eléctrica más bajos ( $< 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) lo que viene determinado por la conductividad metálica de este metal y por la textura predominante de estos niveles que sería de tipo limoso.

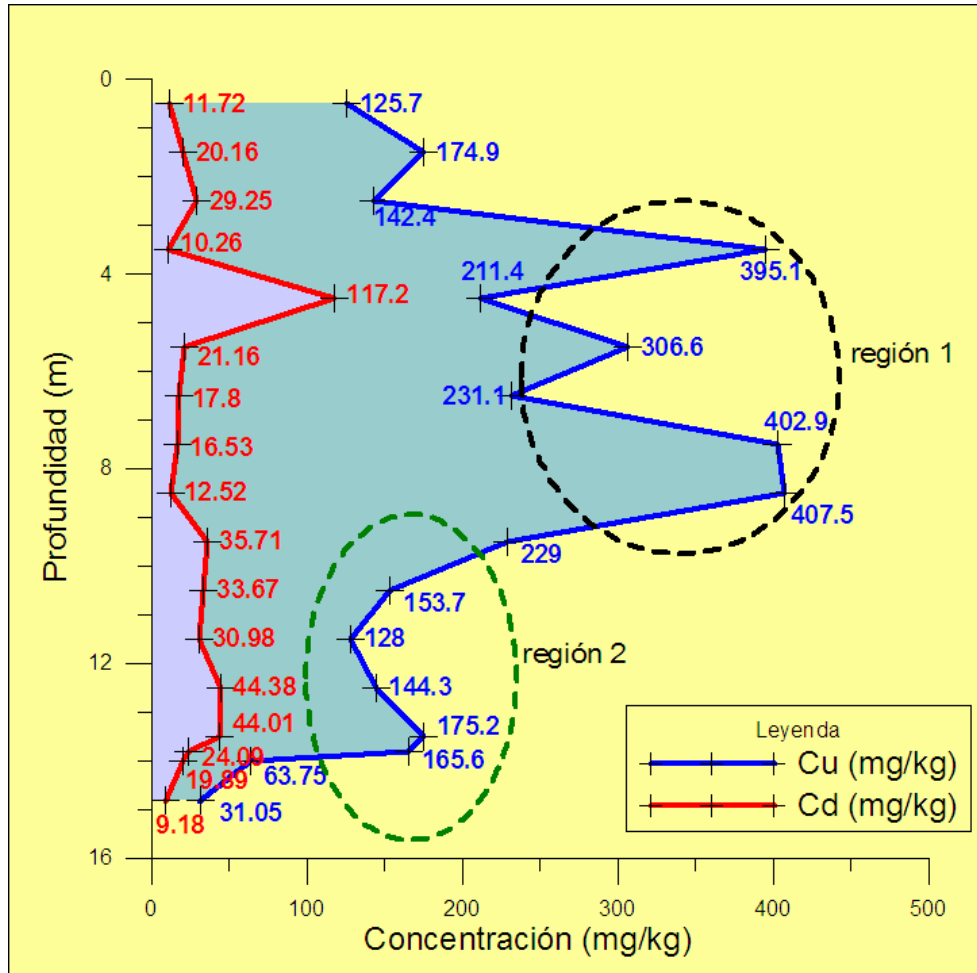


Figura 6. 55. Concentración de Cu total y Cd total en los puntos de muestreo del sondeo.

Observando otra vez la Figura 6.54, para el caso del plomo, también aparecen concentraciones considerables en estas capas del depósito por encima de la legislación española vigente, por otro lado se vuelve a reproducir una disminución del contenido del plomo para las muestras pertenecientes al sustrato.

En la Figura 6.55, se aprecia como los valores obtenidos para el cobre total se encuentran por encima del máximo establecidos por la legislación española para uso agrícola, que lo establece en 50 mg/kg; sin embargo se encuentran por debajo de los límites establecidos para lodos de depuradora para uso agrícola puesto que no superan los 1 000 mg/kg (Faz *et al.*, 2002b). En la Figura 6.55 se puede apreciar como los

residuos mineros contienen cantidades de cobre superiores a las registradas en el sustrato donde su contenido desciende significativamente; curiosamente, sus máximas concentraciones se encuentran en el intervalo comprendido entre los 3 y los 9 metros del sondeo mecánico, señalado en la Figura 6.55 como región 1.

Respecto al contenido de cadmio en las muestras del sondeo, los contenidos a las distintas profundidades son elevados ( $> 5$  mg/kg) a excepción de las muestras tomadas en el sustrato, donde las concentraciones del metal descienden considerablemente tal y como sucedía en todos los metales anteriores. A pesar de que las concentraciones de cadmio a lo largo del sondeo siguen una tendencia más o menos uniforme, a excepción del sustrato donde estas concentraciones sufren una disminución significativa, se puede apreciar que es también en el intervalo entre 4 y 5 metros donde se obtienen concentraciones ligeramente superiores al resto (Figura 6.55).

### **6.2.5 Discusión de los resultados del depósito “Brunita”**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D han permitido identificar diferentes zonas dentro del depósito de estériles mineros, en base a sus características resistivas, que a continuación sintetizamos.

- Las seudosecciones eléctricas obtenidas han permitido determinar la profundidad de los estériles mineros a lo largo de los perfiles geoelectricos. Esto ha sido corroborado por el sondeo mecánico, el cual alcanzó el zócalo mioceno a partir de los 13,70 metros. Esta información geoelectrica ha servido para obtener el volumen de material almacenado en el depósito con bastante precisión, extremo éste que ha sido comparado con la información obtenida a través de la cubicación realizada a partir de las fotografías aéreas realizadas en 1956 cuando el depósito se encontraba en sus primeras fases de recrecimiento (Faz *et al.*, 2003b). Por ello, se puede concluir que la tomografía eléctrica se ha revelado muy eficaz para obtener la morfología del sustrato o para cubicar el material depositado (Martínez-Pagán *et al.*, 2005a).

- Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D han identificado una superficie muy conductora en el depósito, con valores inferiores a 8 ohm·m, donde se ha situado el sondeo mecánico y el cual ha confirmado valores de pH muy bajos en superficie que han llegado hasta los 4,89 y valores de conductividad eléctrica de 11,83 dS/m, esto es debido a que los distintos compuestos del suelo se encuentra oxidados formando sulfatos, carbonatos, fosfatos, etc., y en profundidad se encuentran en forma de sulfuros, puesto que el ambiente es más reductor (Aracil *et al.*, 2005b). Por otra parte también se ha identificado otra superficie en el depósito más resistiva con valores superiores a 12 ohm·m y que según la inspección realizada sobre el depósito coincide con la presencia de suelo fuertemente compactado o endurecido con un alto grado de lajidad lo que disminuye la conductividad eléctrica vertical.
- Los análisis geoquímicos han puesto de relieve la existencia de condiciones extremadamente ácidas entre los 9 y los 13 metros de profundidad con valores de pH en torno a 4,5. Esto también ha sido reflejado a través de los análisis de conductividad eléctrica con subidas del valor de este parámetro, hecho que también se refleja en los perfiles de tomografía eléctrica a través de las seudosecciones geoeléctrica 2D y del bloque 3D con valores inferiores a 8 ohm·m; poniendo de manifiesto la idoneidad de la técnica de tomografía eléctrica para localizar y delimitar regiones ácidas puesto que, por lo general, se tratan de regiones salinas lo que facilita el contraste de resistividad eléctrica entre el material y su entorno (Aracil *et al.*, 2004b).
- Los análisis geoquímicos de metales pesados han demostrado mayores contenidos de cobre, zinc, plomo y cadmio en las capas profundas del depósito lo cual favorece que las resistividades eléctricas obtenidas con tomografía eléctrica disminuyan también. Hay que tener en cuenta que la resistividad eléctrica del zinc en estado puro a 25° C es de  $6,01 \cdot 10^{-8}$  ohm·m, lo que le da características conductoras, sólo es superado en conductividad eléctrica por el cobre, el cual tiene una resistividad eléctrica a 25° C de  $1,71 \cdot 10^{-8}$  ohm·m; el resto de metales pesados, el cadmio y el plomo, tienen resistividades eléctricas algo superiores, sobre todo el plomo con una resistividad eléctrica a 25° C de  $21,1 \cdot 10^{-8}$  ohm·m; pero en definitiva no dejan de ser buenos conductores eléctricos (Lide, 2000).

- Los análisis geoquímicos de metales pesados sobre las muestras del sustrato han aportado valores de éstos que indican que no se ha producido una importante incorporación de zinc, cobre, plomo y cadmio al sustrato subyacente. La tomografía eléctrica ha reflejado esto último con contrastes de resistividad eléctrica entre el estéril y el sustrato miocénico.
- Las seudosecciones geoelectricas 2D desplegadas sobre la zona de cárcavas y el bloque geoelectrico 3D, generado a partir de los perfiles de tomografía eléctrica 3D, muestran una región resistiva dentro del depósito formando una especie de lentejón con material conductor en superficie. La explicación a esto sería que los materiales más finos, tipo limo, como consecuencia de la erosión hídrica y de la clasificación gravimétrica durante las etapas de vertido, se han ido depositando en esta parte del depósito originando una capa conductora en superficie con valores inferiores a 8 ohm·m. Por otro lado, la erosión hídrica ha favorecido en profundidad el lavado de las posibles fisuras generadas durante el episodio de distensión al que se sometió a esta parte del depósito durante su rotura en el año 1973 (Faz *et al.*, 2003b). Este hecho, favorece la formación de estos cuerpos resistivos, denominados “lentejones”, en las seudosecciones geoelectricas y en el bloque geoelectrico 3D.

## **6.3 Balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia)**

### **6.3.1 Tomografía eléctrica 2D**

En el grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia) (Figura 6.56) se han efectuado perfiles de tomografía eléctrica 2D a través de varias campañas de medidas. Los perfiles de tomografía eléctrica se diseñaron para que cubrieran las dimensiones de las principales balsas de este grupo y con la longitud suficiente para alcanzar profundidades de 15 metros, que es una profundidad adecuada para estudiar la evolución temporal del purín en el subsuelo. También se efectuaron perfiles geoeléctricos exteriores a las balsas con los que poder comparar con los efectuados en su interior; no obstante, estos perfiles exteriores se situaron próximos al borde de las balsas.

Para estudiar la evolución temporal del purín en el subsuelo se han realizado varias campañas de medidas efectuadas entre el año 2003 y el año 2005. Durante estas campañas se han repetido los perfiles de tomografía eléctrica, manteniendo la misma posición y la orientación. A continuación describiremos los resultados alcanzados para cada una de las campañas efectuadas.

Para corroborar los resultados conseguidos y sus interpretaciones, además de obtener los horizontes litológicos, se realizaron dos sondeos mecánicos de 15 metros de profundidad, uno sobre la balsa nº 2 y otro sobre la balsa nº 3 (ver Apartado 6.3.3).

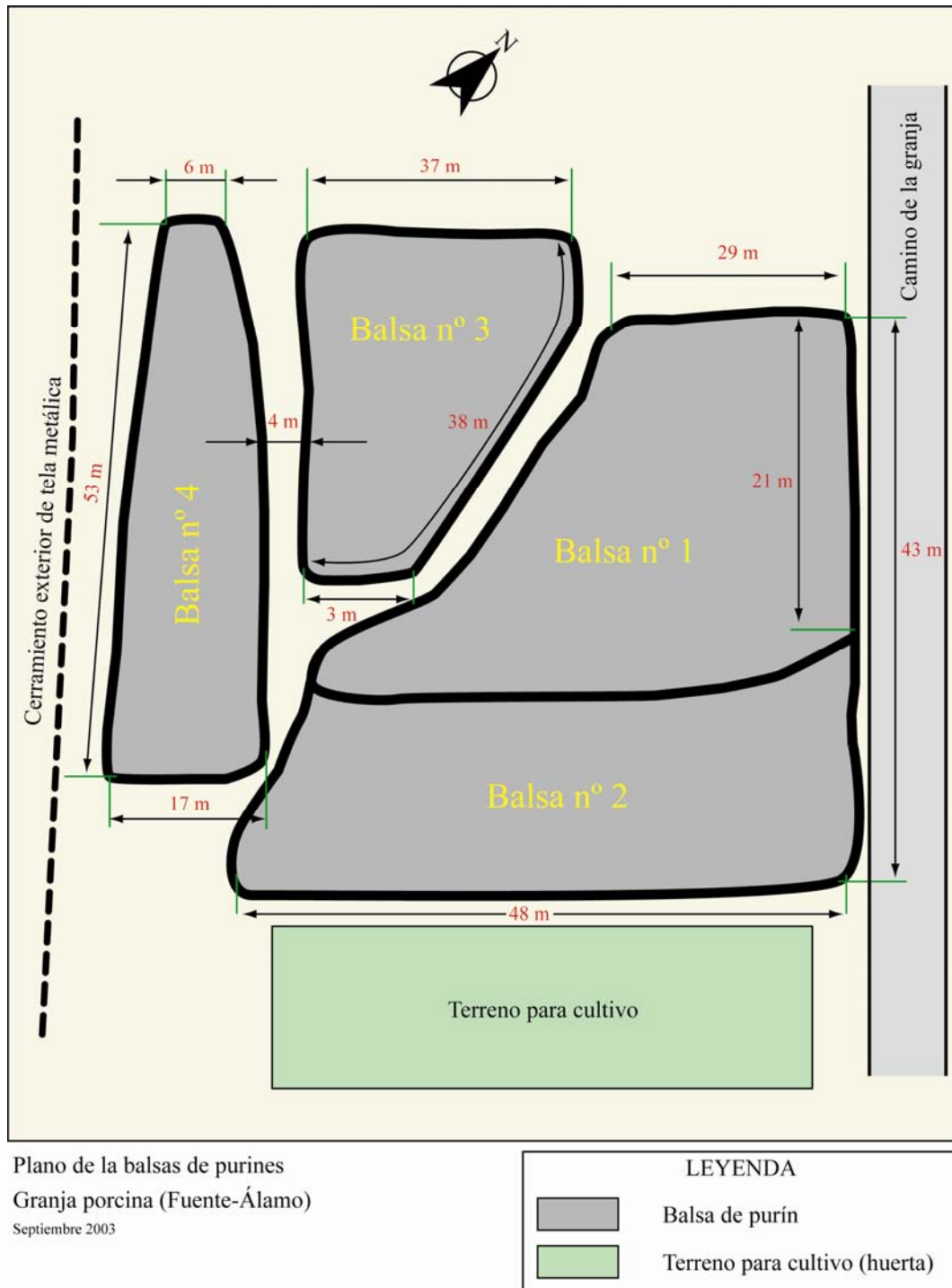
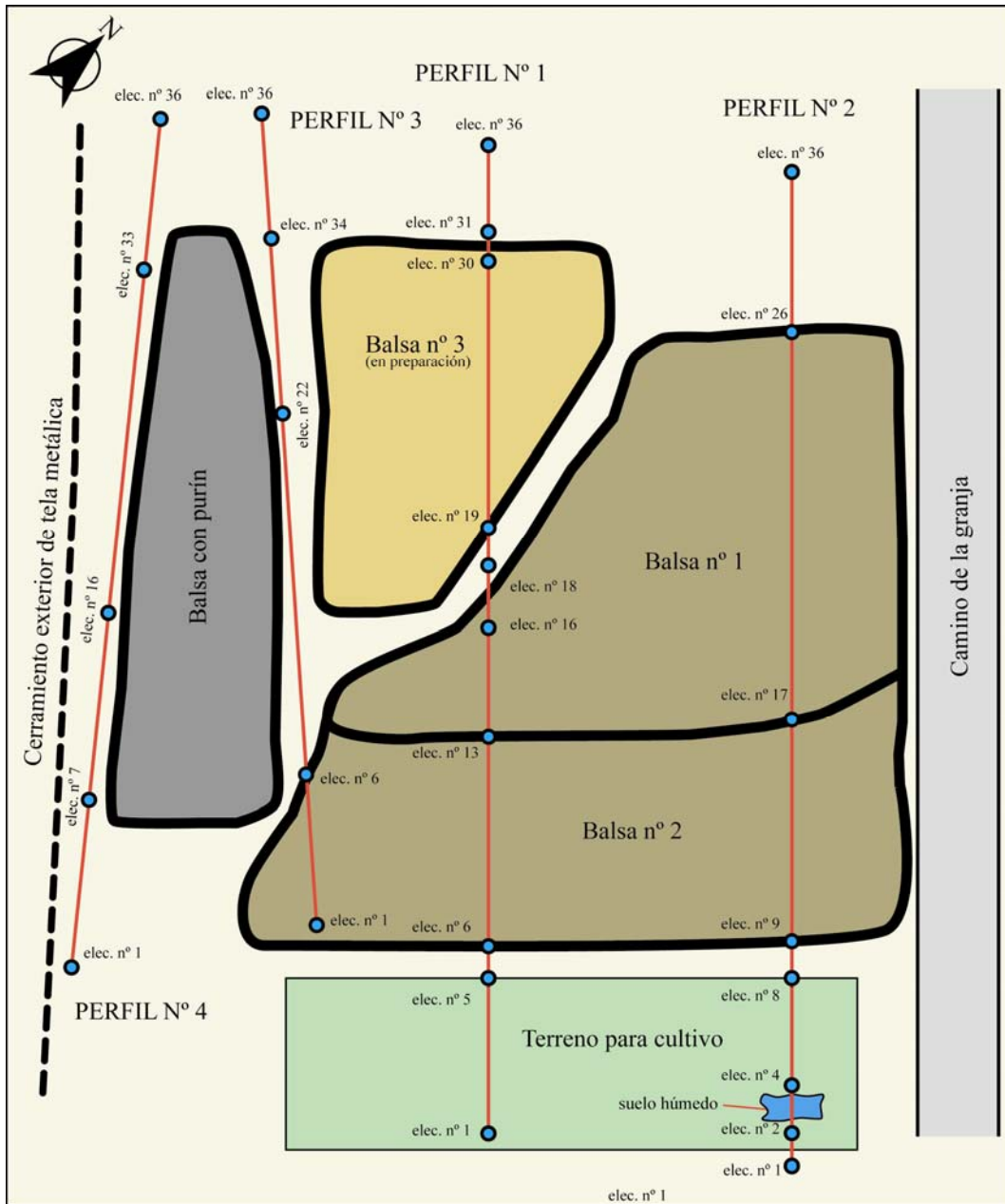


Figura 6. 56. Dimensiones del grupo de balsas de purín de Fuente-Álamo (Murcia).

### 6.3.1.1 Campaña de septiembre de 2003

Durante esta campaña se llevaron a cabo un total de cuatro perfiles de tomografía eléctrica, dos interiores y dos exteriores, cubriendo adecuadamente la superficie del terreno afectada por este grupo de balsas (Figura 6.57). Todos los perfiles estaban constituidos por un total de 36 electrodos, separados 2,5 metros, lo que

resultaba en perfiles de 87,5 metros de longitud de perfil. El dispositivo de medida empleado fue el Wenner-Schlumberger puesto que es muy adecuado para estudios de contaminación de suelos con contrastes laterales y verticales de resistividad eléctrica, siendo un buen compromiso entre el dispositivo Wenner y el dispositivo Dipolo-dipolo (ver Apartado 4.1.4).



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
Granja porcina (Fuente-Álamo)  
Septiembre 2003




LEYENDA	
	Balsa con purín
	Balsa vaciada de purín
	Balsa sin purín (terreno vírgen)

Figura 6. 57. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (septiembre de 2003).



Durante la realización de esta campaña de medidas la situación de las balsas de purines era la siguiente: la balsa nº 1 y la balsa nº 2 habían sido vaciadas del purín (ver Apartado 5.3.3 para una descripción detallada del purín), retirando el estiércol de su superficie y acumulándolo en pilas para su transporte posterior y ser usado como fertilizante agrícola; la balsa nº 3 se había construido recientemente y aún no había recibido ningún tipo de vertido sobre su superficie; la balsa nº 4 se encontraba aún con purín. De lo anterior se deduce que durante esta campaña concurrían todas las posibles situaciones que pueden darse en una balsa de purín. El estudiar la balsa nº 3 ha sido interesante pues ha permitido realizar medidas geoelectricas sobre su suelo antes de ser afectado por el vertido y poder comparar estos efectos en posteriores campañas.

En el Apartado 5.3 se realiza una descripción detallada de las balsas de purines estudiadas y el tipo de sustratos sobre el que se ubican.

## Perfil 1

En la siguiente figura se muestra la seudosección geoelectrica obtenida para el perfil nº 1. Sobre ella se han señalado los límites de las diferentes balsas que ha atravesado el perfil, situándose también las secciones correspondientes a los diferentes caballones o pequeños diques de material compactado. Estos suelen tener en este grupo de balsas alturas que pueden variar entre los 30-50 cm (Foto 6.30).

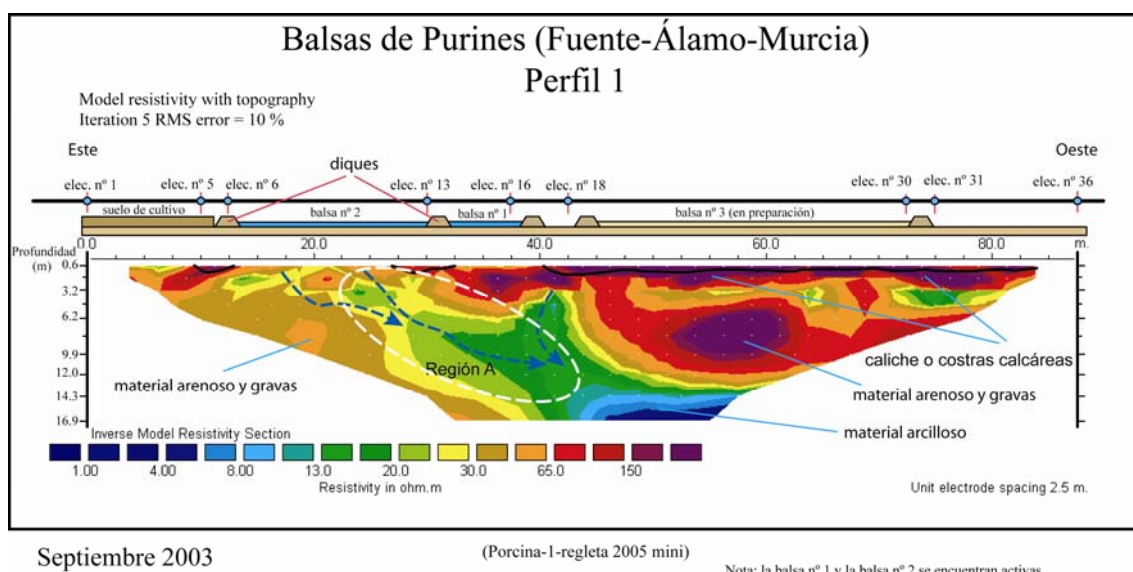


Figura 6. 58. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 1 realizado en septiembre de 2003.

Analizando la pseudosección de la Figura 6.58, tenemos una región fuertemente resistiva en superficie ( $> 150 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) que se extiende más allá de la superficie ocupada por la balsa n° 3 y que corresponde a material tipo caliche (Foto 6.31), después tenemos una región a una profundidad de 10 metros, también fuertemente resistiva, y que según los sondeos realizados corresponde con la presencia de material constituido por arenas y gravas sin saturar. En la pseudosección aparece en su zona central una región conductora ( $< 10 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) y que corresponde a material con alto contenido en arcilla.

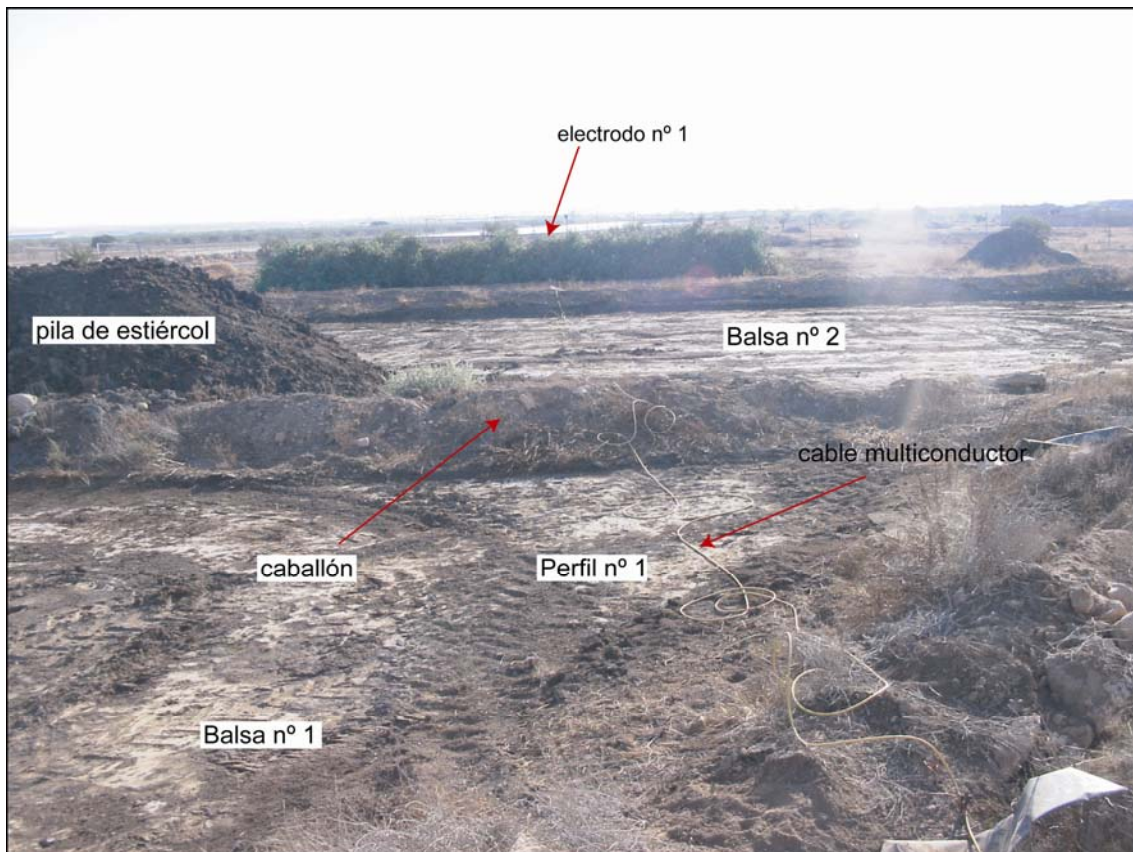


Foto 6. 30. Vista parcial del Perfil 1 orientada hacia electrodo n° 1.

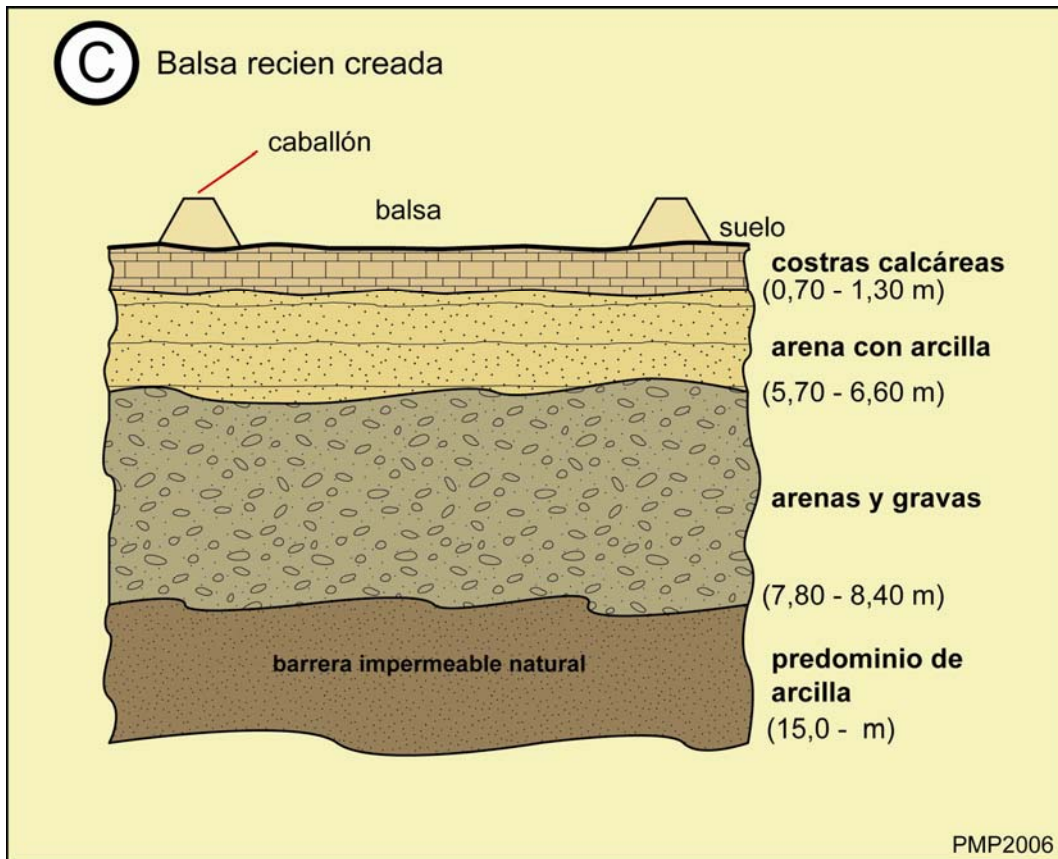


Figura 6. 59. Litología principal en el grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia).

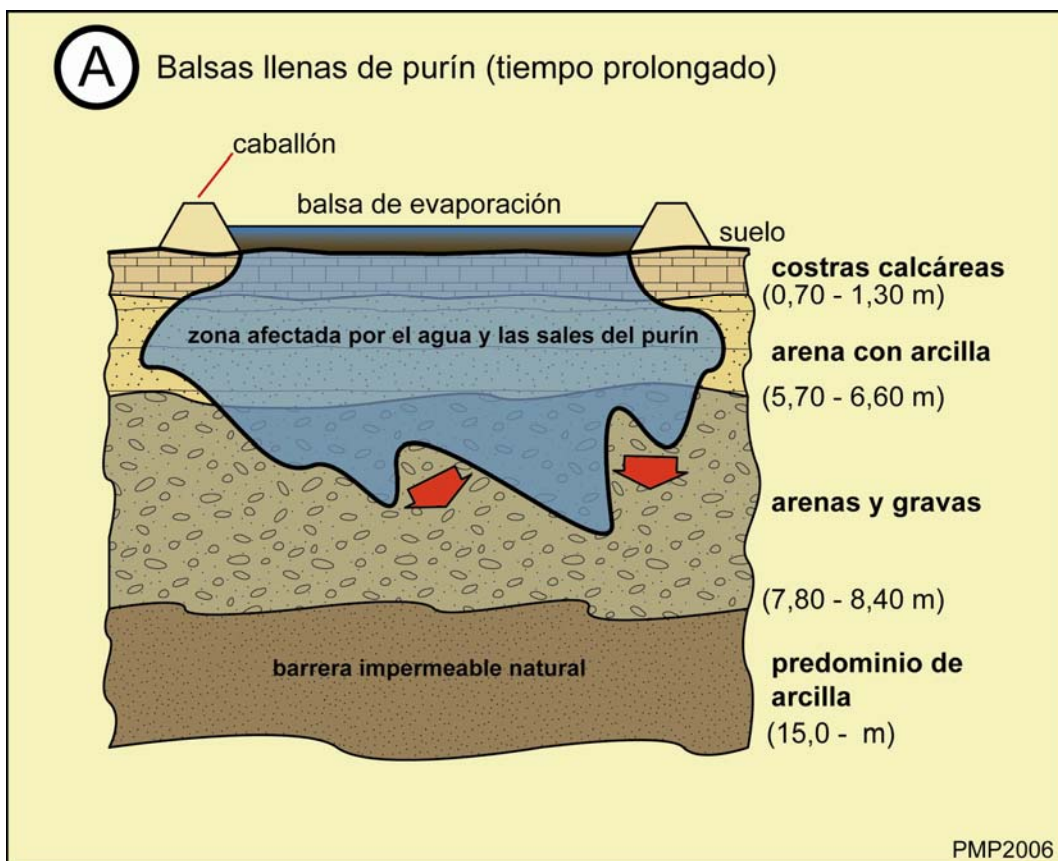


Figura 6. 60. Penetración del agua y las sales del purín en las formaciones del subsuelo.

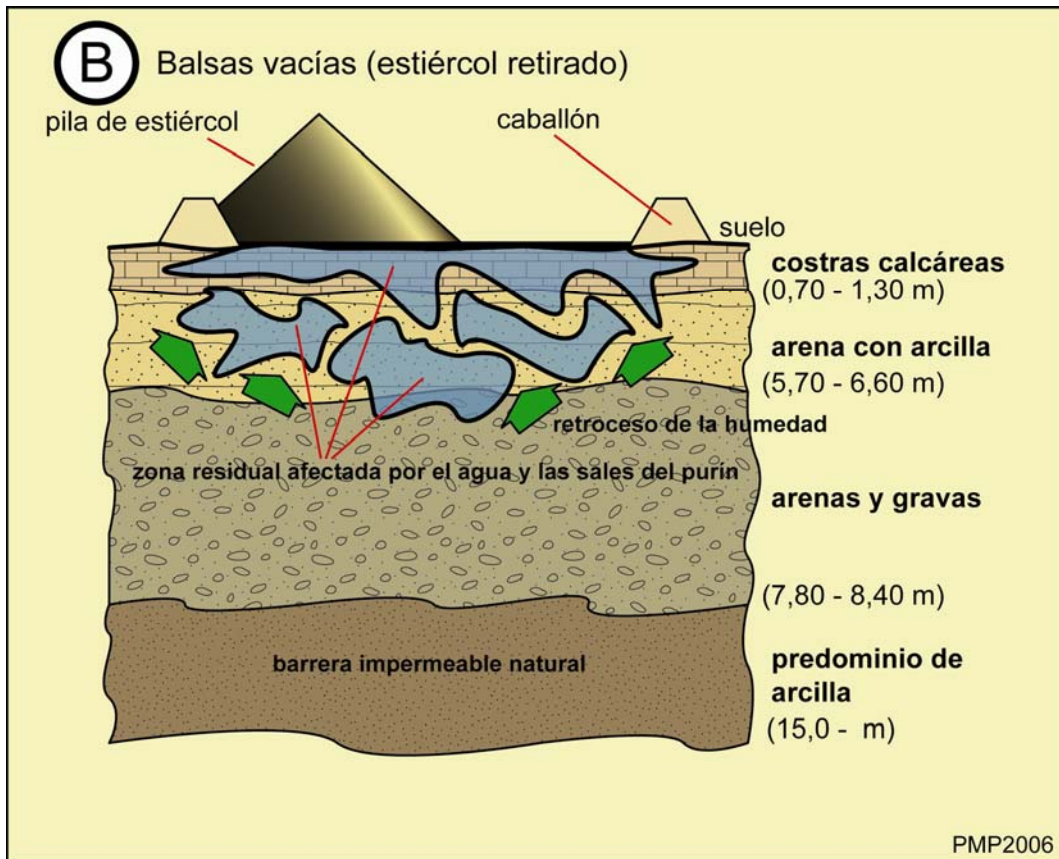


Figura 6. 61. Retroceso de la humedad del purín en las formaciones del subsuelo.

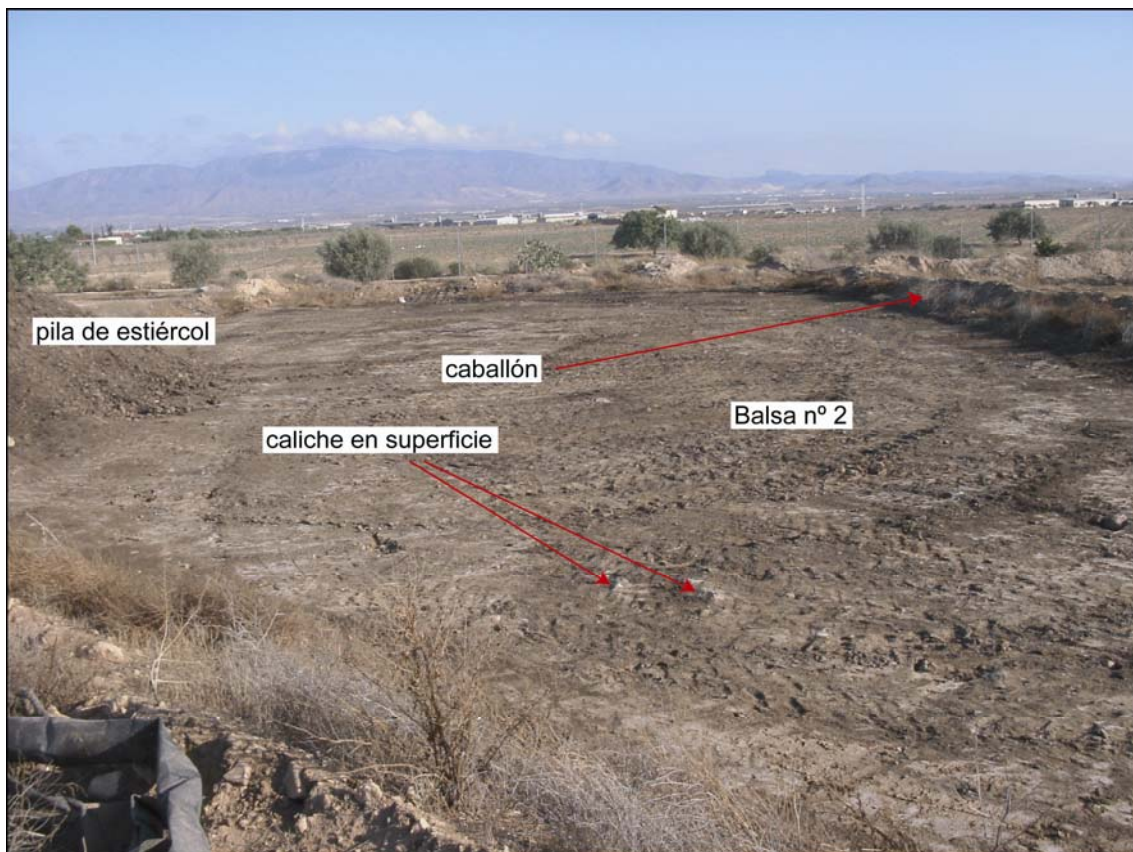


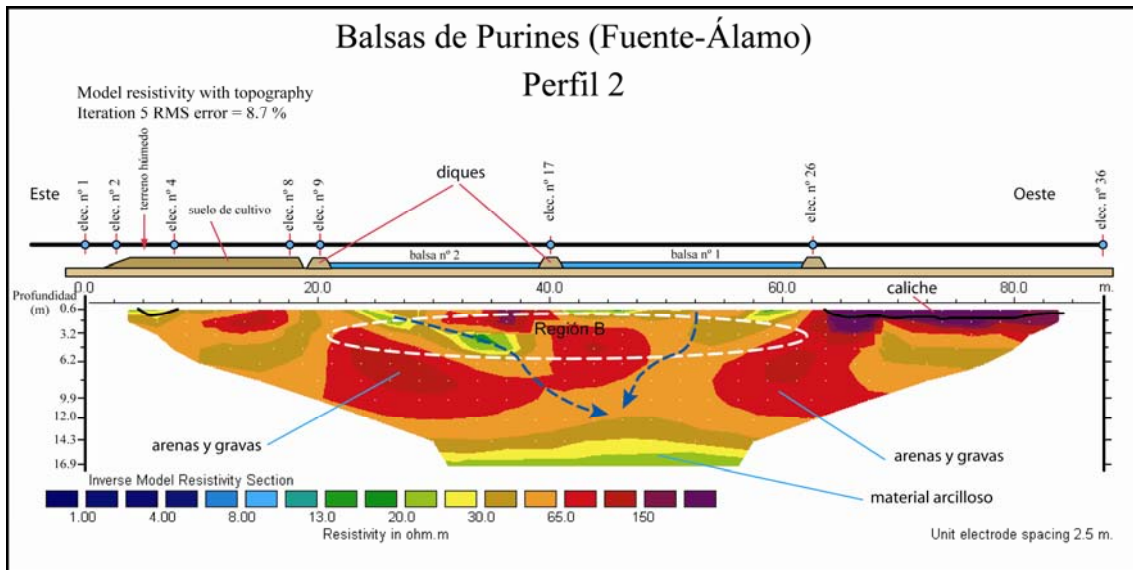
Foto 6. 31. Vista general de la balsa nº 2 de la cual ha sido retirado el estiércol.

Por último hay que destacar una región somera comprendida entre la superficie y los 14 metros de profundidad, la cual ha sido afectada por la actividad de las balsas nº 2 y nº 1; a esta región se la ha denominado región A en la pseudosección de la Figura 6.58, y a pesar de la presencia de arena y gravas sus valores de resistividad han descendido hasta los 13 ohm·m, señalando posibles vías seguidas por la filtración del agua y las sales del purín durante la etapa de almacenamiento en estado líquido (Figura 6.5) y que ahora representaría la fase de retroceso de esa humedad al encontrarse la balsa vacía (Figura 6.6). Hay que destacar el bajo error alcanzado en el proceso de inversión, siendo éste de un 10 %.

## **Perfil 2**

Este perfil cubrió la balsa nº 1 y la balsa nº 2 (Figura 6.57). En la figura 6.62 se puede observar la pseudosección obtenida para este perfil, con un error bastante bajo del 8,7 %. Al igual que se ha comentado para el perfil nº 1, en este caso también se ha señalado una región, denominada región B, que coincide con la extensión en superficie de las balsas nº 1 y nº 2, y donde los valores de resistividad eléctrica alcanzan valores bajos de 13 ohm·m, a pesar de la fuerte presencia de costras calcáreas en superficie. Este extraño comportamiento se explica debido a la actividad de las balsas situadas en superficie, ya que de no haberse producido ningún tipo de filtración los valores de resistividad hubieran sido superiores a los 150 ohm·m, como ocurre sobre la superficie de la balsa nº 3, donde el material en su superficie es idéntico al existente en el resto de balsas. La pseudosección eléctrica también señala la presencia un horizonte de material formado por arenas y gravas a una profundidad de 7 metros al que le sigue otro horizonte de material formado por arcilla arenosa, de ahí la disminución de los valores de resistividad eléctrica a partir de los 10 metros.

Hay que subrayar, como se observará en las siguientes campañas de medidas, que el tamaño de las regiones relativas a los máximos valores de resistividad eléctrica del horizonte de arenas y gravas va variando en tamaño según las balsas próximas se encuentren llenas de purín, hayan sido vaciadas o aún no hayan sido sometidas a ningún tipo de vertido; dependiendo de la posible afección por humedad del purín embalsado, hay que tener en cuenta que un 90 % del purín es agua (ver Apartado 5.3.3).



Septiembre 2003

(Porcina 2-regleta 2005 mini)

Nota: la balsa n° 1 y la balsa n° 2 se encuentran activas pero sin purín

Figura 6. 62. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en septiembre de 2003.

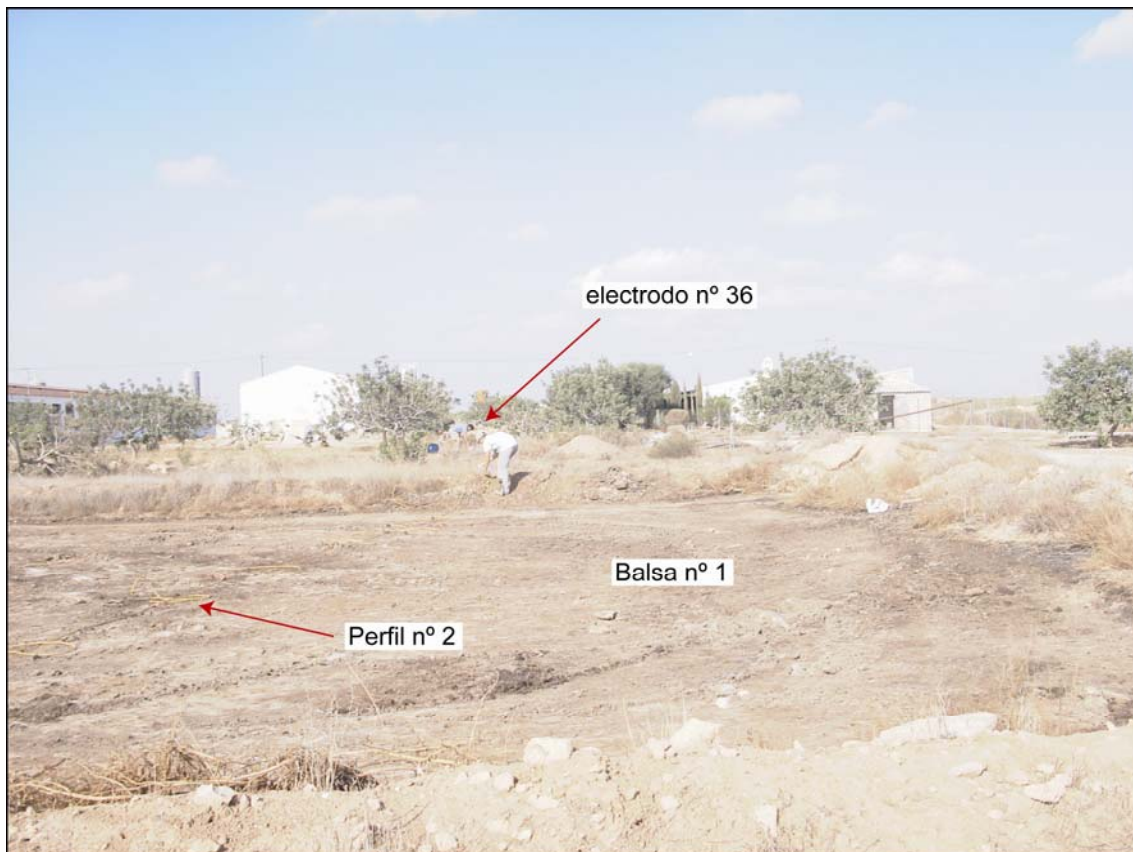


Foto 6. 32. Instalación del perfil geoelectrico n° 2 y situación del electrodo n° 36.

### Perfil 3

Este perfil se realizó en el exterior de las balsas, concretamente entre los bordes exteriores de las balsas nº 3 y nº 4 (Figura 6.57), aunque parte de su longitud se situó dentro de la balsa nº 2 (Figura 6.63).

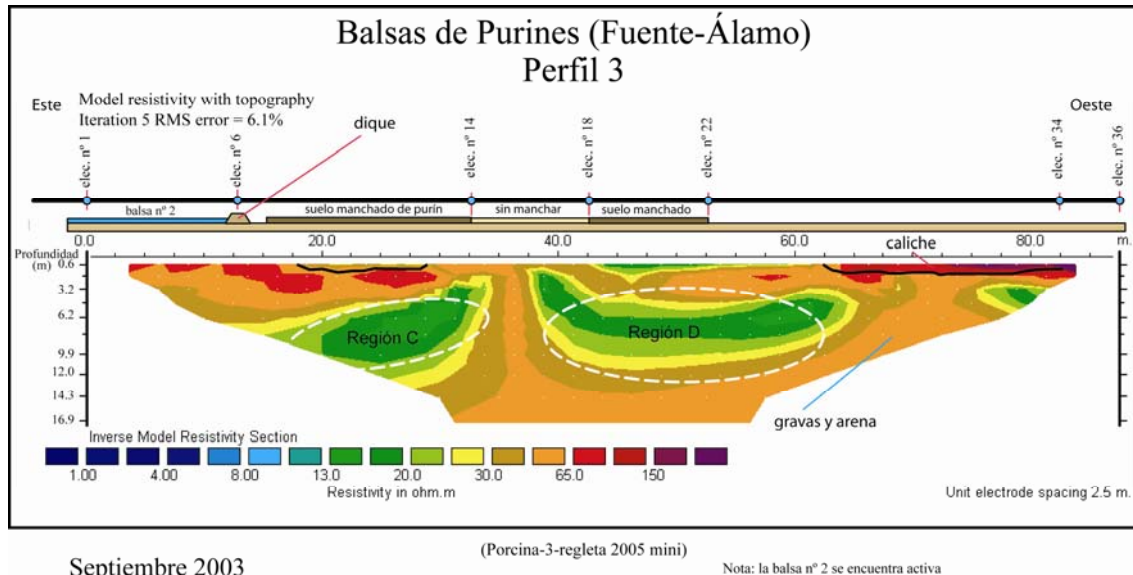


Figura 6. 63. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 3 realizado en septiembre de 2003.

En la seudosección de la figura 6.63 se han señalado las zonas sobre la superficie donde se produjo un derrame de purín a partir de la tubería flexible que lo transporta hacia las balsas (Foto 6.33). A pesar de la coincidencia entre la situación de la superficie afectada por este derrame y la situación de las dos regiones señaladas en la seudosección, regiones C y D, sin embargo estas regiones son fruto de la actividad de la balsa nº 4, cuyos límites van desde el electrodo nº 6 hasta el electrodo nº 34, siendo la zona central de la balsa la que tiene más posibilidades de afectar el subsuelo inmediato, ya que es donde hay más profundidad de purín almacenado (Foto 6.33) (por ello es lógico pensar que las regiones C y D se deben a la influencia de la presencia de la balsa nº 4). Es de destacar que en esta seudosección no se recoge ninguna posible vía de migración del purín hacia los materiales más profundos del subsuelo. Sobre la región D hay una región superficial con valores de resistividad eléctrica en torno a 13 ohm·m la cual si sería debida al efecto del derrame producido por el purín.

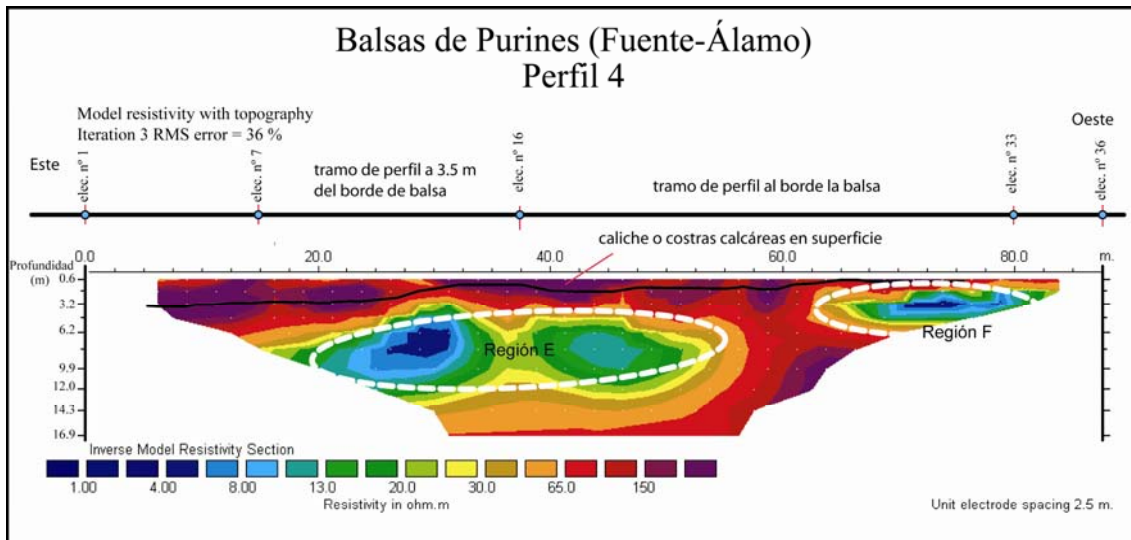


Foto 6. 33. Instalación del perfil n° 3 y situación del electrodo n° 36.

## Perfil 4

El perfil n° 4 se emplazó exteriormente a la balsa n° 4 (Foto 6.34), aunque próximo a ella. En la Figura 6.64 se facilita la pseudosección obtenida con este perfil y donde se destacan algunas regiones resistivas interesantes. Por un lado tenemos las regiones E y F que surgen de la influencia de la balsa n° 4 como sucedió con el perfil n° 3, comentado anteriormente; por otro lado tenemos la región superficial con elevados valores de resistividad eléctrica propia de la presencia del caliche. También aquí hay que destacar la ausencia de posibles vías de migración del contaminante hacia materiales más profundos, reflejado con un horizonte fuertemente resistivo a partir de los 12-13 metros de profundidad.





(Porcina-4-regleta 2005 mini)

Septiembre 2003

Figura 6. 64. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en septiembre de 2003.

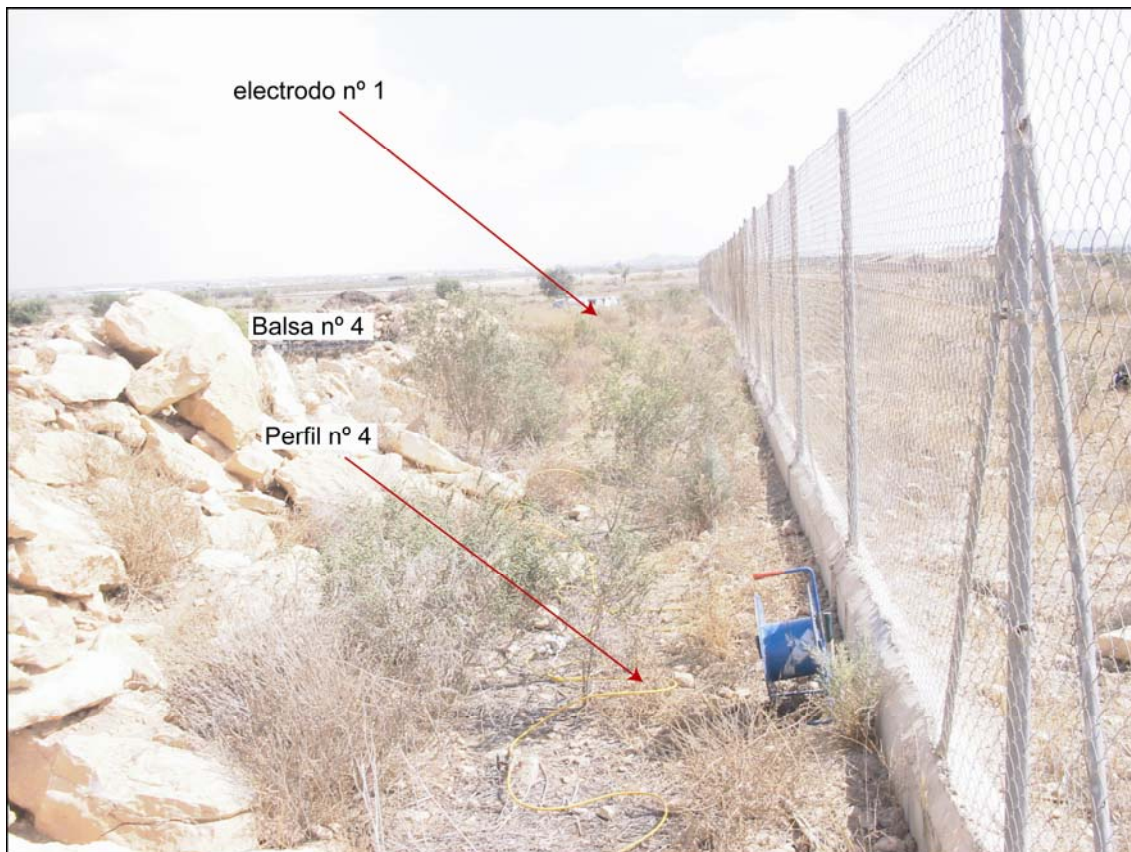


Foto 6. 34. Vista parcial del perfil n° 4 orientada hacia electrodo n° 1.

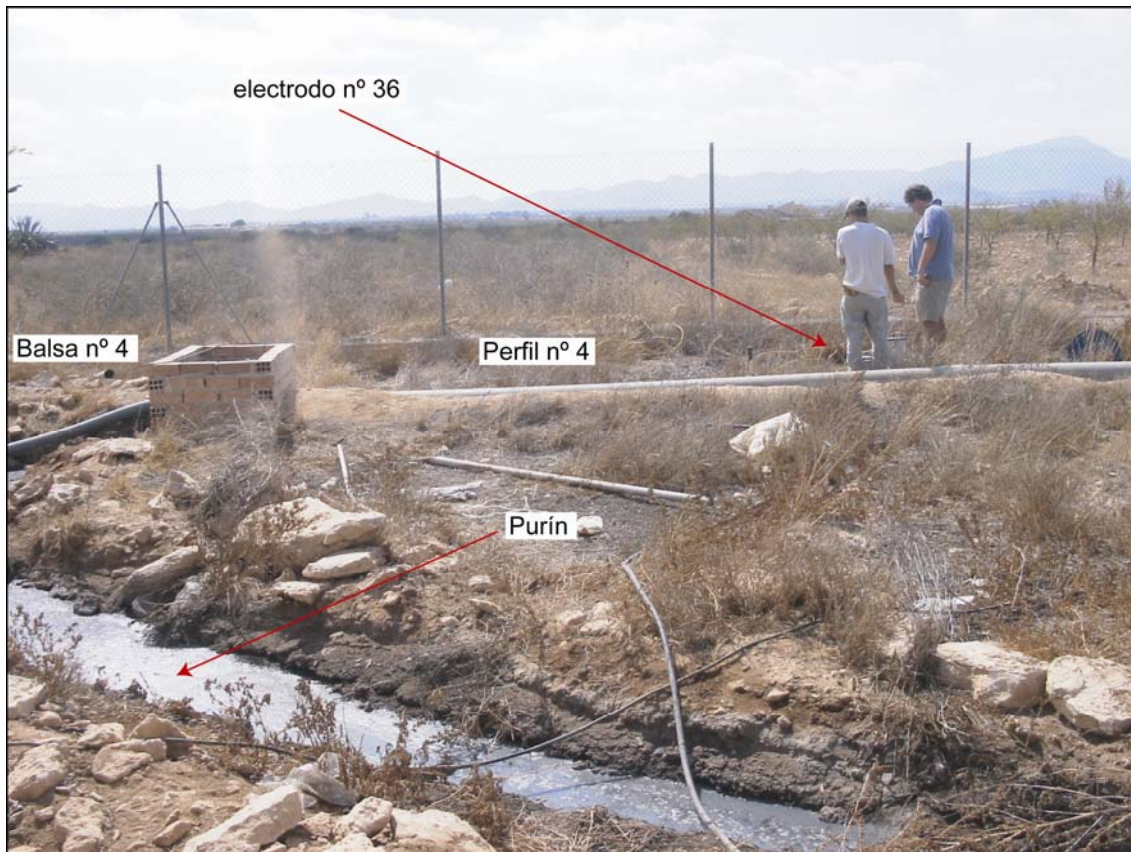


Foto 6. 35. Situación del electrodo n° 36 del perfil n° 4.

### 6.3.1.2 Campaña de abril de 2004

Durante esta campaña se realizaron tres perfiles de tomografía eléctrica de 36 electrodos cada uno, con una separación entre electrodos de 2,5 metros por lo que la longitud de los perfiles fue de 87,5 metros. El emplazamiento de los perfiles fue condicionado a que se volvieran a repetir los perfiles realizados en la campaña de medidas de septiembre de 2003, y por ello su denominación fue similar (Figura 6.65). De los tres perfiles llevados a cabo, el perfil n° 1 se realizó en el interior de las balsas, el resto de perfiles, el perfil n° 3 y el perfil n° 4, se realizaron exteriormente.

Durante abril de 2004 todas las balsas contenían purín líquido por lo que hubo que implantar una nueva metodología de trabajo para poder realizar estas medidas de tomografía eléctrica. La base principal de esta nueva metodología consistió en realizar un soporte aéreo que garantizara la imposibilidad para que los elementos de medida se mancharan o cayeran dentro de la balsa. Este soporte aéreo consistió en un conjunto de varillas que servían de soporte a un cable de acero sobre el cual se ataría, por medio de

abrazaderas, el cable multiconductor (Figura 6.66). En lugar de emplear los electrodos de acero inoxidable se empleó cable eléctrico al cual se le habrían pelado previamente los extremos para dejar los hilos de cobre libres del aislante; uno de los extremos se conectaría al cable multiconductor y el otro extremo se introduciría superficialmente en el purín líquido garantizando de esta forma la condición de semi-espacio infinito (aire-material), siéndole aplicable los algoritmos de inversión desarrollados para el RES2DINV de Geotomo (Loke, 2000).

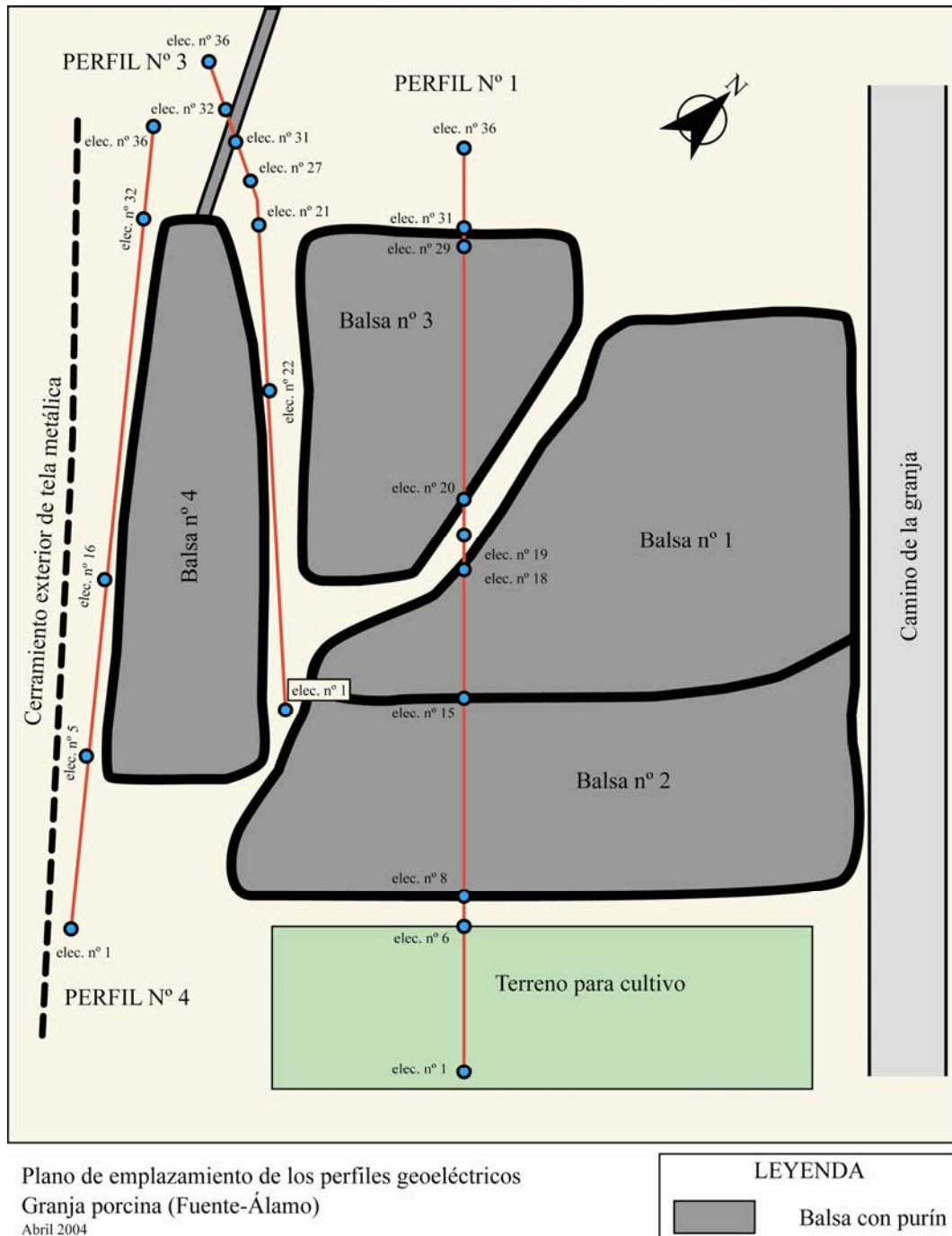


Figura 6. 65. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (abril de 2004).

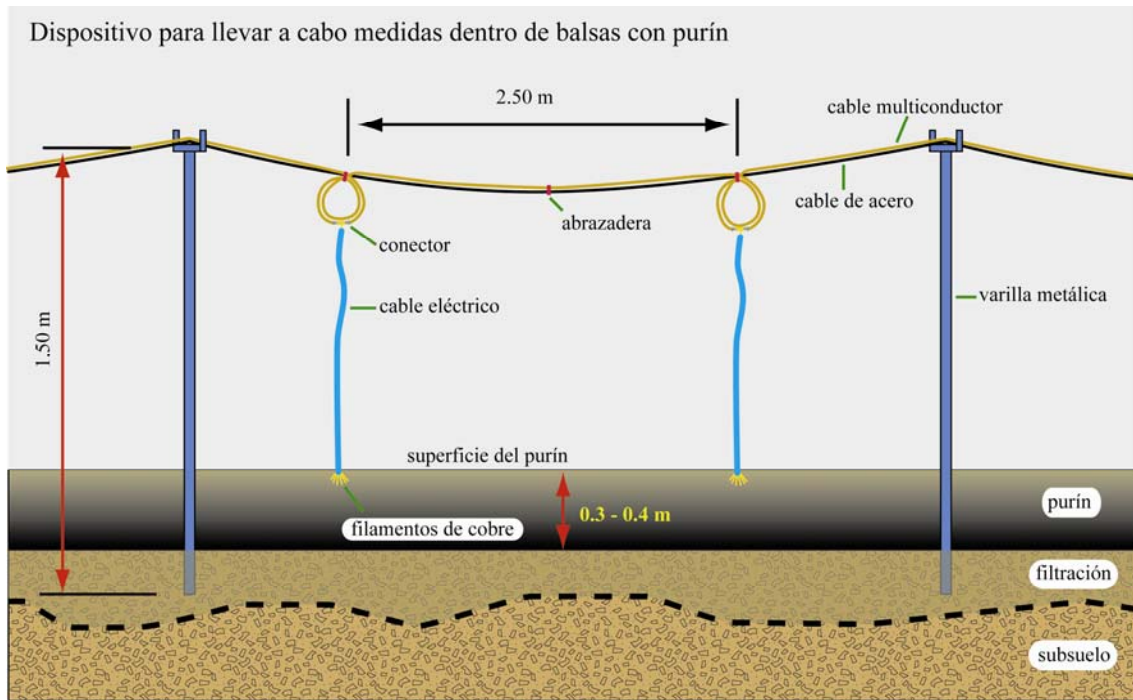
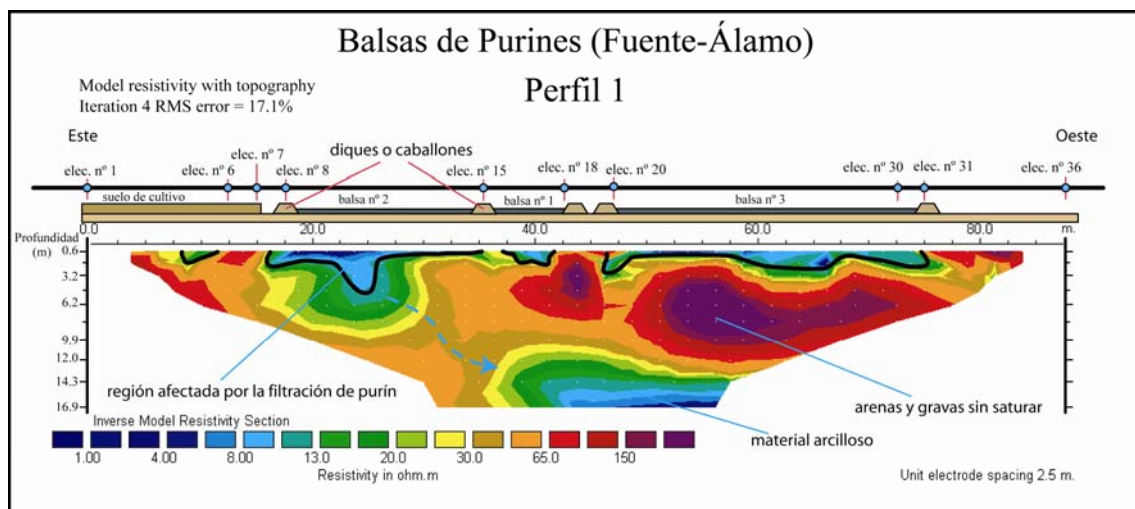


Figura 6. 66. Representación esquemática del dispositivo empleado dentro de las balsas con purín.

### Perfil 1

Fue el único perfil interior que se realizó durante la campaña de abril de 2004 en el grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia) y debido a que las balsas contenían purín fue la primera vez que se instaló el soporte aéreo comentado anteriormente (Foto 6.36). Este perfil tuvo que atravesar tres balsas contiguas, la balsa nº 1, la balsa nº 2 y la balsa nº 3, todas ellas con purín en estado líquido (Figura 6.67).



Abril-2004

(Porc1)

Nota: la balsa nº 1, balsa nº 2 y la balsa nº 3 se encuentran con purín

Figura 6. 67. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 1 realizado en abril de 2004.

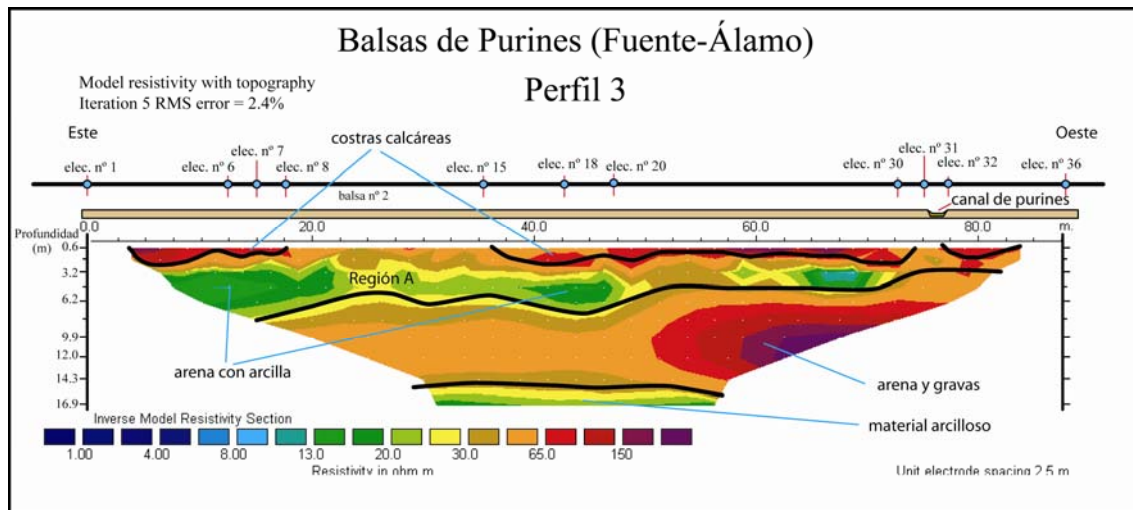
En la figura anterior se muestra la pseudosección geoelectrica obtenida para este perfil junto con la interpretación asignada y los límites de las balsas atravesadas. La pseudosección marca de forma precisa las regiones afectadas por la filtración del purín llegando hasta los 5 metros bajo la balsa n° 2; esto ha sido posible debido al gran contenido de agua y sales que forman parte de su contenido, convirtiéndolo en un material muy conductor que contrasta de forma significativa con los materiales de su entorno. En la parte inferior de la pseudosección destaca un horizonte conductor atribuible a material arcilloso, puesto de manifiesto a través de los sondeos mecánicos a testigo continuo y que actúa como una barrera impermeable natural. También se señala el horizonte resistivo de materiales formados por arenas y gravas que ya se mostró en el mismo perfil realizado en septiembre de 2003 (Apartado 6.3.1.1) y dentro de él se ha marcado un posible vía de filtración hacia el material arcilloso.



Foto 6. 36. Vista parcial del perfil n° 1 y el sistema de soporte aéreo empleado.

### Perfil 3

Este perfil, denominado igual que el perfil equivalente realizado en septiembre de 2003 (Figura 6.65), sin llegar a entrar en la balsa nº 2, tuvo una longitud de 87,5 metros, los cuales se desplegaron exteriormente entre las balsas nº 2, nº 3 y nº 4 (Foto 6.38).



Abril-2004

(Porcina-1 mini)

Nota: la balsa nº 1, balsa nº 2 y la balsa nº 3 se encuentran con purín

Figura 6. 68. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 3 realizado en abril de 2004.

En la seudosección geoelectrica de la Figura 6.68 aparecen los horizontes resistivos característicos del grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia): un horizonte resistivo que supera en algunas zonas los 150 ohm·m, atribuible al material calcáreo existente en superficie y que se extiende hasta los 1,50 metros de profundidad; a continuación aparece una capa conductora con valores mínimos entre 10 y 13 ohm·m atribuible a un material arenoso con arcilla y de espesor variable entre 1 y 5 metros; seguidamente aparece en la seudosección otra capa resistiva asignada a un material formado por arenas y gravas sin saturar y de un espesor que puede llegar a los 4-5 metros con resistividades importantes superiores a los 150 ohm·m; y por último se aprecia el afloramiento de una nueva capa conductora, que según el sondeo, la formaría materiales en los que predomina el contenido de arcilla. En la seudosección geoelectrica no se ha detectado ninguna vía de migración de purín entre las dos capas conductoras, por lo que se puede afirmar que de existir filtración somera de purín, éste

se acumularía en la capa formada por arcilla arenosa señalada en la pseudosección como región A.



Foto 6. 37. Vista parcial del perfil n° 3 orientada hacia electrodo n° 1.

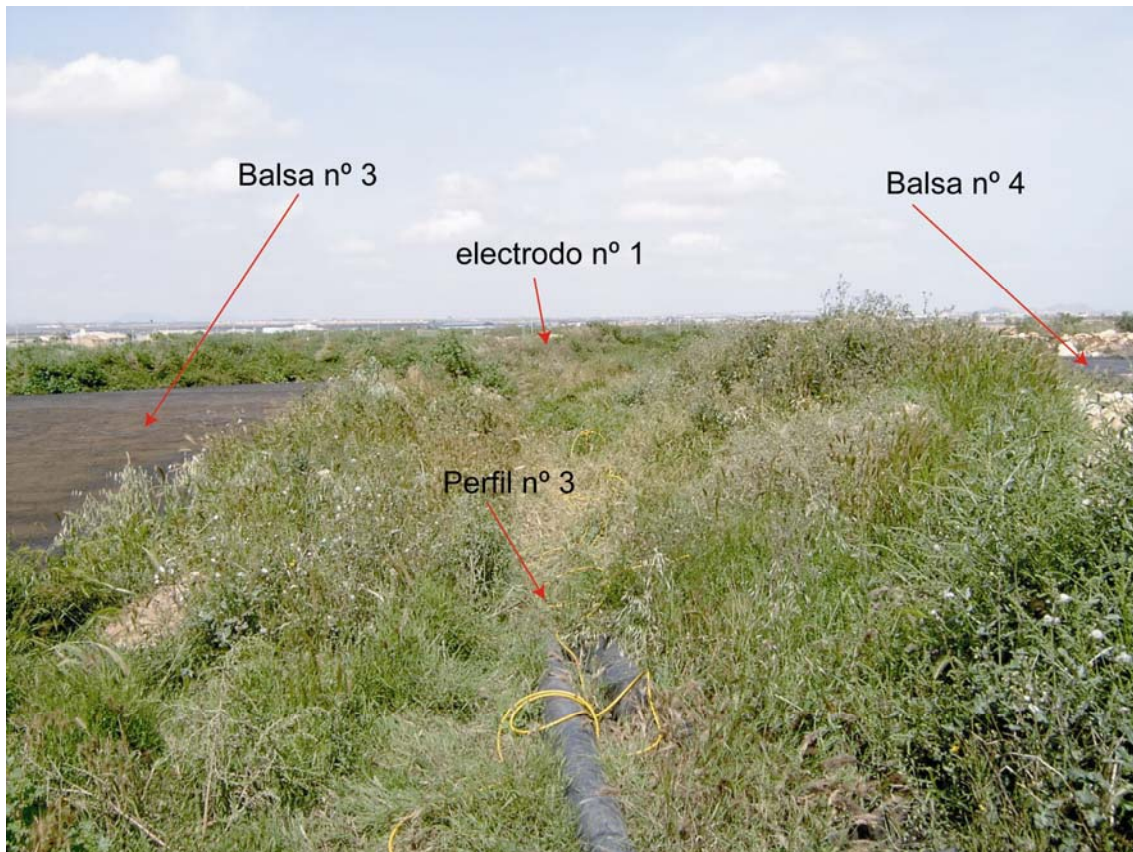


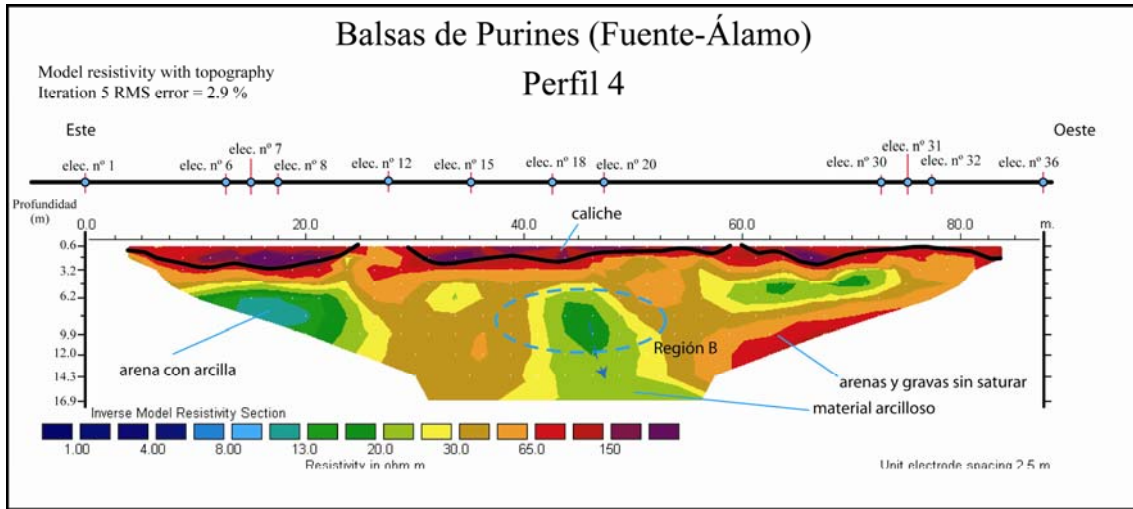
Foto 6. 38. Vista del perfil n° 3 situado exteriormente entre las balsas de purines.

#### **Perfil 4**

Este perfil se realizó próximo a la balsa n° 4, que es la de mayor profundidad de todo el grupo alcanzando 1,50 metros en su parte central y estando llena la mayor parte del tiempo que han durado las campañas geoelectricas (Foto 6.39).

En la Figura 6.69 se facilita la seudosección geoelectrica del perfil n° 4. En él, además de la capa resistiva superficial del material calcáreo, destaca una zona intermedia donde no aparecen los valores de resistividad eléctrica característicos de la capa de arenas y gravas; (sólo aparece en la parte derecha de la seudosección); en su lugar se localiza una región con valores de resistividad reducidos (20 ohm·m) atribuible a la influencia de la balsa n° 4 y que ha podido afectar a la capa de arenas y gravas, esta región se ha denominado como región B.





Abril-2004

(Porcina-2 mini)

Nota: la balsa n° 1, balsa n° 2 y la balsa n° 3 se encuentran con purín

Figura 6. 69. Seudosección geoelectrónica interpretada del perfil n° 4 realizado en abril de 2004.

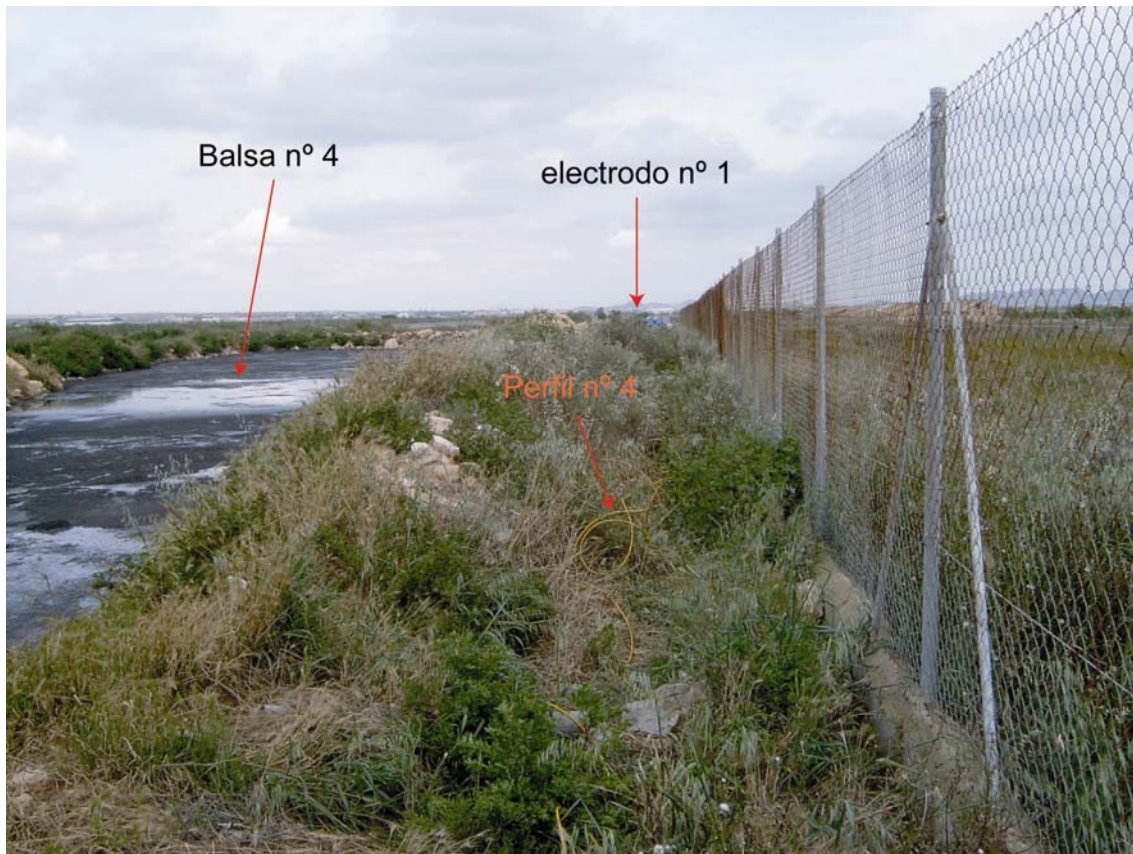


Foto 6. 39. Vista parcial del perfil n° 4 exteriormente a la balsa n° 4.

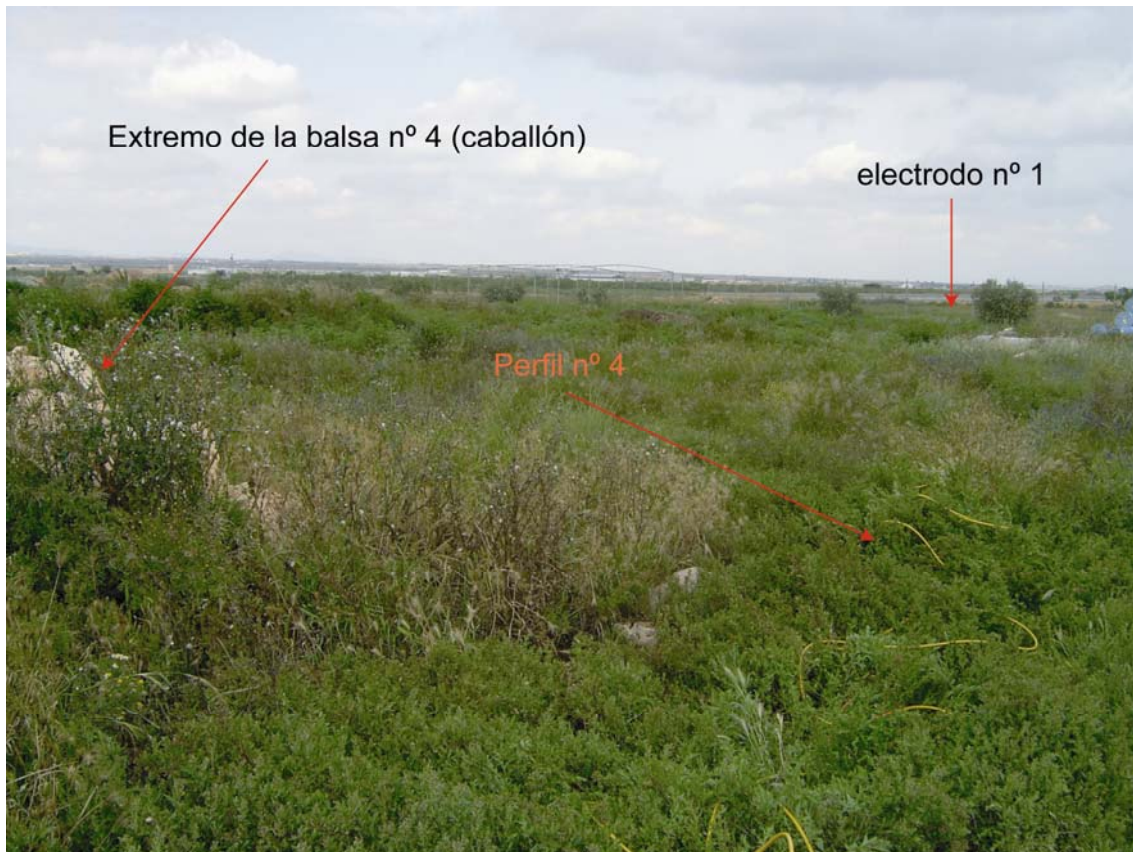
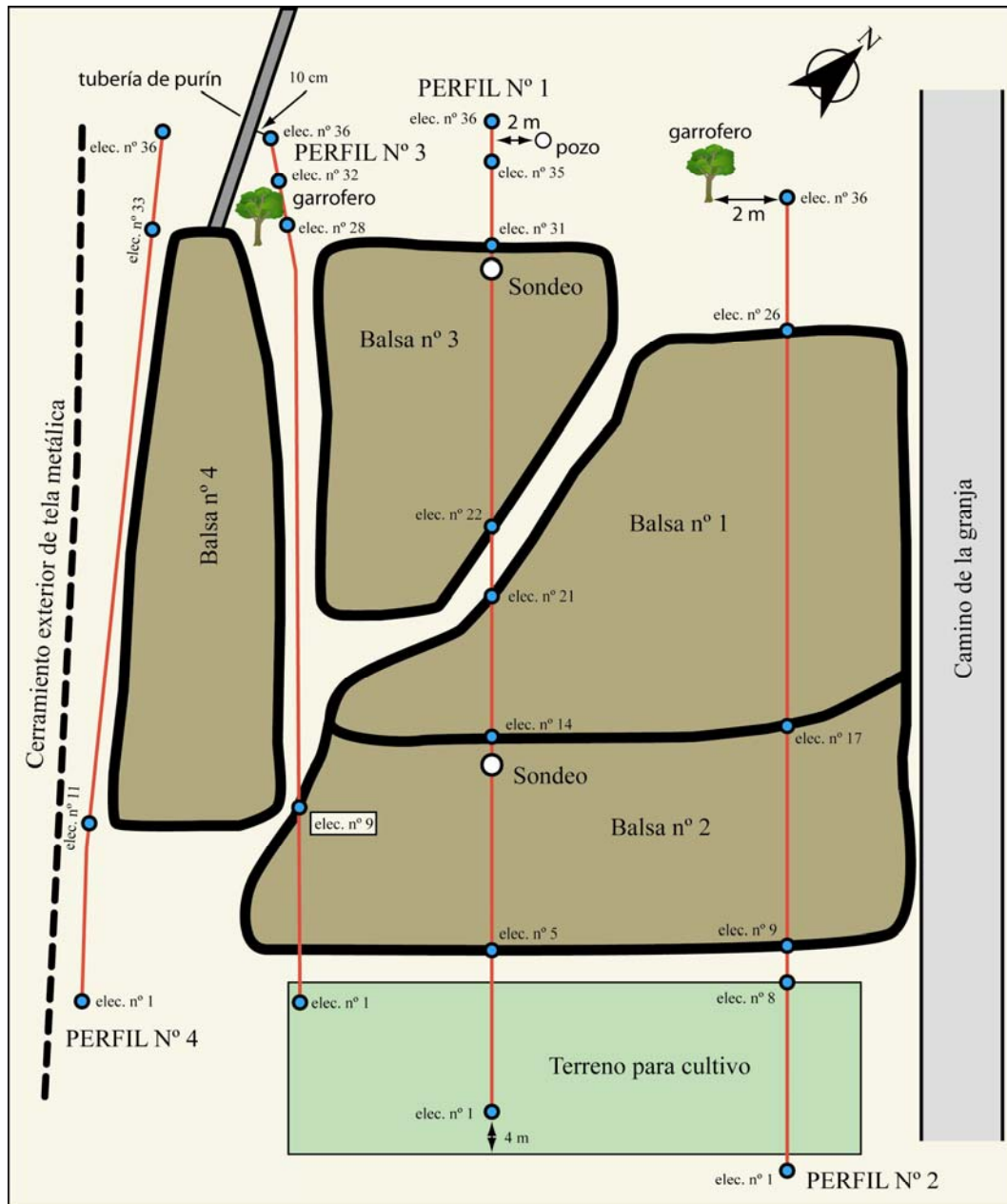


Foto 6. 40. Vista del extremo del perfil n° 4 orientada hacia electrodo n° 1.

### 6.3.1.3 Campaña de octubre de 2004

Durante esta campaña se realizaron cuatro perfiles de tomografía eléctrica equivalentes en posición y longitud a los realizados en septiembre de 2003 (Figura 6.57 y Figura 6.70). En esta ocasión, sin embargo, todas las balsas habían sido vaciadas recientemente, lo que hizo innecesario el empleo del sistema de soporte aéreo.



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
 Grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia)  
 Octubre 2004

LEYENDA	
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black;"></span>	Balsa sin purín
<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; border-radius: 50%;"></span>	Sondeo

Figura 6. 70. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (octubre de 2004).

## Perfil 1

En la Figura 6.71 se han ubicado sobre la pseudosección geoelectrica los sondeos mecánicos realizados en octubre de 2005 señalando los horizontes litológicos atravesados que se observaron *in situ*, a través de la inspección visual de los testigos. Se

han insertado en este perfil porque es el perfil que justamente pasa por los sondeos mecánicos; además las balsas n° 2 y n° 3 se encuentran en una situación similar a la encontrada durante la ejecución de los sondeos y el periodo estacional es idéntico puesto que esta tomografía también se realizó en octubre. También se han colocado los resultados de los análisis de texturas realizados sobre las muestras del sondeo mecánico (Apartado 6.3.3). Es interesante ver como hay una gran coincidencia entre los resultados de texturas y los horizontes resistivos. Aunque hay cierta dispersión entre los horizontes litológicos levantados *in situ* y los horizontes geoelectricos, hay que subrayar que aquellos se realizaron visualmente con lo que llevan inherentes un cierto grado de subjetividad y por ello sus límites deben considerarse con cierta horquilla de variabilidad; no obstante, se sigue cumpliendo que los cuatro tipos de capas encontradas en este grupo de balsas aparecen. Se ha señalado sobre la seudosección la región A como aquella con posibilidad de contener altas concentraciones de sales por la actividad de las balsas de purines debido a que es la capa conductora más próxima a la superficie formada por arena arcillosa; bajo ella aparece una capa de arena y gravas con valores elevados de resistividad lo que indica un bajo contenido de sales y una región no saturada, parámetros indicativos de ausencia de contaminación. Tampoco se refleja en la seudosección una vía activa de migración del purín a través de una interrupción resistiva clara del horizonte asignado a las arenas y gravas.

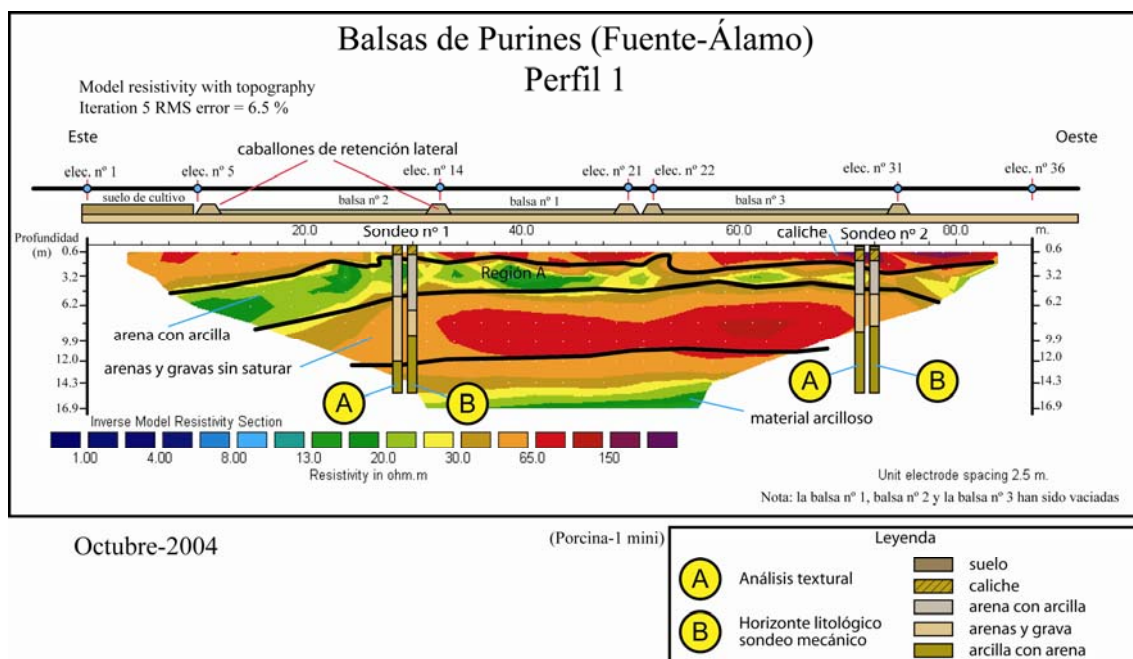
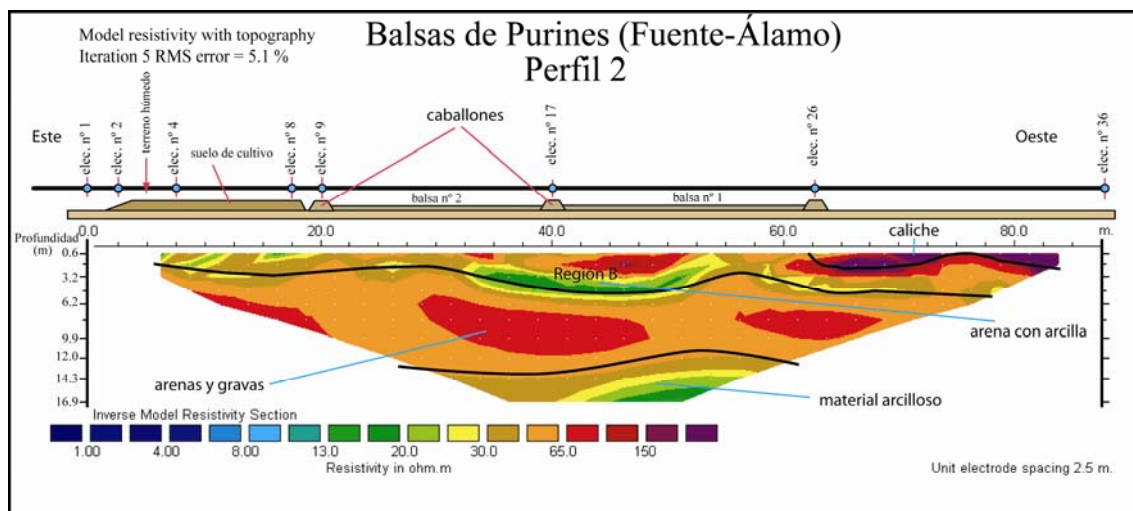


Figura 6. 71. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en octubre de 2004.

## Perfil 2

Este perfil, obtenido con un error muy bueno del 5,1 %, atravesó las balsas n° 1 y n° 2, las cuales se encontraban vacías de purín. Deteniéndose en la Figura 6.72 y comparándola con la Figura 6.71, se puede deducir que son similares en lo relativo a los diferentes horizontes geoelectricos que aparecen, aunque la capa conductora más somera identificada por los sondeos como arena arcillosa presenta una menor identidad que en el perfil anterior y, curiosamente, justo debajo de las balsas es donde se presenta una mayor extensión para ir perdiendo espesor según se va alejando de las balsas; ello podría ser una indicación de la acumulación de sales por el reciente almacenamiento de purín.

La capa designada como arenas y gravas presenta algo más de espesor que en la pseudosección del perfil n° 1, si bien, hay zonas intermedias con valores de resistividad altos que se presentan interrumpidas; esto podría ser un indicativo de caminos preferentes del purín durante la etapa de almacenamiento o más bien debido al alcance del agua.



Octubre 2004

(Porcina-2 mini)

Nota: la balsa n° 1 y la balsa n° 2 han sido vaciadas recientemente

Figura 6. 72. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en octubre de 2004.

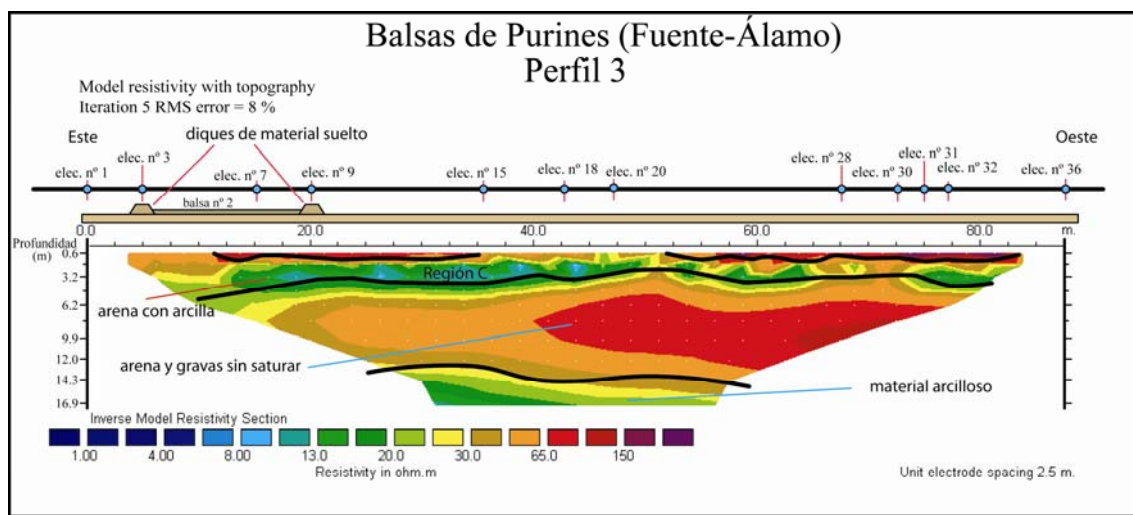
## Perfil 3

Este perfil se realizó exteriormente, entre las balsas n° 2, n° 3 y n° 4. La Figura 6.73 muestra la seudosección obtenida y, comparándola con el mismo perfil realizado

en abril de 2004, se puede observar su similitud con pequeñas variaciones. Se aprecian, como ya va siendo habitual en este grupo, los cuatros horizontes resistivos principales. Es de destacar como la capa conductora más somera de valores mínimos de resistividad eléctrica, denominada en la Figura 6.73 como región C, donde los valores pueden descender hasta los 8 ohm-m, según se aproxima a las balsas de purín (Figura 6.70) su espesor se incrementa ligeramente así como ocurre la disminución de los valores de resistividad.

El horizonte resistivo con valores superiores a 100 ohm-m, asignado a arenas y gravas, sigue la misma tendencia que en la seudosección del perfil nº 1. Se aprecia como en la parte derecha de la seudosección es donde se obtienen los valores de resistividad eléctrica más altos; esto puede ser indicativo de una mayor presencia de arenas y gravas sin saturar, además de verse esta zona menos afectada por la actividad de las balsas.

Por último, mencionar de nuevo, la ligera aparición de un horizonte profundo, a partir de los 12 metros, donde predomina el contenido de arcilla, lo que proporciona bajos valores de resistividad eléctrica en torno a 13 ohm-m y que actuaría como un impermeable natural.



Octubre-2004

(Porcina-3 mini)

Nota: la balsa nº 1, balsa nº 2 y la balsa nº 3 han sido vaciadas

Figura 6. 73. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 3 realizado en octubre de 2004.

## Perfil 4

Este perfil se realizó exteriormente a la balsa n° 4 (Figura 6.70). Aunque en la pseudosección geoelectrica aparecen las cuatro regiones resistivas principales, no obstante se manifiesta una interrupción dentro de la capa resistiva intermedia de arenas y gravas que permite la conexión entre la capa conductora somera, denominada región D en esta pseudosección, y la región conductora profunda asignada a una material con predominio de arcilla.

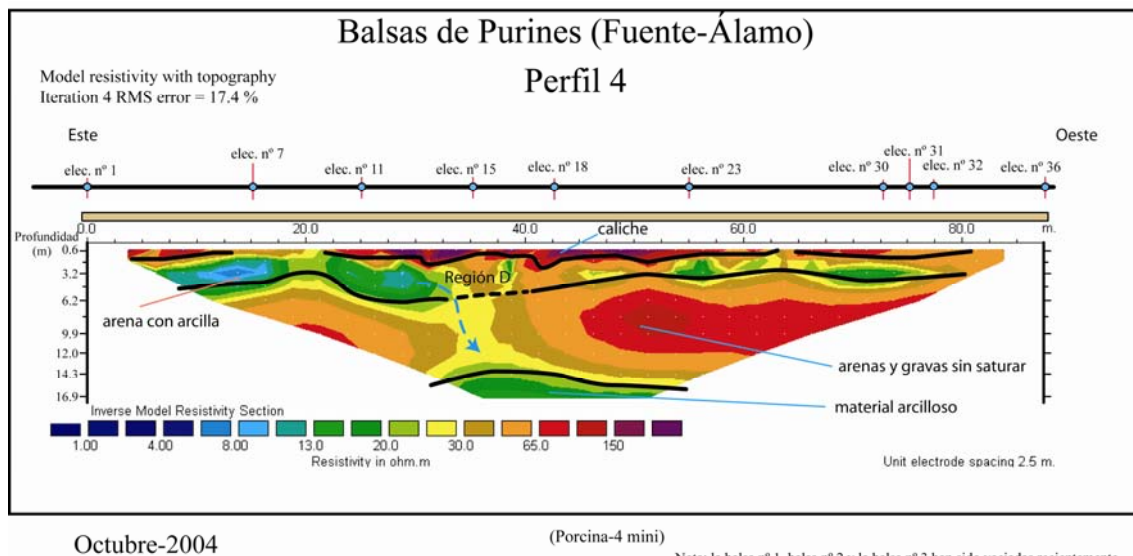
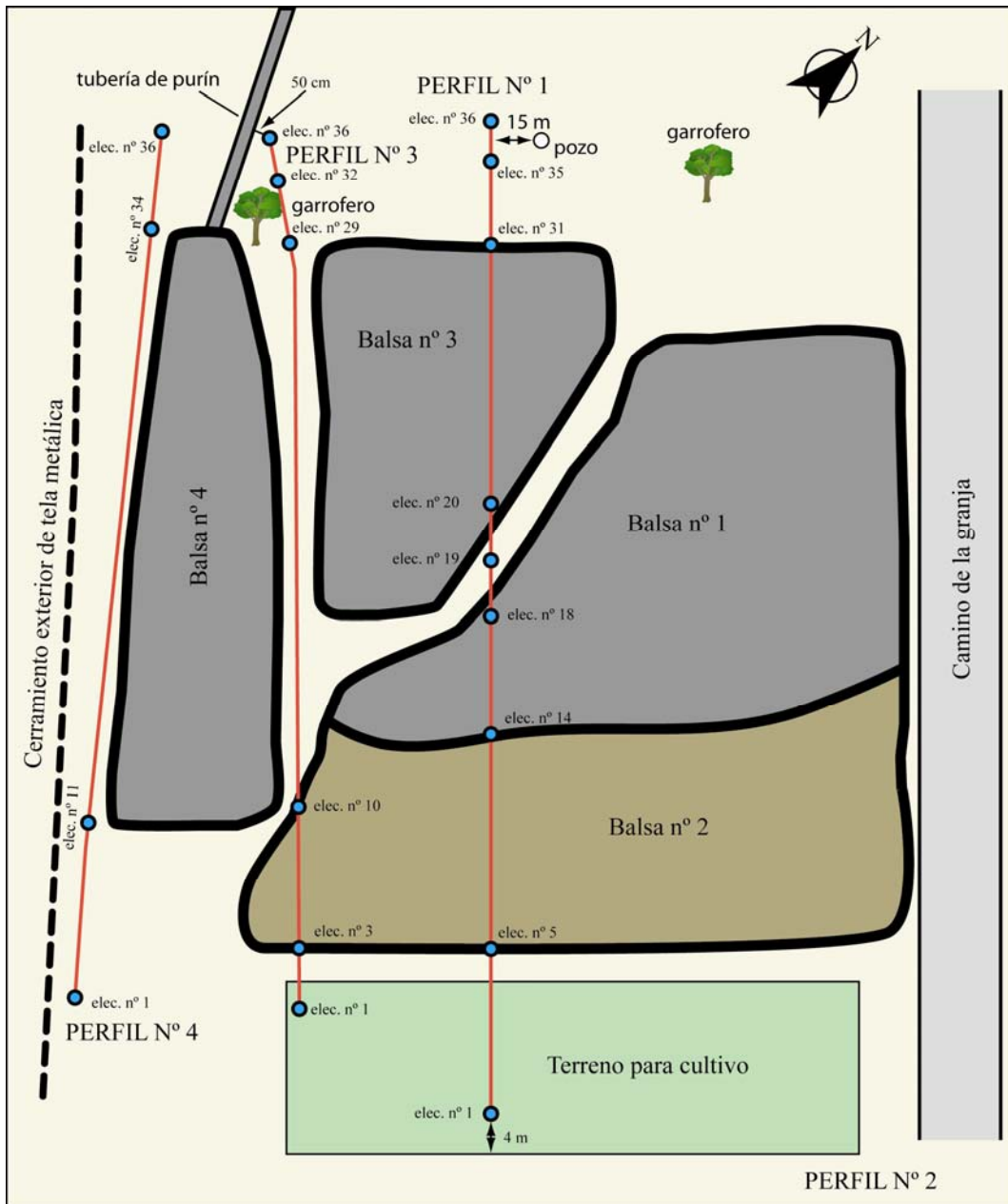


Figura 6. 74. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en octubre de 2004.

### 6.3.1.4 Campaña de abril de 2005

Durante esta campaña de medidas, únicamente la balsa n° 2 se encontraba vacía de purín (Figura 6.75). En el transcurso de la misma se efectuaron tres perfiles de 36 electrodos con una separación de 2,5 metros, dos de los cuales fueron exteriores a las balsas y uno interior, para lo cual hubo que instalar el dispositivo en el soporte aéreo ya comentado anteriormente. Las longitudes aproximadas de los perfiles fueron de 87,5 metros.



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
 Granja porcina (Fuente-Álamo)  
 Abril 2005  
 Separación interelectródica = 2.5 metros



LEYENDA	
	Balsa sin purín
	Balsa con purín

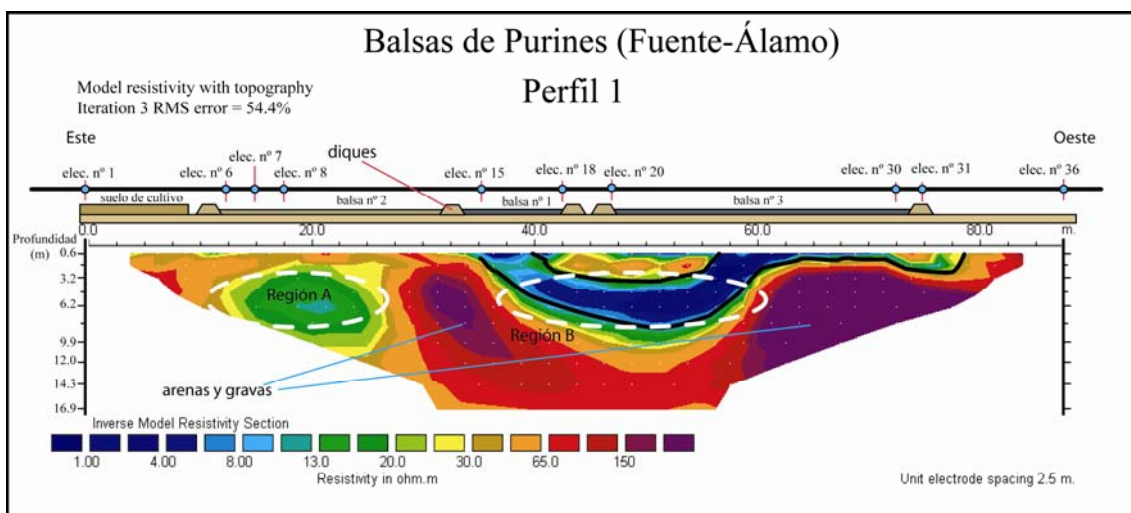
Figura 6. 75. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (abril de 2005).

### Perfil 1

Este perfil se realizó en parte en el interior de las balsas n° 1 y n° 3 que contenían purín por lo que hubo que instalar el soporte aéreo descrito anteriormente (Figura 6.66).



En la siguiente figura se facilita la seudosección obtenida en la que destacan unas zonas conductoras, región A y región B, debidas a la influencia de la actividad de las balsas en superficie. Por el hecho de encontrarse la balsa nº 1 y la balsa nº 3 con purín, la región B presenta un valores de resistividad eléctrica más bajos ( $> 8$  ohm·m) que la región A, lo que indica una acumulación salina importante en esta región. A pesar de esta importante afección que alcanza los 7-8 metros de profundidad, alcanzando los materiales arenosos, la seudosección no muestra bajo la región B una vía activa importante de migración del contaminante hacia los materiales con predominio en arcillas que se encontrarían a partir de los 12-13 metros de profundidad.



Abril-2005

(Porcina-1-sw mini)

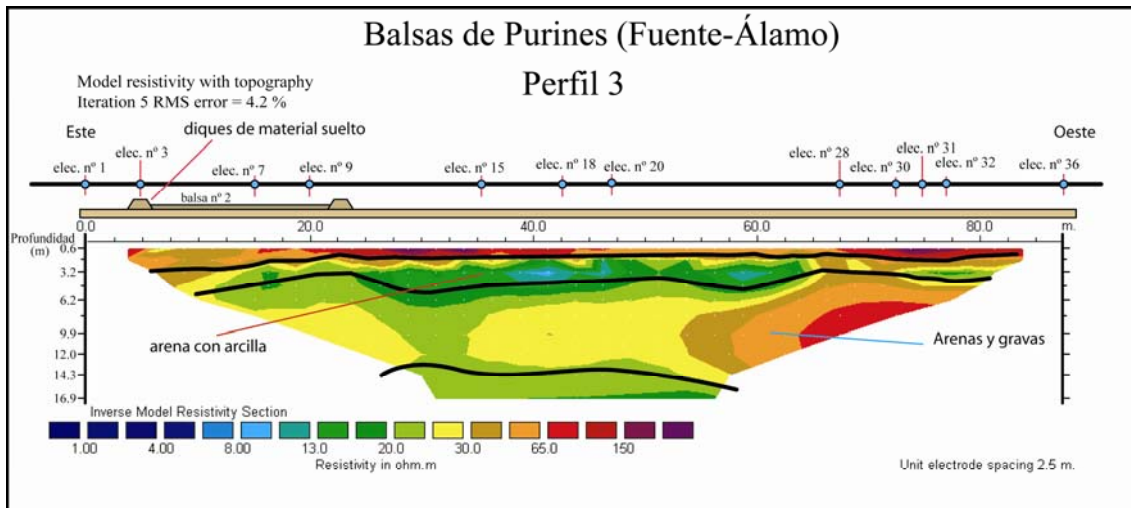
Nota: balsa nº 1 y la balsa nº 3 se encuentran con purín

Figura 6. 76. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 1 realizado en abril de 2005.

### Perfil 3

La seudosección geoelectrica obtenida con este perfil sigue de forma general la alternancia resistiva obtenida con la mayor parte de los perfiles geoelectricos de las diferentes campañas, salvo cuando la afección somera por purín se hace patente. La Figura 6.77 señala en la capa de arenas y gravas un mayor porcentaje de éstas sin saturar en la parte derecha de la seudosección, de ahí su mayores valores de resistividad eléctrica; por el contrario, en la parte izquierda de esta misma capa, los valores de resistividad se encuentran rebajados hasta los 20 ohm·m los puede ser un indicativo de un menor contenido en arenas y gravas o bien un mayor contenido salino o una mayor saturación por agua procedente de la actividad de las balsas adyacentes. Esto último es

lógico puesto que durante esta campaña las balsas adyacentes se encontraban con purín. Es interesante comparar esta seudosección con la obtenida para el perfil similar efectuado en la campaña de octubre de 2004 en donde se puede observar como la capa asignada a las arenas y gravas en aquel presenta unos valores de resistividad eléctrica más acusados debido a la menor afección de las balsas, que en ese momento se encontraban vacías. Por ello se puede pensar que cuando las balsas se encuentran con purín la región afectada presenta una mayor extensión por la filtración acuosa y salina que cuando se encuentran vacías o secas en la cual la región tiende a recuperar los valores resistivos originales, aunque el alcanzar este estado dependerá del contenido salino u acuoso que permanezca remanente (Figura 6.60 y Figura 6.61).



Abril-2005

(Porcina-3 mini)

Nota: la balsa n° 1, balsa n° 3 y la balsa n° 4 están con purín

Figura 6. 77. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 3 realizado en abril de 2005.

## Perfil 4

La seudosección geoelectrica 2D obtenida a través de este perfil exterior se muestra en la siguiente figura, donde se vuelve a presentar una zona intermedia, región C, con valores anormalmente bajos de resistividad eléctrica ( $< 10$  ohm.m) en la profundidad asignada al horizonte de arenas y gravas, lo que es indicativo de una importante afección por parte de la balsa n° 4 (Figura 6.75) de esta región coincidiendo con la parte de la misma que mayor contenido de purín presenta. En la campaña de septiembre de 2003 también se puso de manifiesto una región similar para el perfil

equivalente a éste. Destaca una vía activa de migración que ya fue detectada en el perfil equivalente que se realizó en la campaña de octubre de 2004.

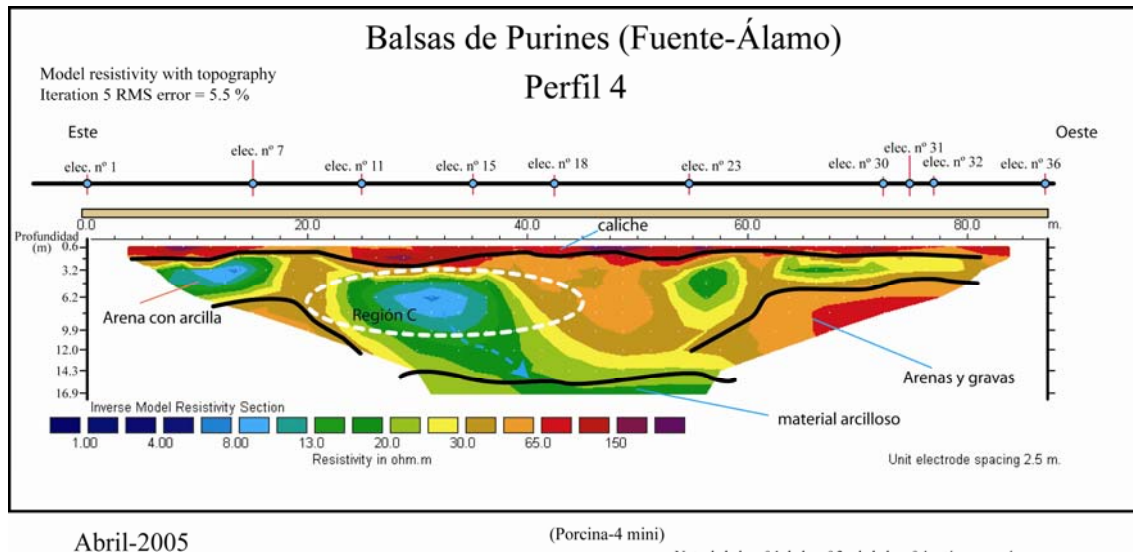


Figura 6. 78. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 4 realizado en abril de 2005.

### **6.3.2 Tomografía eléctrica 3D**

En el grupo de balsas de purines se ejecutó una malla compuesta por 5 perfiles paralelos de tomografía eléctrica separados 2 metros entre ellos y con una separación de 2,5 metros entre electrodos (Figura 6.79). Estos perfiles consistieron en 36 electrodos con una longitud de 87,5 metros. El dispositivo empleado fue el Schlumberger-Wenner que es muy adecuado ante cambios laterales y verticales de resistividad eléctrica (ver Capítulo 4). La campaña de tomografía eléctrica se realizó en el mes de septiembre de 2005.

La situación de estos perfiles se efectuó atendiendo a los siguientes criterios: que la zona cubierta por la malla 3D de tomografía eléctrica pasara por la posición de los sondeos mecánicos con el fin de poder cotejar estos resultados a los obtenidos con los análisis de texturas, geoquímicos y de tomografía eléctrica 2D de las anteriores campañas; que la longitud de los perfiles cubriera varias balsas con diferentes condiciones de llenado y que estos perfiles fueran similares en orientación y longitud a los ya realizados en campañas anteriores para la tomografía eléctrica 2D (Foto 6.41 y Foto 6.42).

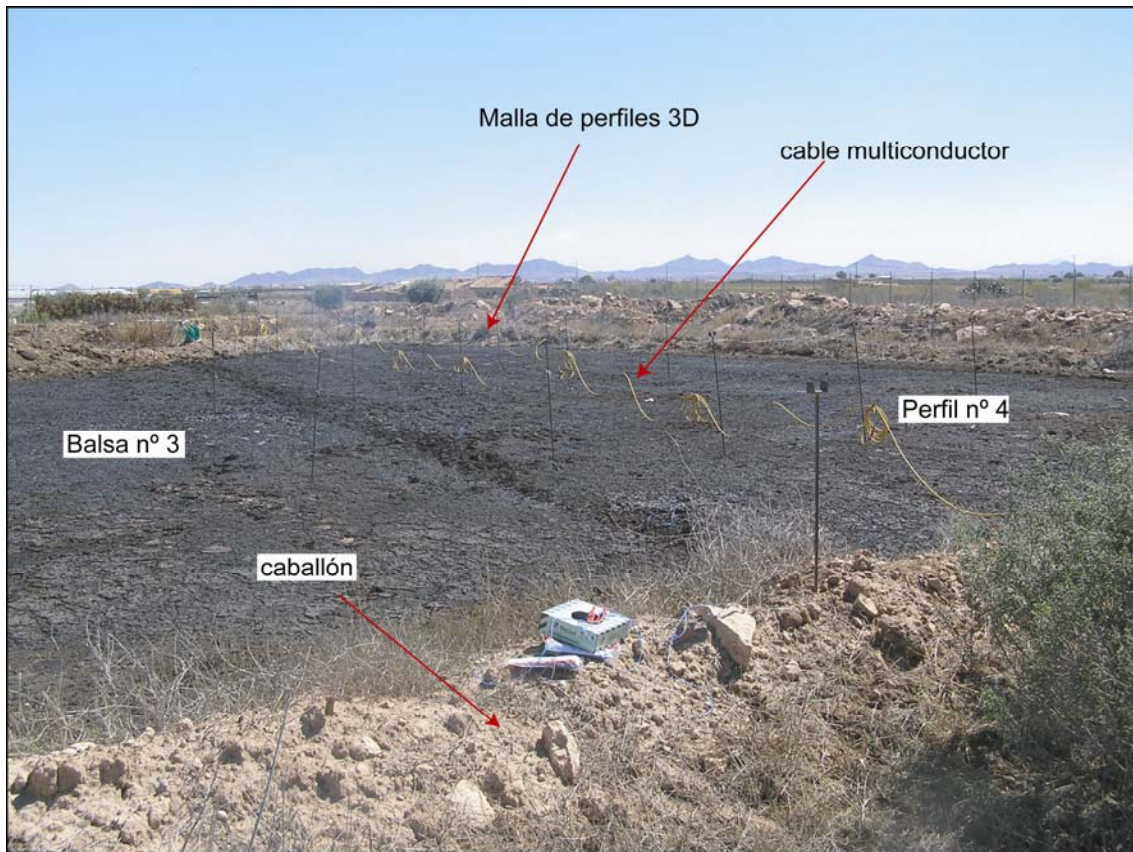


Foto 6. 41. Instalación para tomografía eléctrica 3D orientada a electrodo nº 1.

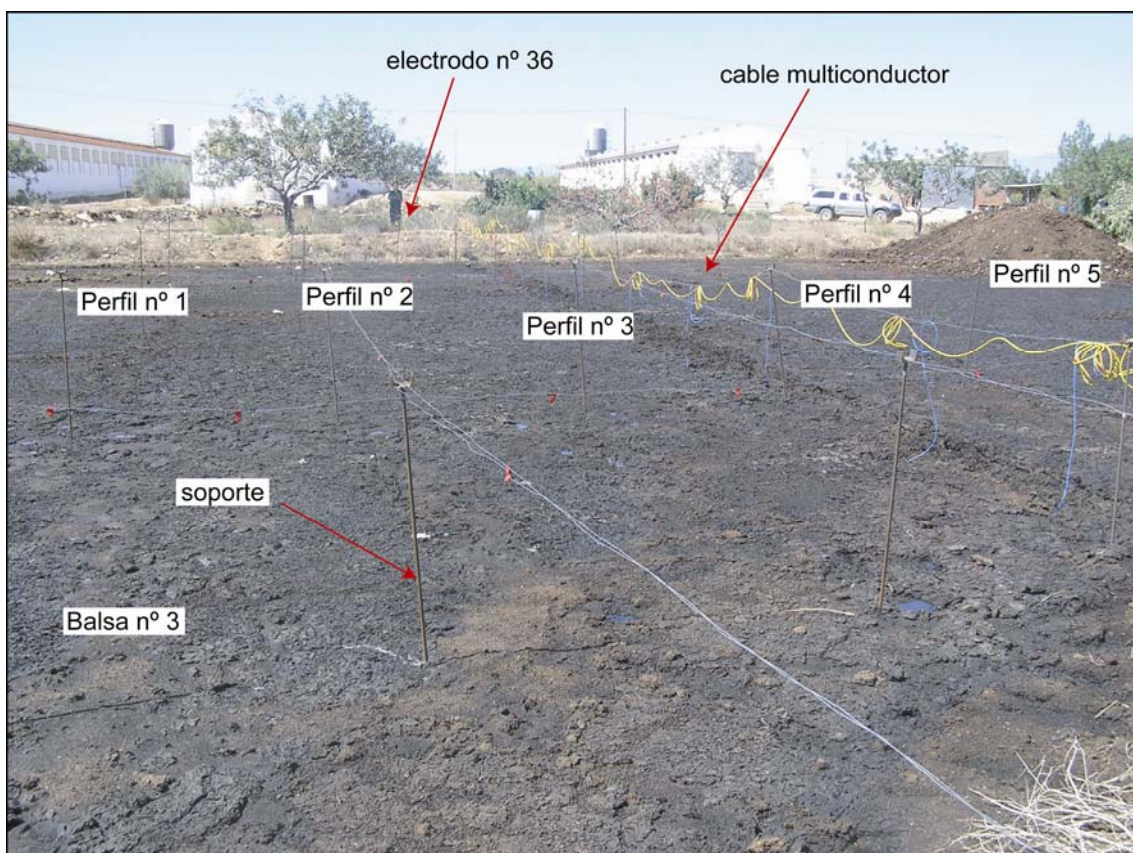


Foto 6. 42. Instalación para tomografía eléctrica 3D orientada a electrodo nº 36.

El procesamiento de los valores eléctricos medidos sobre el terreno se realizó con el programa RES3DINV de Geotomo. Posteriormente a la corrección topográfica y al proceso de inversión 3D se generó un bloque 3D de resistividades reales el cual se ha manejado a través del programa SLICER DICER de Pixotec para la obtención de los diferentes volúmenes de material obtenidos en la inversión según su resistividad eléctrica (Figura 6.80).

Desde la Figura 6.80 hasta la Figura 6.83 podemos ver diferentes vistas 3D obtenidas con la tomografía eléctrica 3D, en las que se pone de manifiesto la idoneidad de esta técnica para el estudio volumétrico de regiones someras afectadas por balsas de purines, puesto que caracteriza resistivamente la región investigada con adecuada resolución y corrobora la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D.

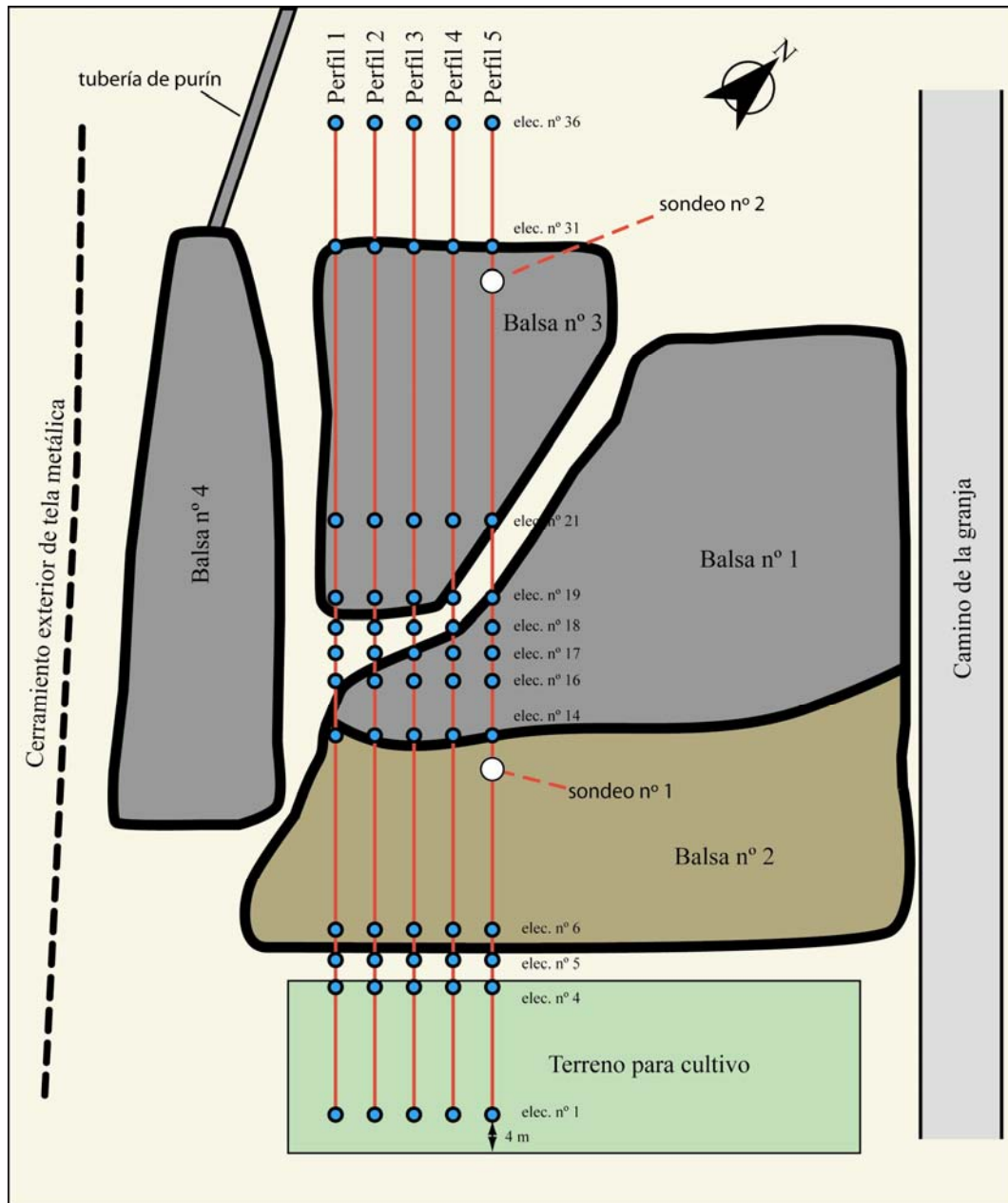
El rango de valores de resistividad eléctrica está representado en forma logarítmica decimal, así según la escala un valor de 0,7 corresponde a 5,01 ohm·m, un valor de 1,2 corresponde a 15,85 ohm·m, un valor de 2,2 corresponde a 158,50 ohm·m y, así sucesivamente.

Sobre el bloque 3D obtenido con la tomografía eléctrica 3D (Figura 6.80) se ha indicado la posición exacta de los electrodos para los diferentes perfiles geoelectrónicos (Figura 6.79) y la posición de los brocales de los sondeos realizados. Es interesante ver como el bloque ha marcado los límites de la región afectada por el purín almacenado en las balsas nº 1 y nº 3, que se extienden hasta unos 8 metros bajo las balsas (Figura 6.81). Es lógico pensar que esta afección será principalmente motivada por el agua embalsada. Se han señalado varias regiones en el bloque que destacan por sus valores de resistividad eléctrica, la región A y la región B son los materiales formados por arenas y gravas sin saturar, que aparecían en la seudosecciones comentadas anteriormente, mostrando una interrupción entre ellas justo debajo de las balsas con purín y que señalaría una posible afección del purín por la humedad pero sin llegar a ser importante; gracias al bloque 3D se puede ver que estas regiones tienen extensión lateral con lo que demuestran que la filtración del purín queda mayoritariamente contenida a unos pocos metros de profundidad (Figura 6.83). La región C señala la posición del material formado por arcilla con algo de arena detectado en el sondeo nº 1 y es la región donde se acumularían las sales debidas a la actividad de la balsa nº 2 que en este caso se encuentra vacía.

Es interesante ver la similitud del bloque geoelectrico 3D de la Figura 6.80, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de septiembre de 2005, y la pseudosección geoelectrica 2D de la Figura 6.76, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de abril de 2005 durante la cual las balsas se encontraban en la misma situación de llenado (Figura 6.75 y Figura 6.79). Esto confirma la bondad de las medidas efectuadas y el procesamiento de los datos efectuado a posteriori.

En la Figura 6.82 se señalan unas zonas resistivas en superficie correspondientes a los caballones que se construyen con material suelto proveniente del vaso de la balsa y que aunque recibe algún grado de compactación para evitar el progreso lateral del purín sin embargo no deja de ser un material ligeramente consolidado.

La tomografía eléctrica 3D ha resuelto bastante bien la zonificación bajo las balsas de purín, mostrando realmente la zona afectada por las balsas que no deja de ser somera (Figura 6.81). Existe una zona en la esquina inferior izquierda del bloque 3D con unos valores de resistividad eléctrica por debajo 5 ohm-m ( $\log_{10}\rho = 0,7$ ) y que no se trataría de una filtración lateral de la balsa nº 3 sino más bien de acumulaciones de arcilla que ya comienzan a ser detectadas por la tomografía eléctrica. El descartar una migración desde la balsa de purín hacia esa zona lo corrobora la región A que actúa como indicador del paso de posible agua salina.



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
 Granja porcina (Fuente-Álamo)  
 Septiembre 2005  
 Separación interelectrónica = 2.5 metros  
 Distancia entre perfiles = 2 metros

LEYENDA	
	Balsa sin purín
	Purín

Figura 6. 79. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y los sondeos mecánicos sobre el grupo de balsas de purines de Fuente-Álamo (Murcia).

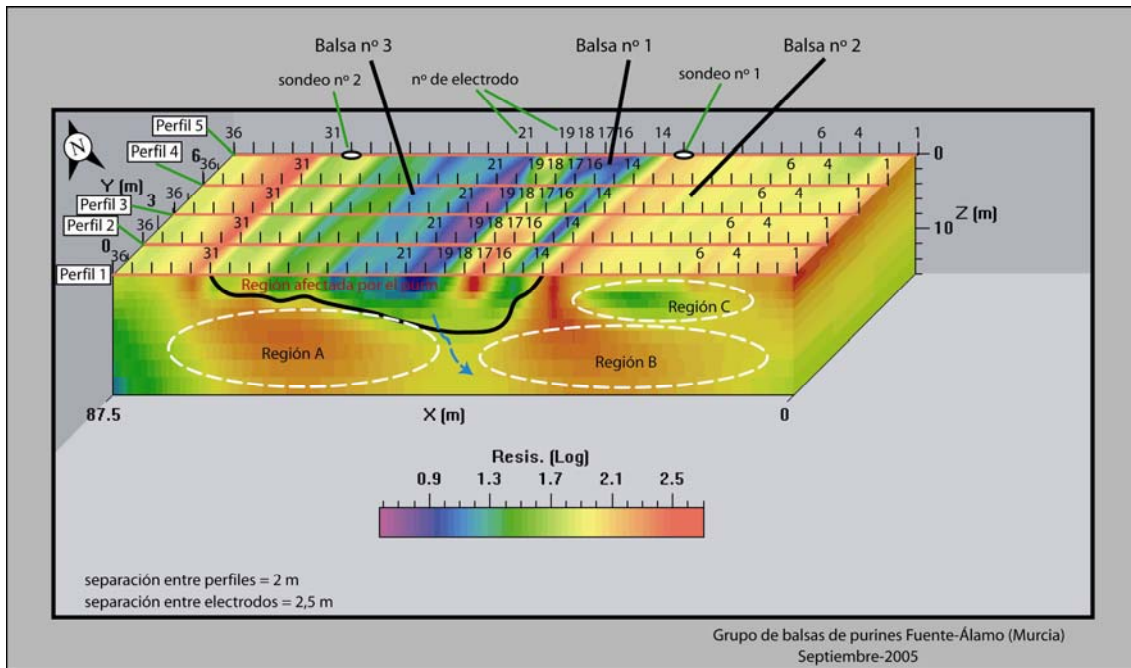


Figura 6. 80. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado y ubicación del sondeo mecánico.

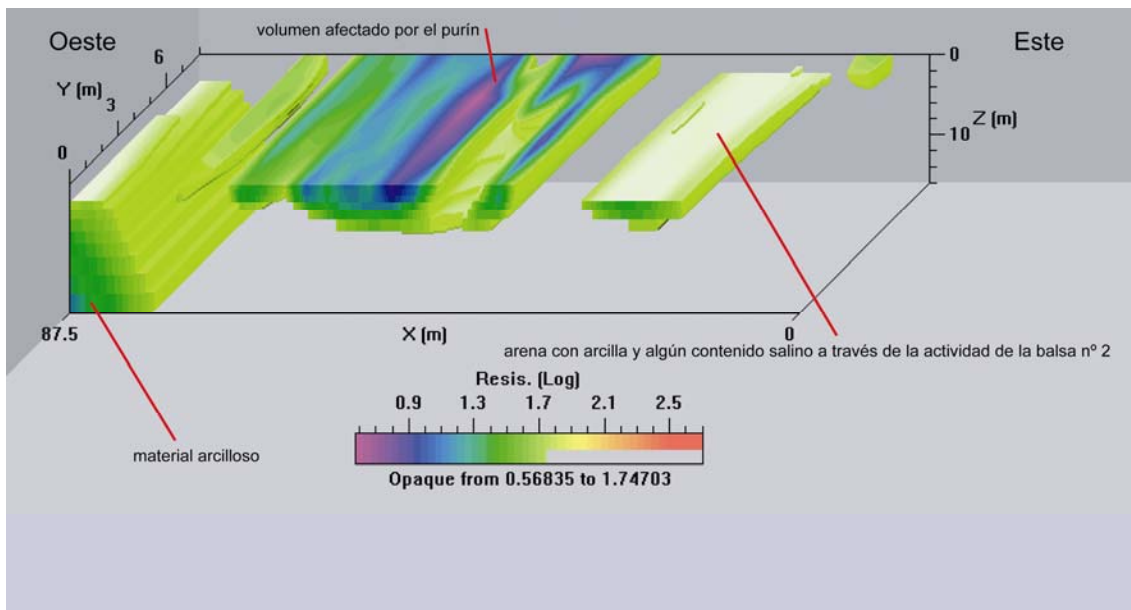


Figura 6. 81. Vista 3D orientada hacia el Oeste de la zonificación del depósito "Brunita" en función de los valores de resistividad eléctrica.



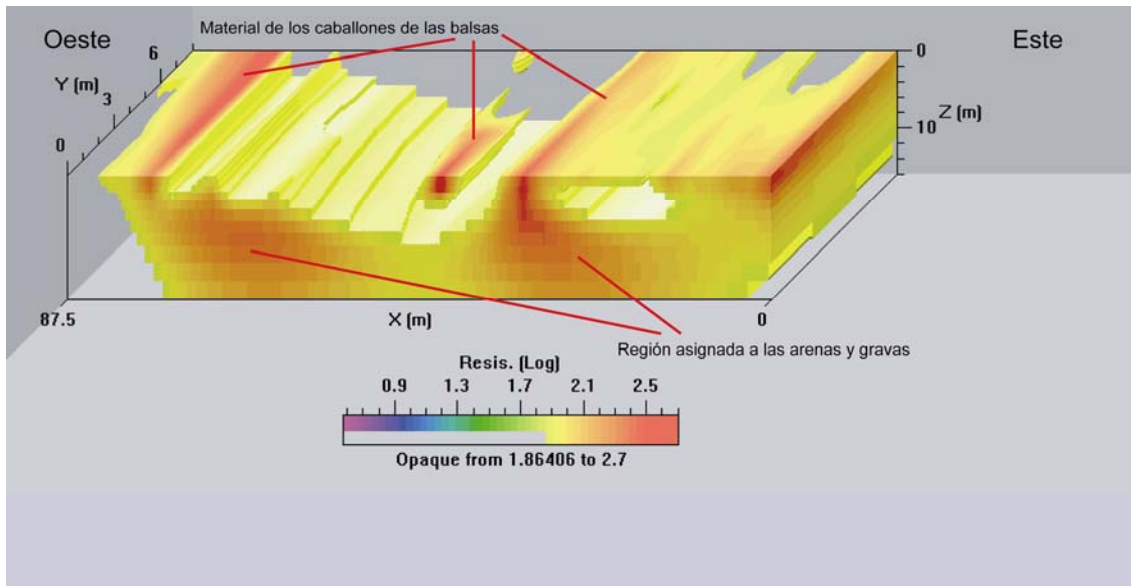


Figura 6. 82. Vista 3D orientada hacia el Este de la zonificación del depósito "Brunita" en función de los valores de resistividad eléctrica.

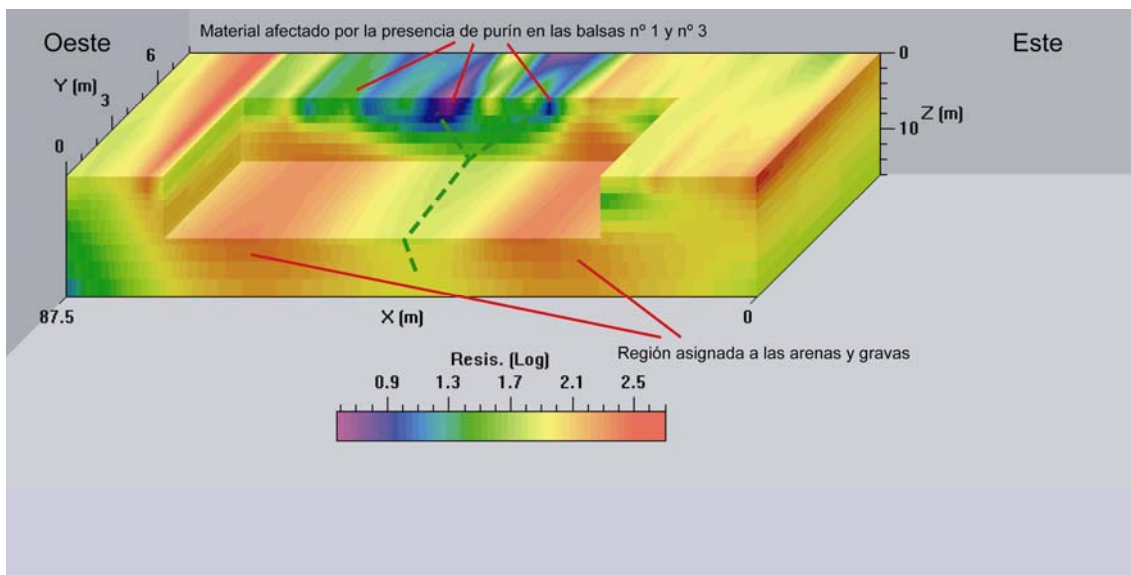


Figura 6. 83. Sección del bloque 3D donde se aprecia el espesor del material depositado.

La tomografía eléctrica 3D (Figura 6.83) ha demostrado ser una técnica importante para establecer la relación existente entre los diferentes horizontes litológicos y la acumulación del purín, que gracias a su fuerte contraste resistivo lo delimita de forma precisa y marcando posibles vías por donde el agua salina puede penetrar en las formaciones geológicas.

### 6.3.3 Sondeos mecánicos

Se ejecutaron dos sondeos mecánicos con tubería de 101 mm de diámetro hasta completar un total de 15 metros de longitud en cada uno (Foto 6.43).

Gracias a la realización de estos sondeos fue posible obtener los testigos continuos hasta los 15 metros de profundidad, depositándolos sobre cajas porta-testigos para facilitar la columna litológica atravesada por la corona de corte. Además, posteriormente estos testigos sirvieron para obtener muestras cada metro de profundidad y ser sometidas a ensayos de texturas empleando la pipeta de Robinson (ver Apartado 2.2.3). En las Figuras 6.84 y 6.86 se presentan los resultados de los análisis de texturas para ambos sondeos mecánicos.

Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Sondeo Mecánico n° 1 columna litológica Balsa n° 2
0	7,5	7,5	43,9	31,4	24,7	Franco	arena, costras calcáreas 0,7 m
1	7,7	7,6	49,0	28,4	22,6	Franco	
2	7,7	7,6	11,0	59,7	29,4	Franco Arcilloso	arena con arcilla 1,3 m
3	8,1	7,5	16,0	53,8	30,3	Franco Arcilloso	arcilla con arena
4	8,2	7,4	11,0	59,2	29,8	Franco Arcilloso	
5	8,3	7,4	15,0	52,7	32,3	Franco Arcilloso	
6	8,3	7,4	27,0	50,6	22,5	Franco Limoso	
7	8,4	7,0	42,0	36,4	21,6	Franco	
8	8,5	7,5	48,0	32,9	19,2	Franco	arena con gravas 7,8 m
9	8,4	7,4	37,0	40,5	22,5	Franco	arcilla con arena
10	8,6	7,4	41,0	35,7	23,4	Franco	
11	8,6	7,2	42,0	36,4	21,7	Franco	
12	8,8	7,4	43,0	38,7	18,4	Franco	
13	8,4	7,0	33,0	39,3	27,7	Franco	
14	8,6	7,4	27,9	45,1	27,0	Franco	
15	8,5	7,4	32,0	46,6	21,4	Franco	

Figura 6. 84. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo n° 1 analizadas, junto con la columna litológica atravesada.

### 6.3.3.1 Sondeo nº 1

Este sondeo se realizó en el interior de la balsa de purines nº 2 del grupo de Fuente-Álamo (Murcia). Esta balsa había sido recientemente vaciada del residuo sólido del purín para ser usado como fertilizante agrícola (Foto 6.43); por el contrario la balsa nº 1 se encontraba con purín. La máquina de sondeos se posicionó próxima al caballón que separa la balsa nº 1 de la balsa nº 2. Durante la ejecución del sondeo se fue añadiendo agua para facilitar la perforación a rotación, de ahí la humedad en los testigos obtenidos (Figura 6.85).

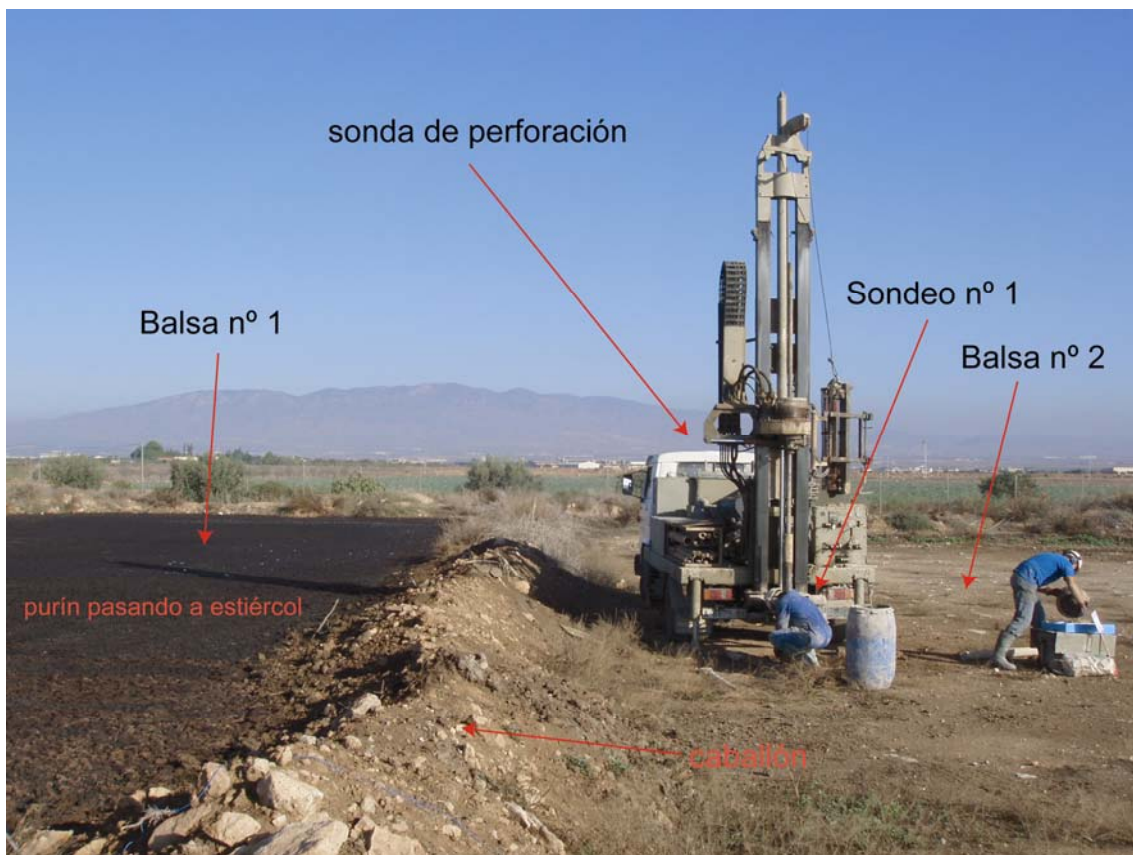


Foto 6. 43. Vista de la posición del sondeo mecánico nº 1 en la balsa nº 2.

En la Figura 6.84 se muestran los resultados obtenidos de pH y de textura; además se ha incluido la columna litológica, levantada durante la realización del sondeo, para comparar los diferentes horizontes obtenidos y analizar las dispersiones propias de la subjetividad del sondista. Las clases texturales se han basado en el empleo del triángulo de texturas (Figura 6.88).

En la Figura 6.84 se han sombreado, empleando diferentes colores, aquellas filas de la tabla que tienen en común alguna propiedad textural destacable, señaladas por las elipses de trazo blanco. Al hacer esto se han simplificado los horizontes litológicos en cuatro, al igual que nos proporcionaba la tomografía eléctrica; un primer horizonte en el que predomina el caliche o costras calcáreas, un segundo horizonte formado por arena arcillosa o viceversa, según los porcentajes de texturas; un tercer horizonte con predominio de la arena y algún porcentaje de gravas y finalmente un horizonte con claro predominio de la arcilla con presencia de granulometría arenosa.

Observando la Figura 6.84 se aprecia la dispersión, comentada anteriormente, entre la columna litológica levantada por el perforista *in situ* y la columna litológica basada en la clase textural. Se puede afirmar que son más precisos los resultados obtenidos a través de los análisis de texturas que los datos proporcionados visualmente en los que la componente subjetiva forma parte de manera importante. No obstante, lo principal es que a grandes rasgos, los horizontes litológicos están de acuerdo con los obtenidos en el análisis textural y éstos pueden dar respuesta a los horizontes geoelectrónicos obtenidos con la geofísica.



Figura 6. 85. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo n° 1.

### 6.3.3.2 Sondeo n° 2

Este sondeo, denominado sondeo n° 2, se realizó en el interior de la balsa n° 3, en la cual aún existía purín líquido, pero en pequeñas proporciones, pues su mayor parte ya se estaba desecando transformándose en estiércol, nombre que asigna al residuo sólido (Foto 6.45).

Previamente a la realización del sondeo, se realizó una limpieza del suelo con un tractor para evitar que las diferentes herramientas y elementos de la máquina de perforación se manchasen, además de evitar contaminación de las muestras profundas por purín (Foto 6.44).



Foto 6. 44. Tractor realizando la limpieza del purín en la balsa n° 3.



Foto 6. 45. Vista de la posición del sondeo mecánico n° 2 en la balsa n° 3.

En la Figura 6.86 se presentan los porcentajes de arena, limo y arcilla de las muestras del sondeo analizadas, su clase textural y la comparación con la columna litológica levantada durante la realización del sondeo. Al igual que en el caso anterior se han sombreado con colores las filas que tienen en común algún porcentaje destacable de arena o arcilla. Realizando esto surgen básicamente cuatro horizontes importantes, no considerando el suelo vegetal, que están en sintonía con los obtenidos en el sondeo n° 1 y diferenciándose sólo en las profundidades asignadas para los cambios de litología. Esta vez existe una mayor correlación entre la columna litológica, levantada durante la perforación, y la obtenida a través de los ensayos de textura.

Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Sondeo Mecánico n° 2 columna litológica Balsa n° 3
0	7,3	7,0	27,9	48,5	23,6	Franco Limoso	suelo vegetal 0,3 m
1	7,6	7,2	42,9	35,4	21,7	Franco	arena, costras calcáreas 1,3 m
2	8,0	7,3	26,9	52,4	20,8	Franco Limoso	
3	8,2	7,2	15,0	59,5	25,5	Franco Limoso	arena con arcilla 5,7 m
4	8,3	7,3	12,0	61,3	26,7	Franco Limoso	
5	8,4	7,3	36,9	46,0	17,1	Franco	
6	8,3	7,5	50,8	38,4	10,8	Franco	arena con gravas 8,4 m
7	8,6	7,5	74,9	19,5	5,6	Franco Arenoso	
8	8,7	7,5	59,6	32,7	7,6	Franco Arenoso	
9	8,6	7,5	57,5	32,2	10,3	Franco Arenoso	arcilla con arena 15,0 m
10	8,6	7,4	22,0	50,2	27,9	Franco Limoso	
11	8,3	7,2	25,0	44,0	31,1	Franco Arcilloso	
12	8,4	7,5	36,9	41,2	21,8	Franco	
13	8,1	7,3	24,0	52,2	23,8	Franco Limoso	
14	8,2	7,2	16,9	53,1	29,9	Franco Arcilloso	
15	8,4	7,5	27,0	48,4	24,6	Franco	

Figura 6. 86. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo n° 2 analizadas, junto con la columna litológica atravesada.

Es interesante ver como en la Figura 6.71, que muestra una pseudosección geoelectrica en la cual se ha colocado los resultados de la Figura 6.84 y de la Figura 6.86, existe una importante correlación entre los resultados texturales y los resultados geoelectricos, principalmente.



Figura 6. 87. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo nº 2.





Figura 6. 88. Triángulo de texturas.

### 6.3.4 Análisis geoquímico

#### **Conductividad eléctrica de las muestras de los sondeos**

Se aprovecharon las muestras obtenidas cada metro de profundidad de los sondeos para ser sometidas a análisis de conductividad eléctrica. Los sondeos mecánicos se realizaron en octubre de 2005 y, en ese periodo la balsa n° 2, sobre la que se ejecutó el sondeo mecánico n° 1, se encontraba vacía de purín; por otro lado, la balsa n° 3, sobre la que se ejecutó el sondeo mecánico n° 2, se encontraba con una delgada capa de estiércol sobre su superficie que fue retirada para proceder a la ejecución del

sondeo y evitar la contaminación de las muestras y de las herramientas de perforación (Foto 6.44 y Foto 6.45).

Sondeo N° 1 Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Conductividad Eléctrica dS/m
0	7,5	7,5	43,9	31,4	24,7	Franco	5,98
1	7,7	7,6	49,0	28,4	22,6	Franco	3,97
2	7,7	7,6	11,0	59,7	29,4	Franco Arcilloso	3,16
3	8,1	7,5	16,0	53,8	30,3	Franco Arcilloso	0,874
4	8,2	7,4	11,0	59,2	29,8	Franco Arcilloso	0,534
5	8,3	7,4	15,0	52,7	32,3	Franco Arcilloso	0,377
6	8,3	7,4	27,0	50,6	22,5	Franco Limoso	0,528
7	8,4	7,0	42,0	36,4	21,6	Franco	0,516
8	8,5	7,5	48,0	32,9	19,2	Franco	0,459
9	8,4	7,4	37,0	40,5	22,5	Franco	0,1811
10	8,6	7,4	41,0	35,7	23,4	Franco	0,439
11	8,6	7,2	42,0	36,4	21,7	Franco	0,484
12	8,8	7,4	43,0	38,7	18,4	Franco	0,395
13	8,4	7,0	33,0	39,3	27,7	Franco	0,443
14	8,6	7,4	27,9	45,1	27,0	Franco	0,442
15	8,5	7,4	32,0	46,6	21,4	Franco	0,597

Figura 6. 89. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo n° 1.

Observando y analizando la columna de conductividad eléctrica de la Figura 6.89 y de la Figura 6.90 se puede extraer que los valores de conductividad eléctrica superficiales que destacan respecto al resto del sondeo, se deben a la presencia de sales en el suelo como motivo de la actividad de las balsas. Es significativo como los valores de conductividad eléctrica superficiales del sondeo n° 2 son superiores a los valores superficiales del sondeo n° 1 puesto que ese momento sobre la superficie de la balsa n° 3 había estiércol y purín en fase de desecación sin retirar. No obstante, según el análisis de las muestras, en ambos sondeos mecánicos a partir del segundo metro de profundidad cae bruscamente el valor de la conductividad eléctrica, indicando dos aspectos importantes, por un lado la no progresión salina del purín en profundidad y por

otro un cambio textural, que en el sondeo mecánico n° 1 es con predominio de la textura arcillosa y en el sondeo mecánico n° 2 de la textura limosa.

Esta caída del valor de la conductividad eléctrica ( $< 1,0$  dS/m) se mantiene uniforme a lo largo del sondeo mecánico n° 1 hasta los 15 metros, indicando una importante presencia de arenas y gravas y una disminución de la arcilla y mostrando que la penetración de las sales del purín es poco significativa. En el sondeo mecánico n° 2 esta caída del valor de la conductividad se mantiene hasta los 11 metros de profundidad; a partir de ahí comienza a aumentar progresivamente indicando la aparición de un incremento en el porcentaje de arcillas contenidas en la muestra. Esta presencia de arcilla también ha sido detectada a través de los diferentes perfiles de tomografía eléctrica realizados (Figura 6.91).

Sondeo N° 2 Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Conductividad Eléctrica dS/m
0	7,3	7,0	27,9	48,5	23,6	Franco Limoso	13,68
1	7,6	7,2	42,9	35,4	21,7	Franco	3,99
2	8,0	7,3	26,9	52,4	20,8	Franco Limoso	1,468
3	8,2	7,2	15,0	59,5	25,5	Franco Limoso	0,855
4	8,3	7,3	12,0	61,3	26,7	Franco Limoso	0,712
5	8,4	7,3	36,9	46,0	17,1	Franco	0,55
6	8,3	7,5	50,8	38,4	10,8	Franco	0,702
7	8,6	7,5	74,9	19,5	5,6	Franco Arenoso	0,834
8	8,7	7,5	59,6	32,7	7,6	Franco Arenoso	0,869
9	8,6	7,5	57,5	32,2	10,3	Franco Arenoso	0,807
10	8,6	7,4	22,0	50,2	27,9	Franco Limoso	0,649
11	8,3	7,2	25,0	44,0	31,1	Franco Arcilloso	0,813
12	8,4	7,5	36,9	41,2	21,8	Franco	1,478
13	8,1	7,3	24,0	52,2	23,8	Franco Limoso	1,973
14	8,2	7,2	16,9	53,1	29,9	Franco Arcilloso	1,691
15	8,4	7,5	27,0	48,4	24,6	Franco	2,06

Figura 6. 90. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo n° 2.

Los análisis de texturas están en sintonía con los resultados de conductividad eléctrica puesto que ambos detectan un incremento en el porcentaje de arcillas contenidas a profundidades más superficiales para el sondeo mecánico nº 2 que para el sondeo mecánico nº 1 en el cual este contenido comenzaría a aumentar a una mayor profundidad. Es destacable también como esta coincidencia se repite con la tomografía eléctrica (Figura 6.91) al colocar los resultados de los sondeos mecánicos sobre la seudosección geoelectrica obtenida bajo condiciones similares a las encontradas durante la realización de los sondeos mecánicos (octubre de 2004 y octubre de 2005). Se puede observar como la región de las arenas y las gravas de la seudosección geoelectrica de la Figura 6.91 bajo el sondeo mecánico nº 2 proporciona mayores valores de resistividad eléctrica que la región situada bajo el sondeo mecánico nº 1, indicando en aquella región un mayor predominio de las arenas y gravas; extremo que ha sido corroborado por el análisis textural con un mayor contenido de arenas para el sondeo mecánico nº 2.

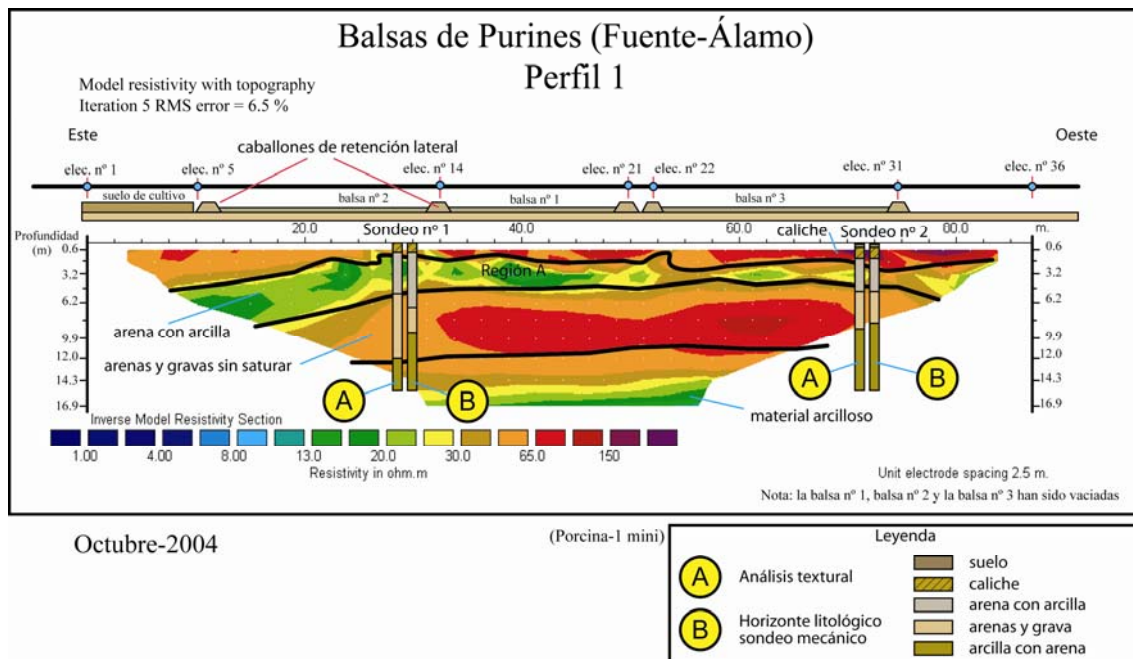


Figura 6. 91. Horizontes litológicos principales en el grupo de balsas de purines.

### 6.3.5 Discusión de los resultados del grupo de Fuente-Álamo

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D han permitido extraer los análisis que a continuación desglosamos.

- Los resultados de la tomografía eléctrica 2D y de la tomografía eléctrica 3D han identificado adecuadamente los principales horizontes litológicos que han sido

cotejados por los análisis de texturas y por los testigos continuos. Esto ha permitido asignarle a cada capa de material un rango de valores de resistividad eléctrica (Martínez-Pagán *et al.*, 2005b).

- Las seudosecciones geoelectricas 2D y el bloque 3D geoelectrico han delimitado de forma adecuada la región del subsuelo afectada por la humedad y las sales del purín cuando éste se encuentra almacenado en las balsas durante tiempo prolongado para su desecación y ser aprovechado como fertilizante agrícola en fase sólida. Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D han obtenido una región afectada que en la mayoría de los casos no alcanza el horizonte arcilloso que se encuentra a partir de los 12 metros de profundidad, si bien, vías por las cuales ha penetrado la humedad hasta alcanzar el paquete de arenas y gravas pero sin una progresión posterior clara (Martínez-Pagán *et al.*, 2006).
- Las seudosecciones geoelectricas 2D y el bloque 3D geoelectrico han demostrado que durante la etapa de limpieza del estiércol, los niveles de contaminación del subsuelo tienden a remitir, puesto que la región afectada disminuye quedando zonas fósiles de humedad o de contenidos salinos y donde en superficie comienza de nuevo a aumentar los valores de resistividad por la presencia de las costras calizas y la desaparición de la humedad; hay que tener en cuenta que estamos en una región con un clima semiárido donde la desecación de las balsas es muy rápida.
- Los resultados obtenidos para los perfiles de tomografía eléctrica exteriores a las balsas han dado regiones laterales del subsuelo, próximas a las balsas, afectadas por el purín que en muy pocos casos presentan una penetración en profundidad importante y que en cualquier caso existe una capa impermeable natural formada por arcillas a partir de los 12 metros de profundidad, que ha sido corroborada por los sondeos mecánicos.
- Los análisis de conductividad eléctrica realizados a las muestras de los sondeos mecánicos han permitido determinar el grado de filtración del purín en el subsuelo, siendo ésta bastante somera puesto que los valores de conductividad eléctrica en ambos sondeos descienden de forma significativa a partir de los dos metros de

profundidad, corroborando de forma fiel a lo obtenido en la tomografía eléctrica efectuada durante aquellas campañas que convergían condiciones similares a las existentes durante la ejecución de los sondeos mecánicos. Por otro lado los análisis de conductividad eléctrica del sondeo nº 2 han puesto de relieve la aparición de un horizonte con predominio de arcilla a partir de los 11 metros de profundidad, situación que también se ha puesto de manifiesto con la tomografía eléctrica 2D.

#### **6.4 Balsas de purines de Lorca (Murcia)**

En el grupo de balsas de Lorca (Murcia), se siguió un procedimiento de trabajo similar al llevado a cabo en el grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia). Este grupo consta de tres balsas, dos de las cuales se encuentran contiguas y paralelas y alejadas unos 350 m de la tercera balsa (ver Figura 5.28); para facilitar su identificación, a esta última balsa se la ha denominado Lorca 1 y al grupo de dos balsas Lorca 2. Se han efectuado perfiles de tomografía eléctrica 2D a través de varias campañas de medidas. Los perfiles de tomografía eléctrica se diseñaron para que atravesaran el ancho total de las balsas y que cubriese parte de la zona exterior, de forma que será posible detectar y delimitar las filtraciones laterales al borde de las balsa; además se escogió una longitud suficiente para alcanzar profundidades de 16 metros que es una profundidad adecuada para estudiar la evolución temporal del purín en el subsuelo. La separación entre electrodos fué de 2,5 metros para obtener buenas resoluciones verticales y laterales. La adopción de las separaciones se basó en el empleo de software de modelado para observar la respuesta geoelectrica del terreno frente a diferentes diseños de perfiles como es el RES2DMOD.EXE (ver Apartado 4.1.3 y Anexo C) y en la experiencia de campo acumulada por los operadores. Se efectuaron perfiles geoelectricos exteriores a las balsas con los que poder comparar los llevados a cabo en su interior; no obstante, estos perfiles exteriores se situaron próximos al borde de las balsas.

Para estudiar la evolución temporal del purín en el subsuelo se han realizado varias campañas de medidas efectuadas entre el año 2004 y el año 2005. Durante estos años se han repetido los perfiles de tomografía eléctrica, manteniendo la misma posición y la orientación. A continuación describiremos los resultados alcanzados para cada una de las campañas efectuadas.

Para cotejar los resultados conseguidos y sus interpretaciones, además de obtener los horizontes litológicos, se realizaron dos sondeos mecánicos de 11 metros de profundidad, uno exterior al borde de la balsa Lorca 1 y otro exterior al borde de la balsa nº 2 de Lorca 2 (ver Apartado 6.3.3).

Referirse al Apartado 5.3.2 para una descripción detallada de las balsas de purines de Lorca y el tipo de suelos en el que se ubican.

### **6.4.1 Tomografía eléctrica 2D – Lorca 1**

En Lorca 1 se efectuaron dos campañas de tomografía eléctrica 2D, una durante el mes de octubre de 2004 y otra durante el mes de abril de 2005. A continuación pasamos a describir los resultados obtenidos en cada una de ellas.

#### **6.4.1.1 Campaña de octubre de 2004**

Durante esta campaña se llevaron a cabo un total de cuatro perfiles de tomografía eléctrica, dos interiores y dos exteriores, cubriendo adecuadamente la superficie del terreno afectada por este grupo de balsas (Figura 6.57). Todos los perfiles estaban constituidos por un total de 36 electrodos, separados 2,5 metros, lo que resultaba en perfiles de 87,5 metros de longitud de perfil. El dispositivo de medida empleado fue el Wenner-Schlumberger puesto que es muy adecuado para estudios de contaminación de suelos con contrastes laterales y verticales de resistividad eléctrica, siendo un buen compromiso entre el dispositivo Wenner y el dispositivo Dipolo-dipolo (ver Apartado 4.1.4).

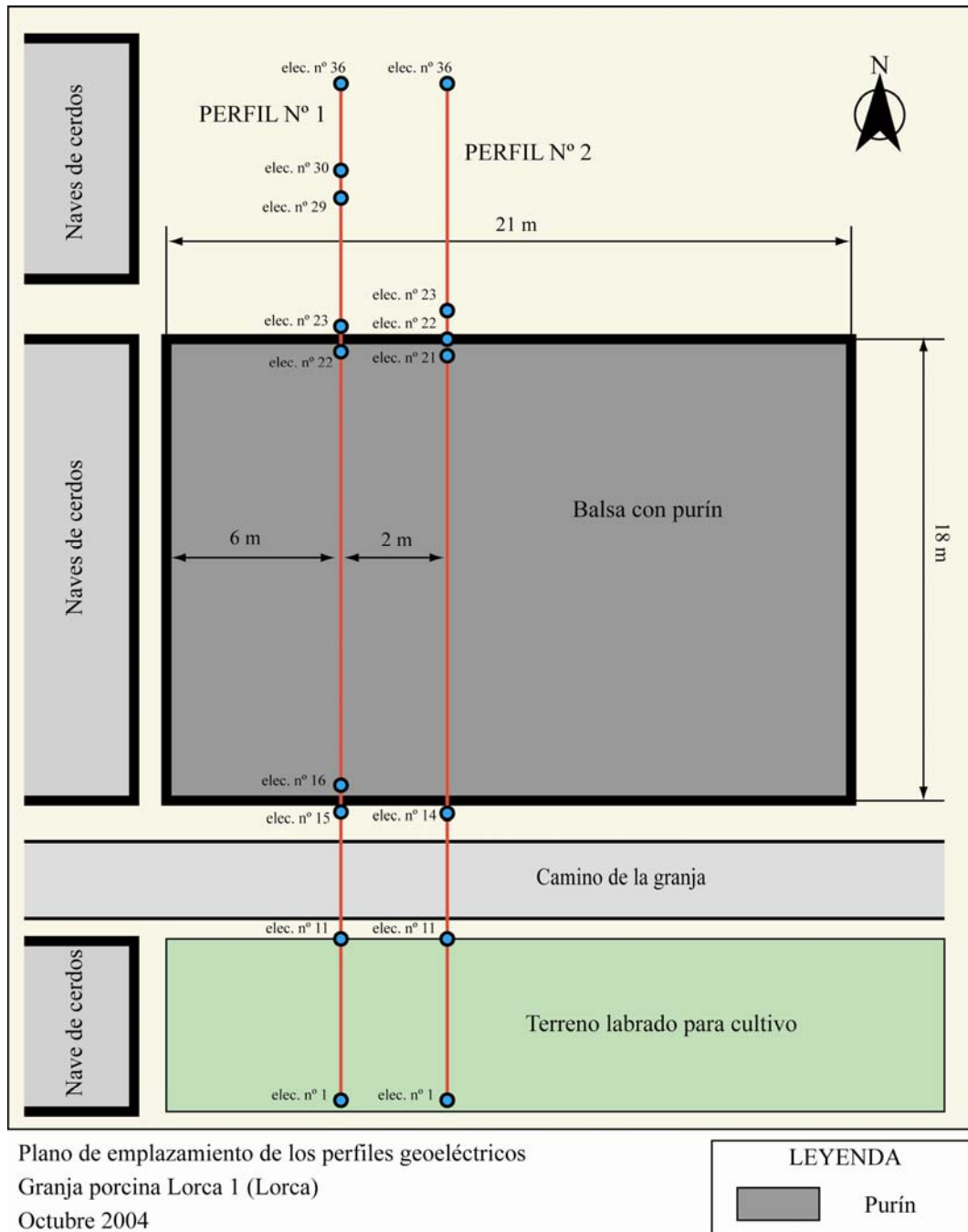


Figura 6. 92. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre la balsa de purín de Lorca 1 (octubre de 2004).

Durante esta campaña se realizaron dos perfiles interiores a la balsa de purín Lorca 1, estos perfiles se situaron paralelos con una distancia de separación de 2 metros. El perfil nº 1 se emplazó a 6 metros del borde interior de la balsa, con el objetivo de obtener datos de la zona más interna de la balsa. Para el desarrollo de las medidas hubo que instalar un sistema de soporte aéreo para evitar que los elementos de medida

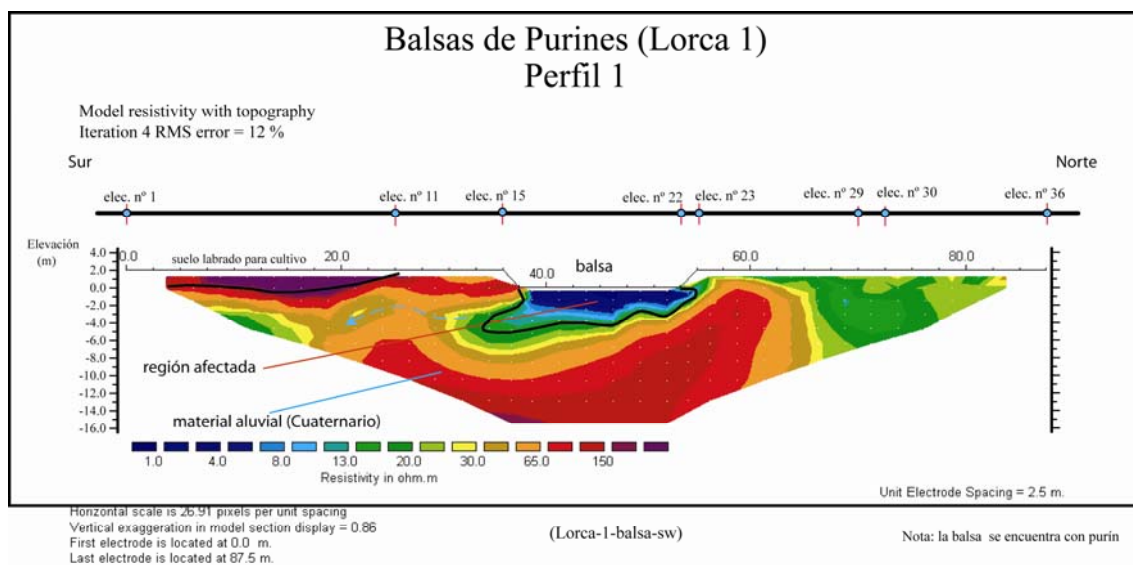


entraran en contacto con el purín, puesto que la balsa se encontraba llena de purín. Este sistema ya ha sido descrito con detalle en el Apartado 6.3.1.2 (ver Figura 6.66).

## Perfil 1

En la siguiente figura se muestra la seudosección geoelectrica obtenida para el perfil nº 1. Sobre la seudosección geoelectrica se han indicado los electrodos que limitan el ancho de la balsa (Figura 6.92). El dispositivo de medida empleado fue el Wenner-Schlumberger, muy adecuado por su sensibilidad para estudios del subsuelo con variaciones laterales y verticales de la resistividad (ver Apartado 4.1.4).

La longitud del perfil fue de 87,5 metros aproximadamente, cubriendo ampliamente el ancho de la balsa de purines. En la Foto 6.46 se puede ver el perfil nº 1 completamente instalado y listo para comenzar a medir. En la Foto 6.47 se puede apreciar la profundidad del purín embalsado bajo el perfil nº 1. La superficie del fondo de la balsa presenta una pendiente descendente hacia la parte este de la misma.



Octubre-2004

Figura 6. 93. Seudosección geoelectrica interpretada del Perfil nº 1 realizado en octubre de 2004.

La seudosección geoelectrica muestra la geometría de la balsa debido a la introducción de la corrección por topografía a los datos medidos. Es significativo observar una región del subsuelo bajo la balsa que llega a los 5 metros de profundidad donde los valores de resistividad eléctrica son muy bajos (< 8 ohm.m), indicando una

fuerte filtración de purín formada principalmente por agua con contenido salino. Además esta filtración se desplaza lateralmente hacia la izquierda de la pseudosección donde una presencia de material arcilloso a los 4 metros de profundidad obstaculizaría la progresión en vertical de la filtración, siendo facilitada esta progresión lateral por una presencia de material arenoso en los primeros metros del subsuelo. A partir del electrodo nº 26 se produce un cambio lateral de material resultando en otro de naturaleza quizás menos arenosa y con una mayor contenido en arcillas, lo que indicaría la no progresión hacia esta zona de la humedad del purín corroborado por los bajos valores de resistividad eléctrica encontrados entre el electrodo nº 29 y el electrodo nº 30.

La pseudosección geoelectrica se obtuvo con un error del 12 % que es considerado como bastante bueno.

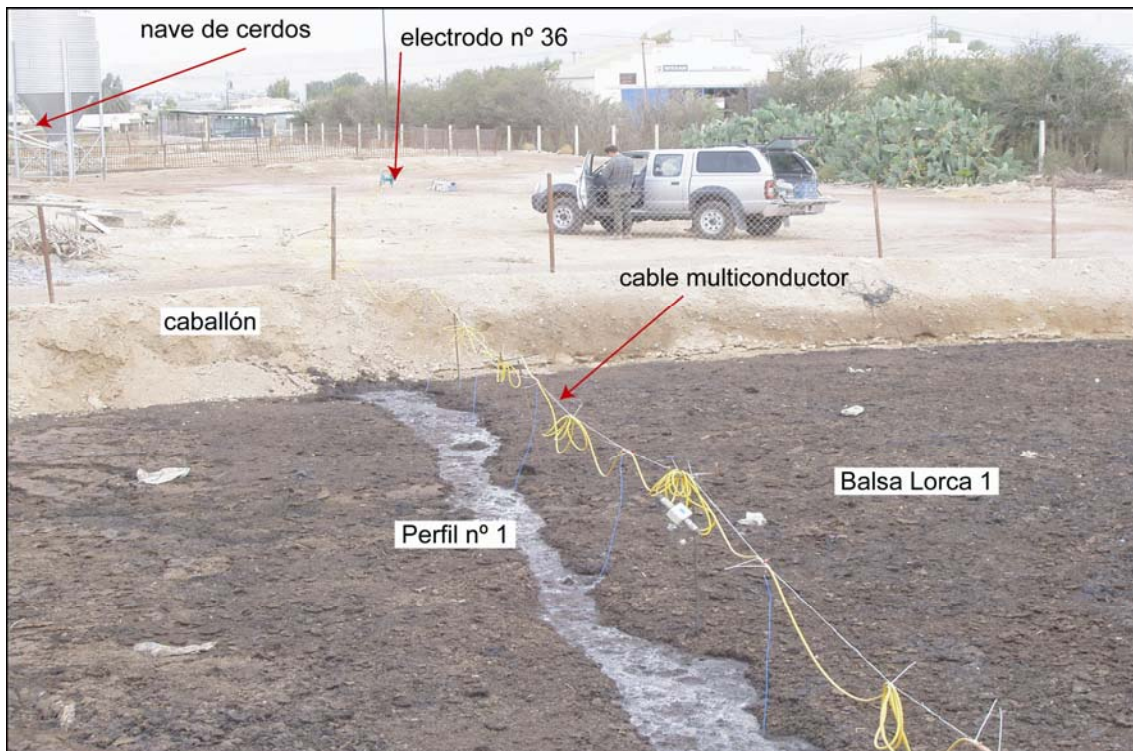


Foto 6. 46. Vista parcial del Perfil nº 1 orientada hacia electrodo nº 36.

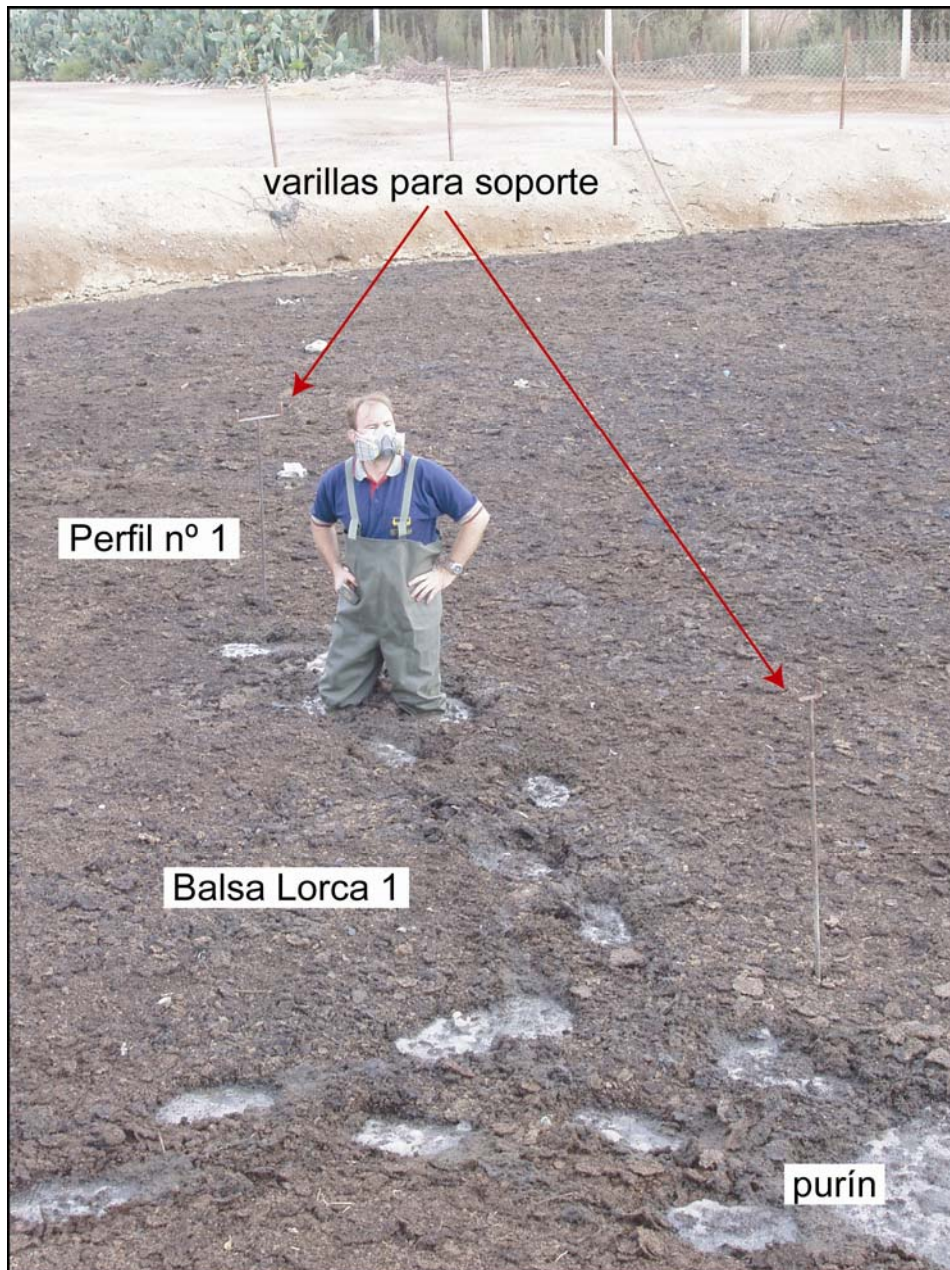
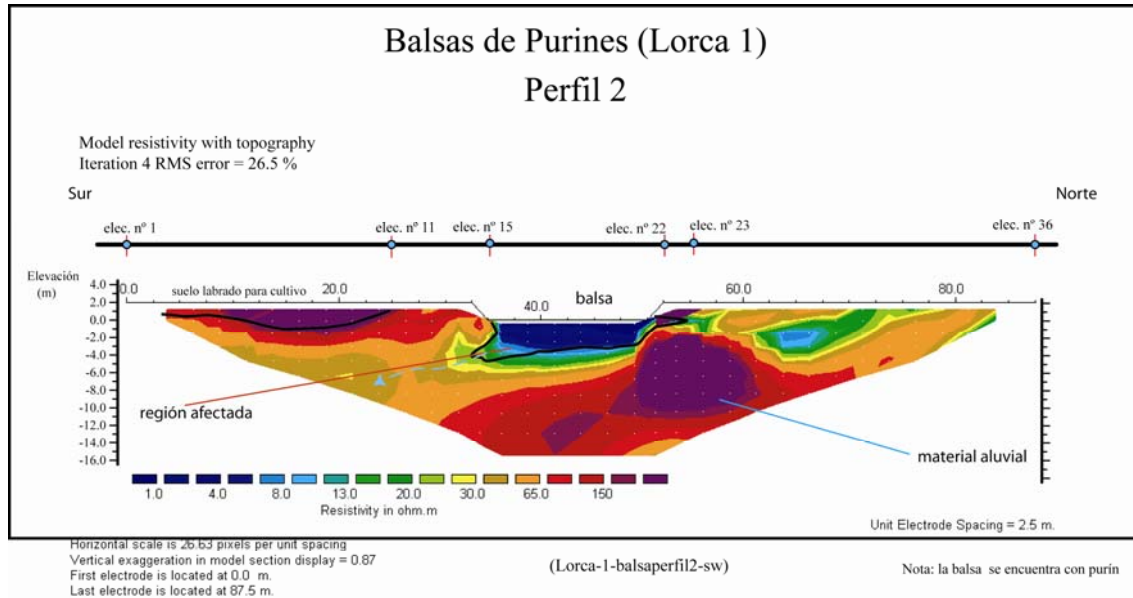


Foto 6. 47. Instalación del sistema de soporte aéreo para el Perfil nº 1.

## Perfil 2

Este perfil se instaló paralelo al perfil anterior con una separación de 2 metros. De ahí que el resultado obtenido no es muy diferente al obtenido con el perfil nº 1. Observando la pseudosección geoelectrica se aprecia que es muy similar a la comentada anteriormente. En este caso, también destacar una vía de filtración lateral hacia la izquierda de la balsa; no obstante no se manifiesta una filtración a partir de los 5 metros bajo la balsa, como ocurrió también para el perfil nº 1, pues la presencia de material arcilloso impide esta progresión vertical.

En la Foto 6.48 y en la Foto 6.49 aparece el perfil n° 2 instalado dentro de la balsa y el sistema de apoyo aéreo que sirvió para instalar el cable multiconductor sobre la balsa.



Octubre-2004

Figura 6. 94. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 2 realizado en octubre de 2004.

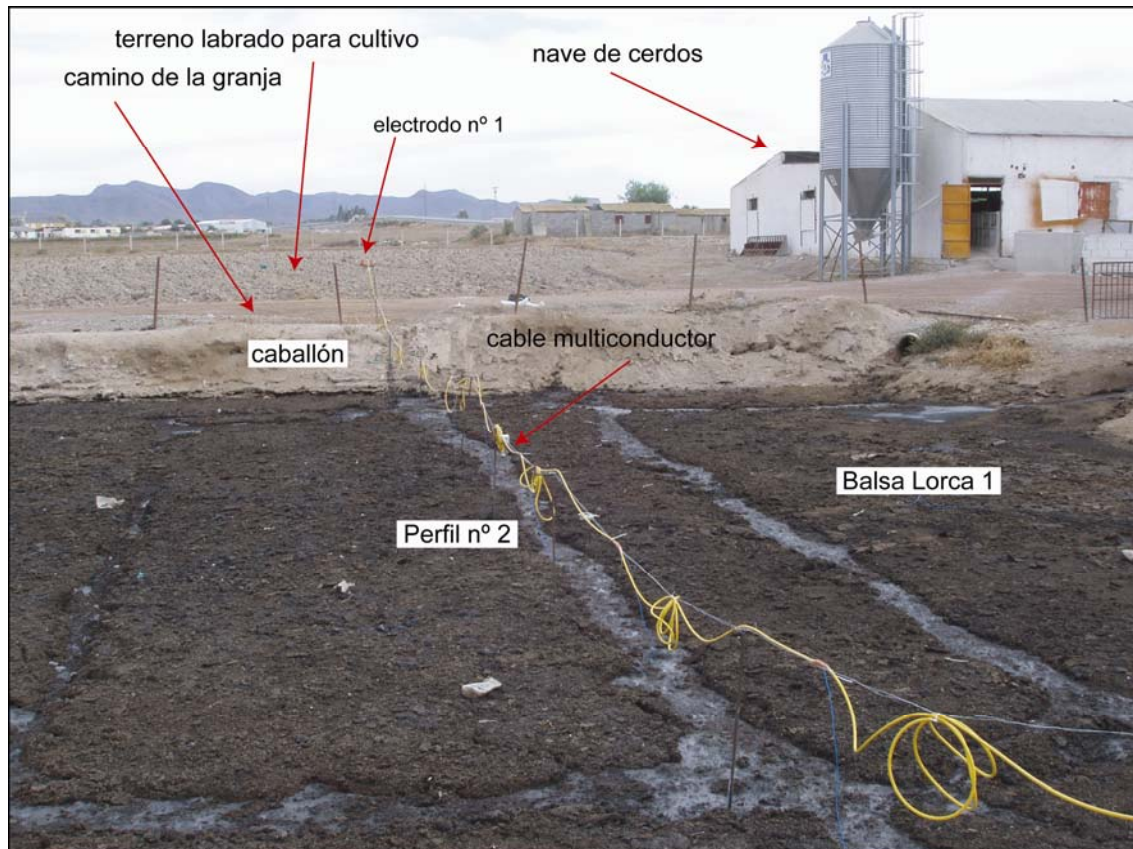


Foto 6. 48. Vista parcial del Perfil n° 2 orientada hacia electrodo n° 1.



Foto 6. 49. Vista general del Perfil nº 2 instalado dentro de la balsa Lorca 1.

#### 6.4.1.2 Campaña de abril de 2005

Durante esta campaña se realizaron nuevamente dos perfiles de tomografía eléctrica de 36 electrodos cada uno; sin embargo, el perfil nº 2 se realizó exteriormente a la balsa con el fin de comparar los valores obtenidos dentro y fuera de la balsa (Figura 6.95).

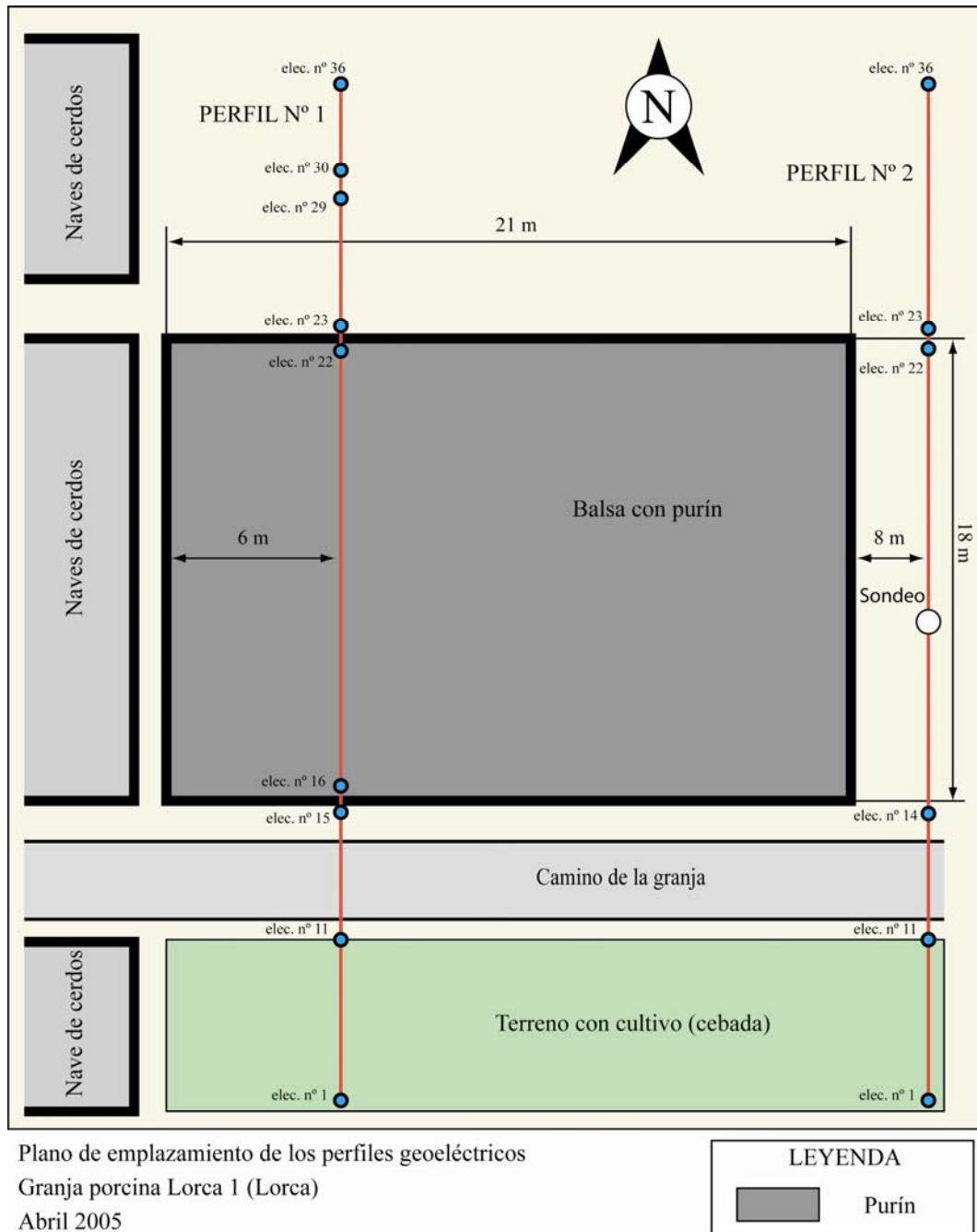
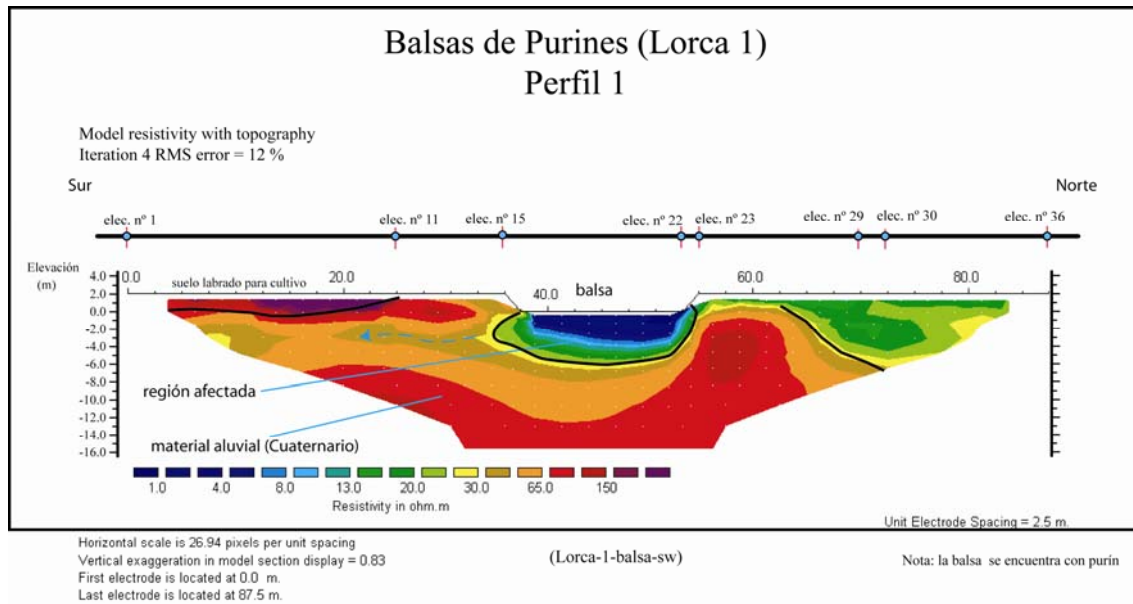


Figura 6. 95. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre la balsa de purín Lorca 1 (abril de 2005).

### Perfil 1

El perfil nº 1 fue idéntico al efectuado en octubre de 2004, por lo que los resultados de ambos perfiles son comparables de forma temporal (Foto 6.50).



Abril-2005

Figura 6. 96. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 1 realizado en abril de 2005.

Comparando la Figura 6.96 con la Figura 6.93, destaca su equivalencia, por lo que en esta campaña la información obtenida vuelve a poner de manifiesto la filtración lateral hacia la izquierda de la balsa y la no progresión en vertical del agua salina. También se vuelve a identificar el cambio lateral de material a partir del electrodo nº 26 con una mayor contenido en material de naturaleza arcillosa.



Foto 6. 50. Vista parcial del perfil nº 1 y el sistema de soporte aéreo empleado.

## Perfil 2

Este perfil se realizó exteriormente a la balsa Lorca 1 (Figura 6.95), con el fin de comparar los resultados obtenidos entre un perfil realizado dentro de una zona afectada por la balsa y por otro en una zona con una influencia menor o nula de la balsa (Foto 6.51).



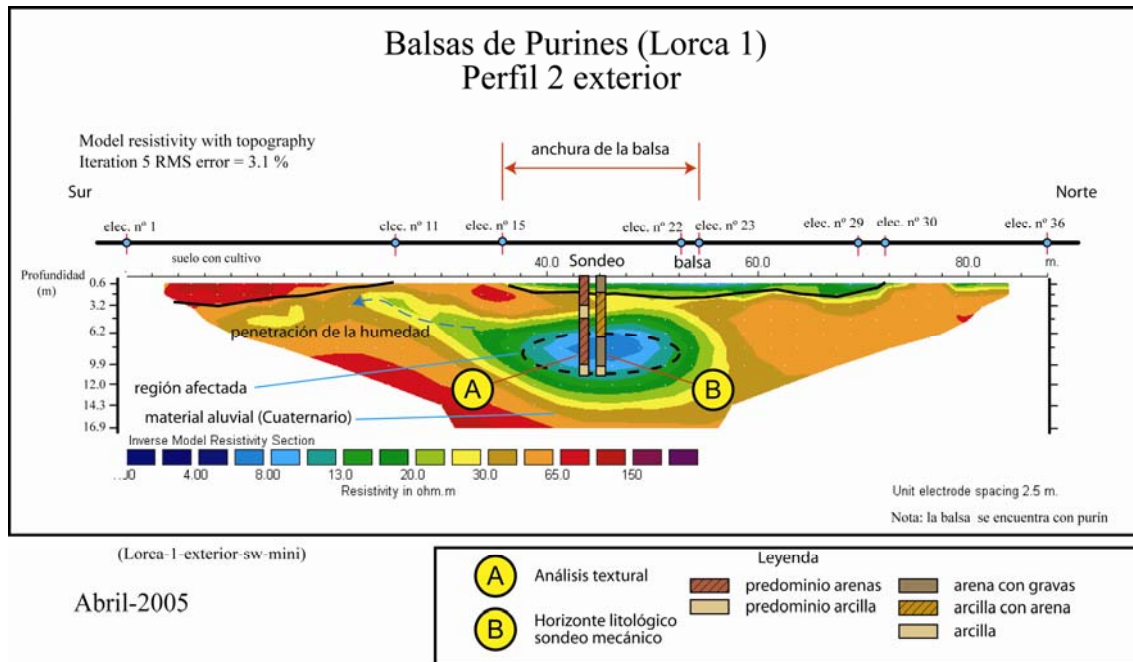


Figura 6. 97. Seudosección geoelectrónica interpretada del perfil nº 2 exterior realizado en abril de 2004.

En la seudosección geoelectrónica de la Figura 6.97 se puede observar como, a pesar de haberse situado el perfil fuera de la balsa, éste ha detectado una filtración lateral del purín a una profundidad de 10 metros, indicando una vía lateral de filtración de más importancia en esta dirección como resultado de una mayor presencia del contenido en arenas y gravas (Figura 6.97) que facilita la progresión del purín en el subsuelo por su permeabilidad. Sobre la seudosección se han insertado los resultados de los análisis de texturas de las muestras del sondeo mecánico que se realizó en octubre de 2005 sobre la traza de este perfil y, observando los horizontes arenosos presentes en el sondeo, se corrobora esta importante penetración del purín de forma lateral. No obstante la significativa concentración de valores bajos de resistividad eléctrica en la zona central de la seudosección, sería indicativo de una escasa migración de la filtración del purín en la vertical de la balsa y sólo sería importante dicha filtración hacia los laterales de la balsa.

En la Figura 6.98 se ha representado el comportamiento de la filtración del purín en el subsuelo de acuerdo a la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D, indicando los caminos preferenciales del agua salina dentro de las formaciones aluviales de arenas, gravas y arcilla.

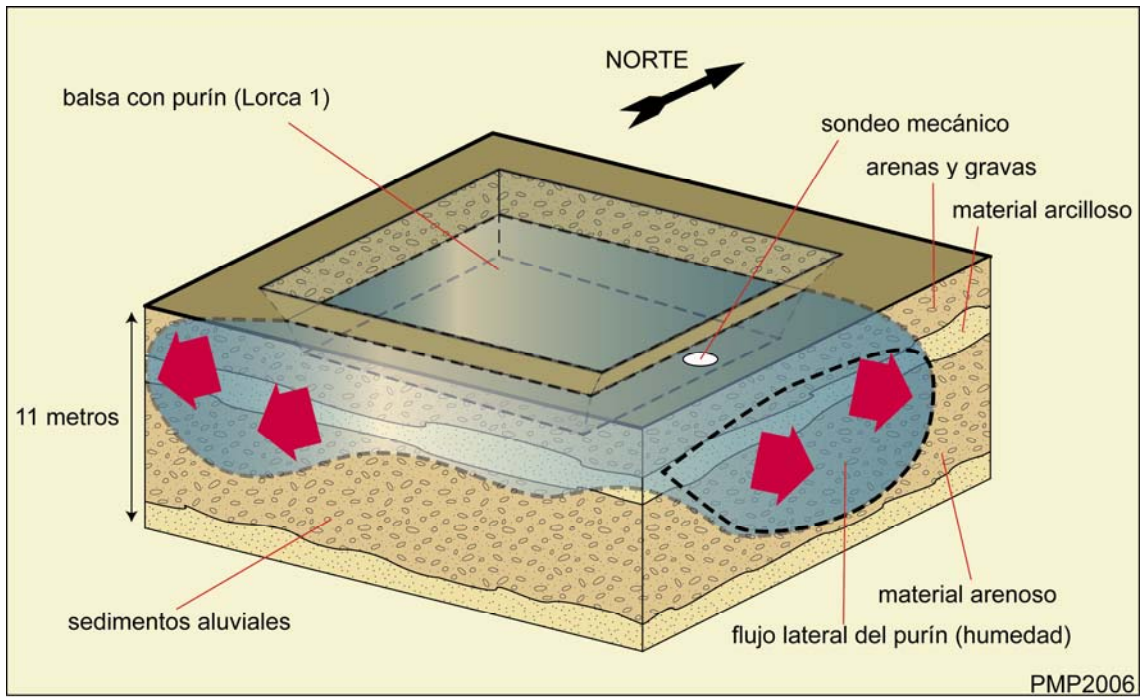


Figura 6. 98. Representación del comportamiento de la filtración bajo la balsa Lorca 1.

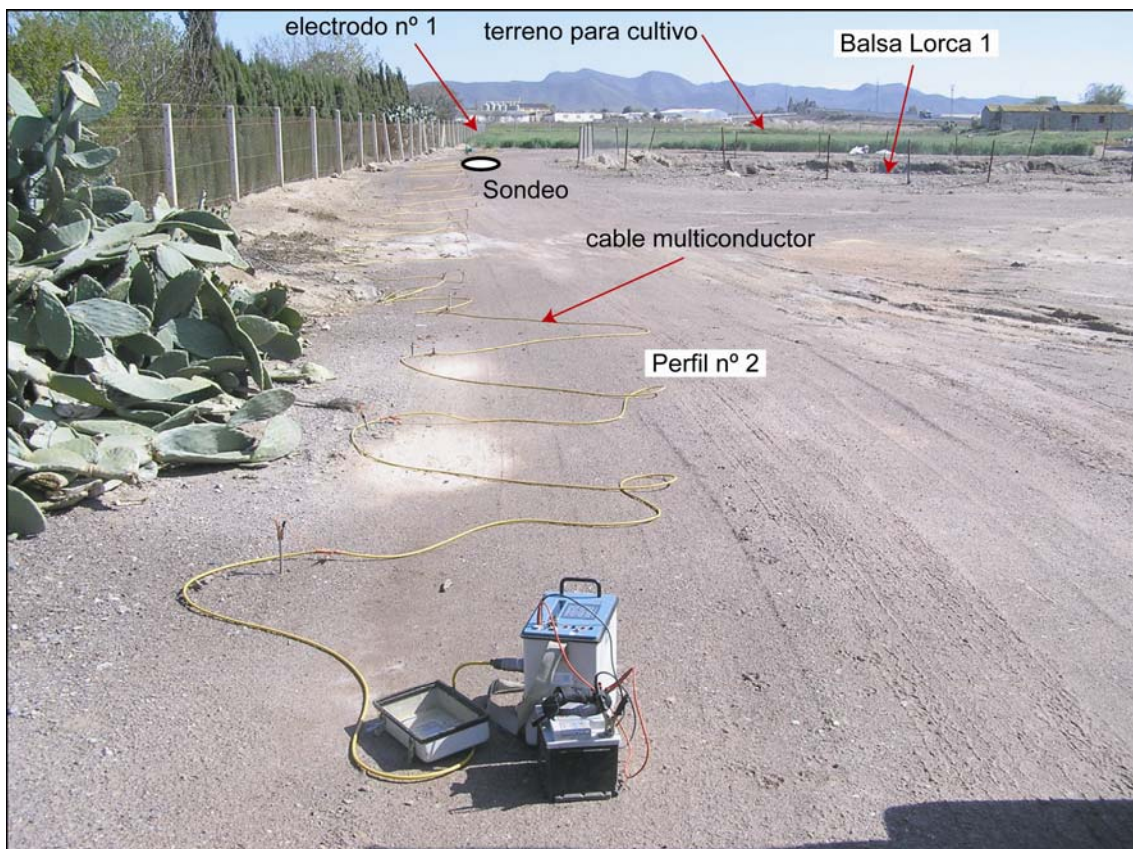


Foto 6. 51. Vista parcial del perfil n° 2 exterior orientada hacia electrodo n° 1 y situación del brocal del sondeo mecánico realizado posteriormente.

## 6.4.2 Tomografía eléctrica 2D – Lorca 2

En Lorca 2 también se efectuaron dos campañas de tomografía eléctrica 2D, una durante el mes de octubre de 2004 y otra durante el mes de abril de 2005. A continuación pasamos a describir los resultados obtenidos en cada una de ellas.

### 6.4.2.1 Campaña de octubre de 2004

Durante esta campaña se realizó un perfil de tomografía eléctrica que cruzó ampliamente el ancho de las dos balsas de este grupo (Figura 6.99). Debido a que una de las balsas estaba llena de purín líquido, se hizo necesario colocar el sistema de soporte aéreo (Foto 6.52).

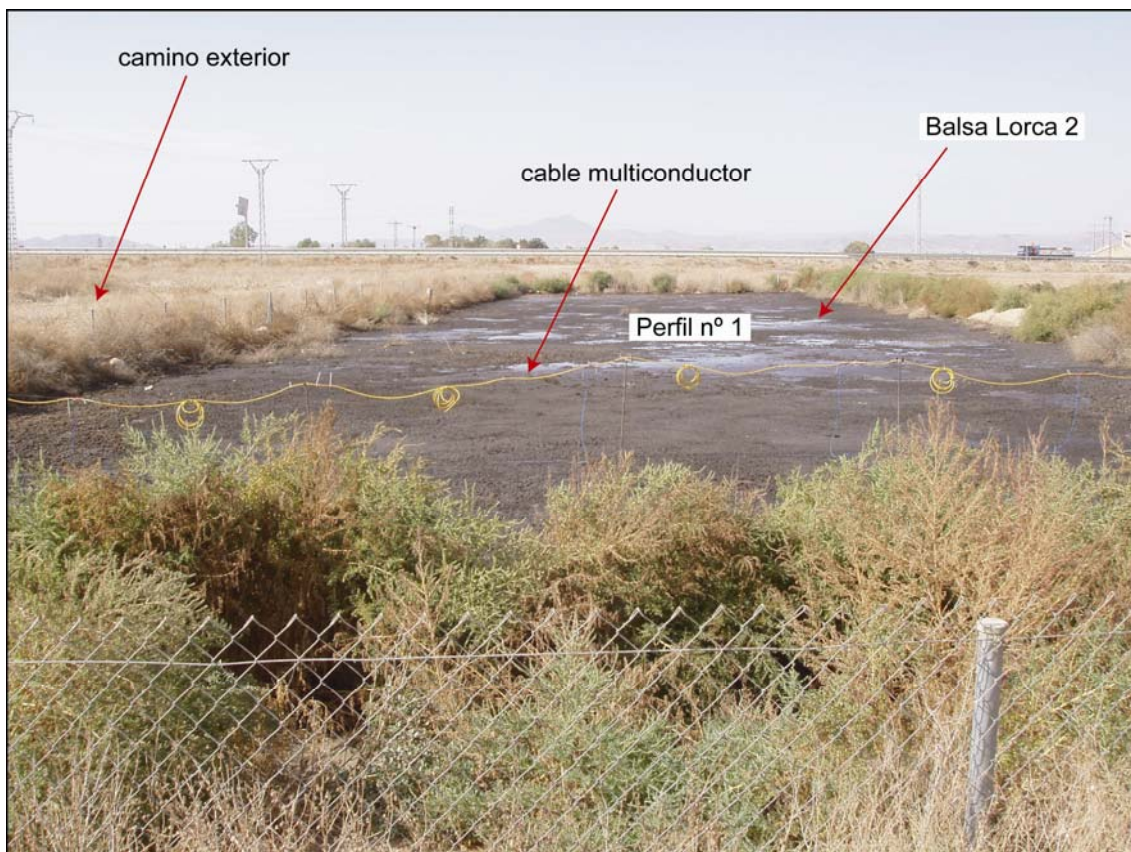


Foto 6. 52. Vista parcial del perfil cruzando la balsa con purín del grupo Lorca 2 (octubre de 2004).

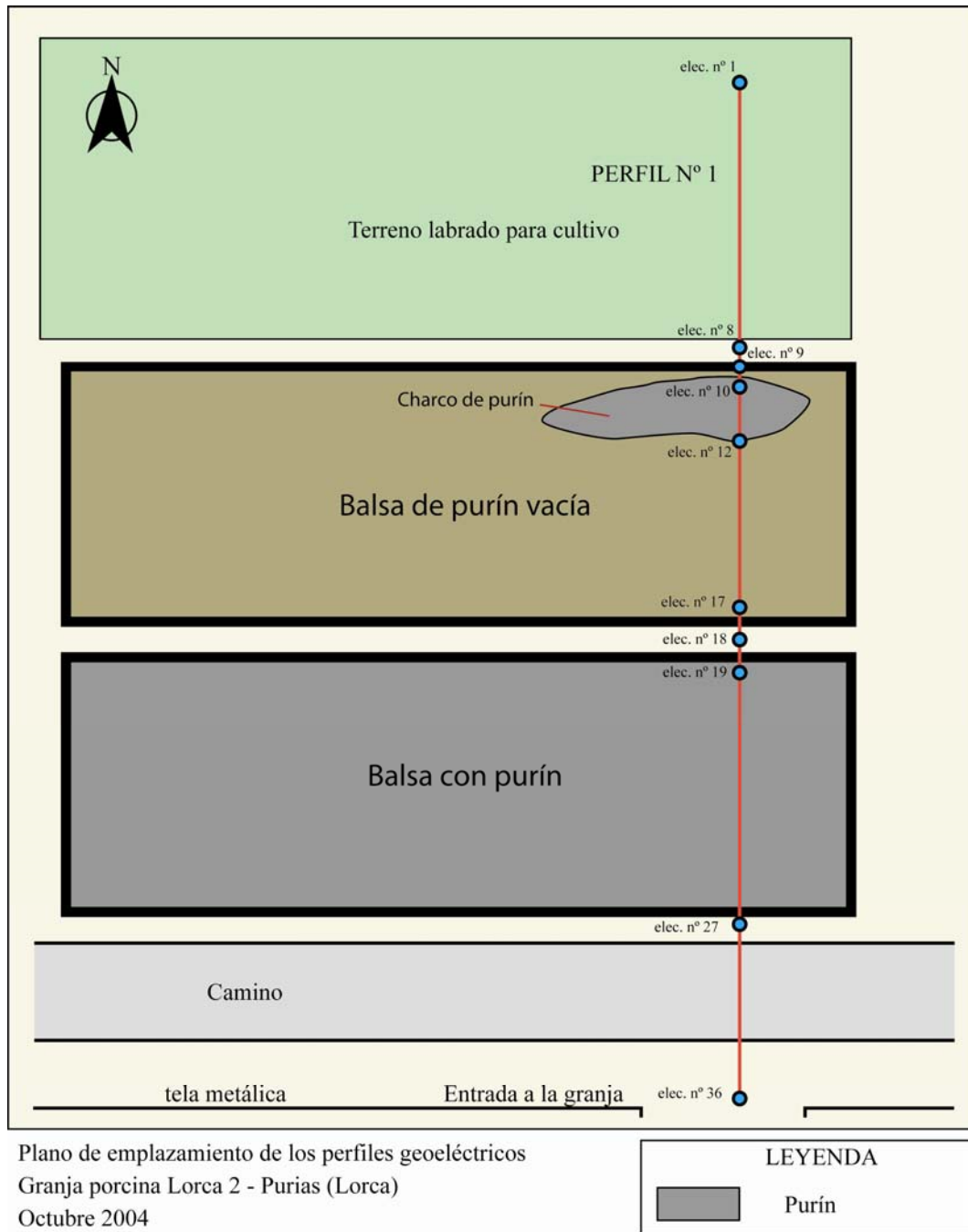
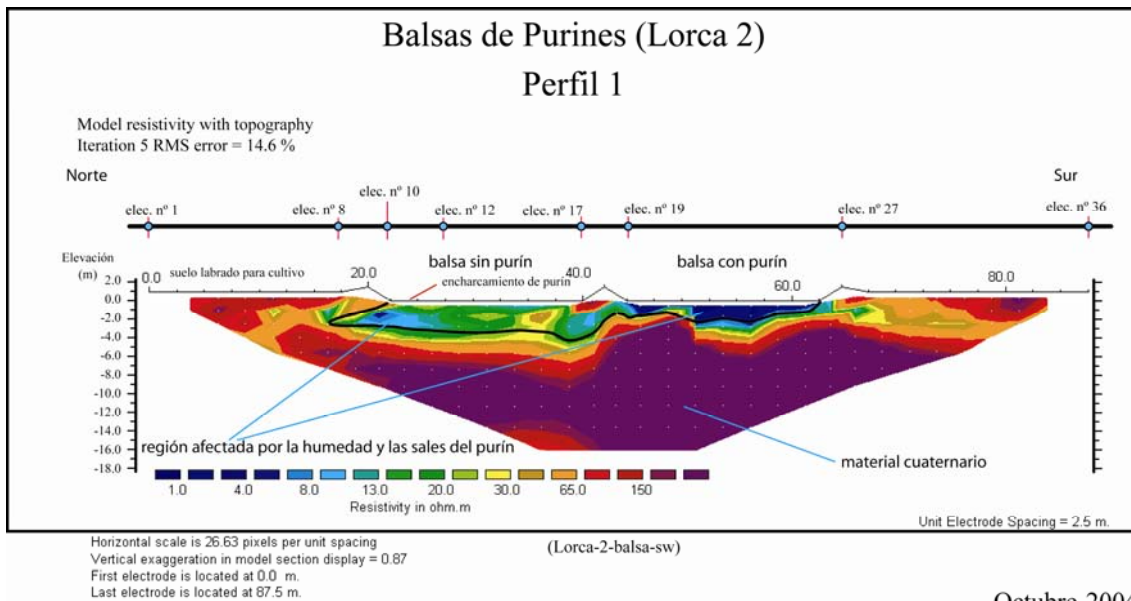


Figura 6. 99. Emplazamiento del perfil de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de Lorca 2 (octubre de 2004).

### Perfil 1

En la Figura 6.100 se muestra la pseudosección geoelectrica con un error aceptable del 14,6 %, destacando la región bajo las balsas que está afectada por la filtración del purín hasta una profundidad de 4 metros. A partir de esta profundidad la

tomografía eléctrica destaca un aumento de la resistividad eléctrica lo que es indicativo de una ausencia de agua salina procedente del purín.



Octubre-2004

Figura 6. 100. Seudosección geoelectrónica interpretada del perfil nº 1 realizado en octubre de 2004.

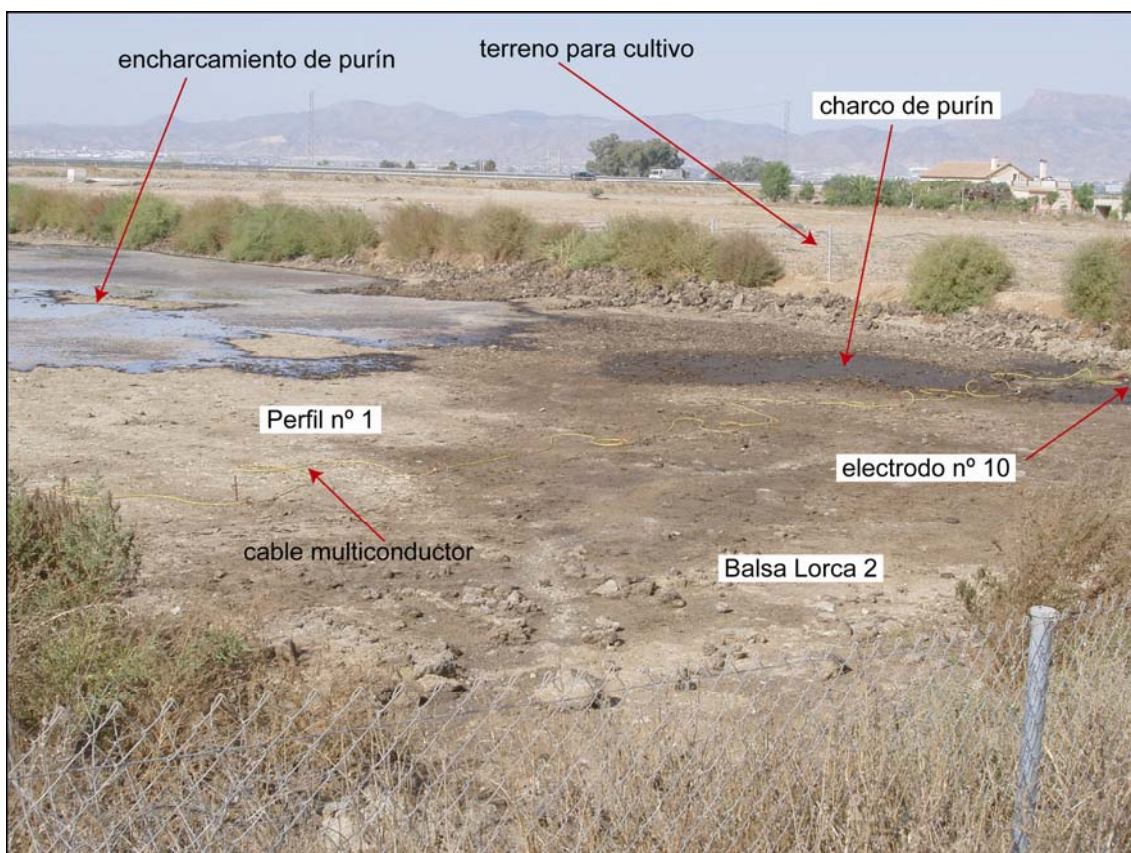


Foto 6. 53. Vista parcial del perfil cruzando la balsa semi-vacía del grupo Lorca 2 (octubre de 2004).

#### **6.4.2.2 Campaña de abril de 2005**

Durante esta campaña de medidas, se realizaron dos perfiles de tomografía eléctrica, uno de los cuales, perfil nº 1, fue idéntico al realizado durante la campaña de octubre de 2004 y que ha sido descrito anteriormente; y el otro perfil, perfil nº 2 se realizó exteriormente al grupo de balsas y siguiendo la misma orientación que el perfil nº 1 (Figura 6.101). Ambos perfil tuvieron una longitud de 87,5 metros, con una separación entre electrodos de 2,5 metros, con los cuales se alcanzaron profundidades de investigación aproximadas de 16 metros.

Durante esta campaña, las dos balsas de Lorca 2 se encontraban completamente llenas de purín (Foto 6.54).

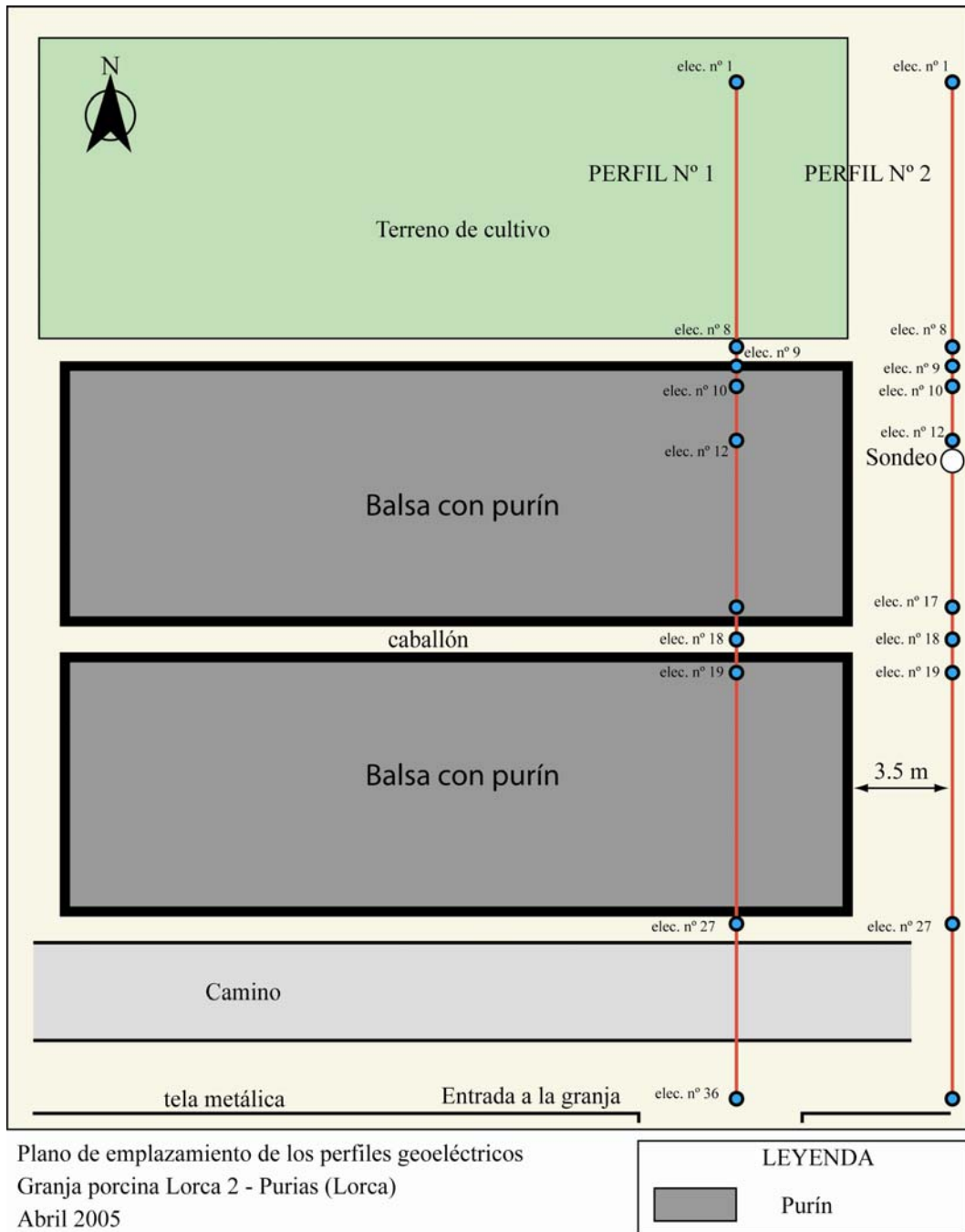


Figura 6. 101. Emplazamiento de los perfiles de tomografía eléctrica 2D sobre el grupo de balsas de Lorca 2 (abril de 2005).

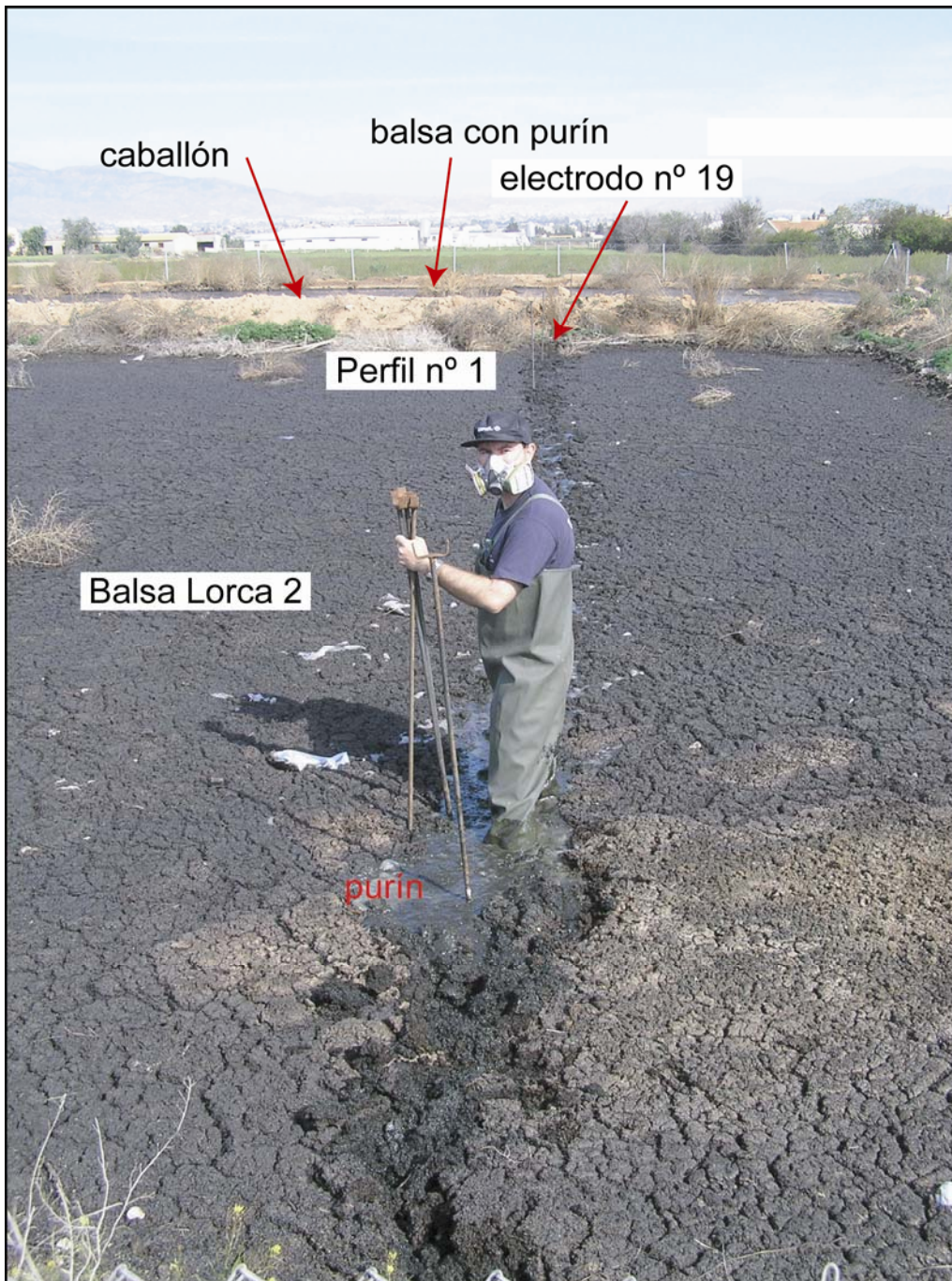


Foto 6. 54. Instalación del soporte aéreo en el grupo Lorca 2 (abril de 2005).

## Perfil 1

Este perfil, que cruzó ambas balsas con purín, dio la seudosección eléctrica que se presenta en la Figura 6.102, que es idéntica a la seudosección eléctrica obtenida para este mismo perfil durante la campaña de octubre de 2004, con salvedad de que entonces una de las balsas estaba vacía.



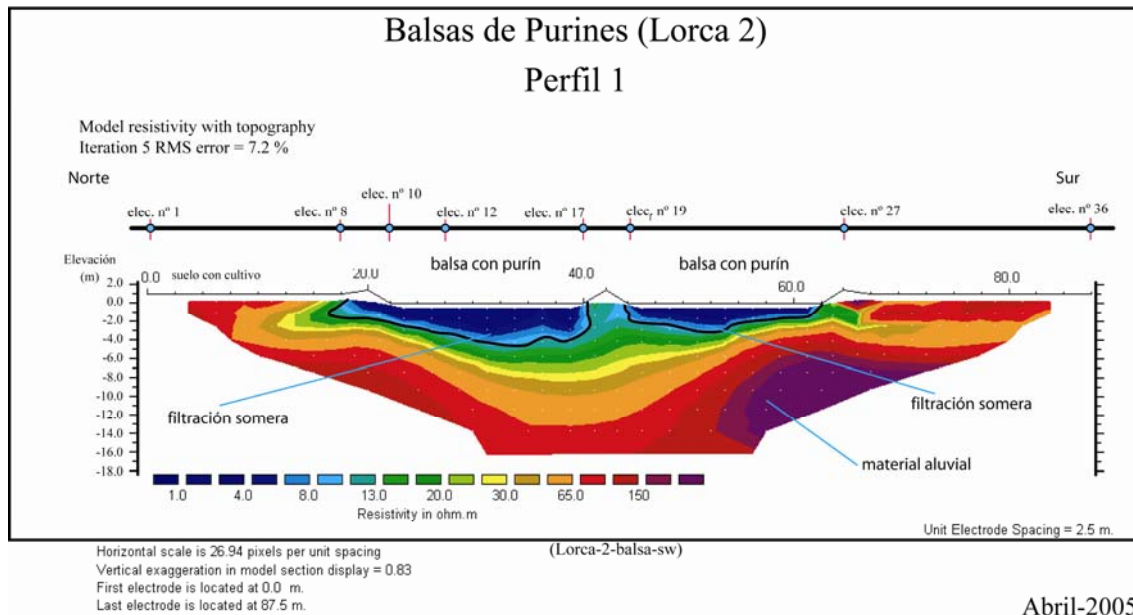


Figura 6. 102. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil n° 1 realizado en abril de 2005.

La seudosección eléctrica fue obtenida con un error bastante bueno del 7,2 % y vuelve a delimitar una región somera bajo las balsas fuertemente afectada por la actividad de éstas, y que llega hasta los 5-6 metros de profundidad; a partir de ahí esta afección comienza a disminuir, presumiblemente por una disminución en el porcentaje de arenas y un mayor contenido en material arcilloso.

La seudosección eléctrica destaca una filtración de longitud limitada hacia los laterales de las balsas siguiendo posibles horizontes de arenas.

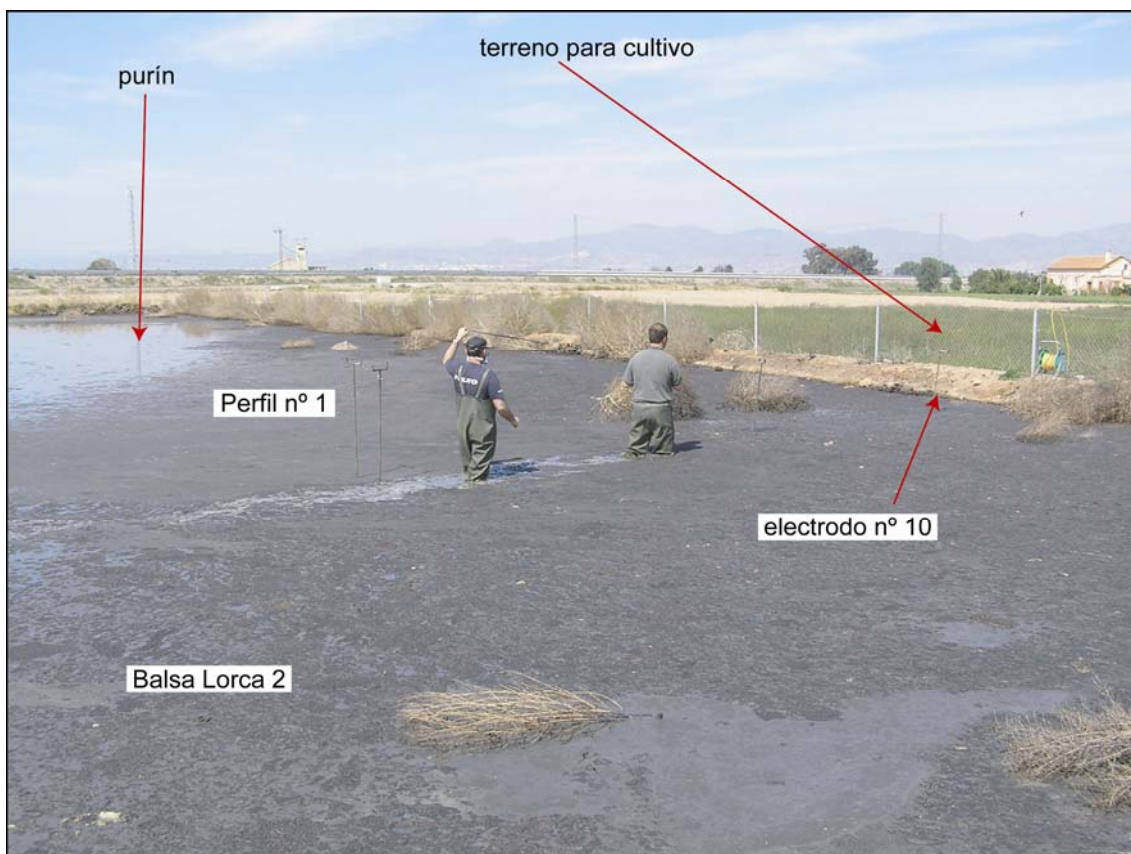


Foto 6. 55. Proceso de instalación del perfil nº 1 cruzando una de las balsas de Lorca 2.

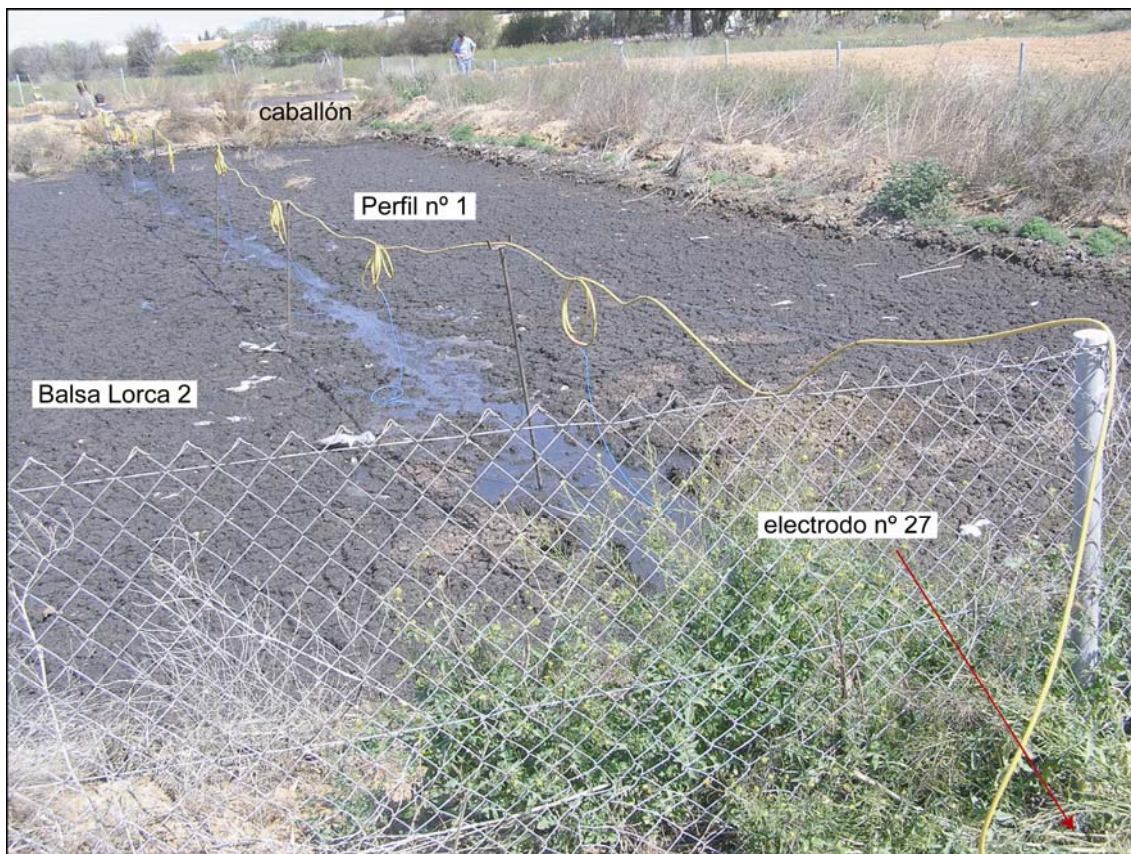


Foto 6. 56. Vista parcial del perfil nº 1 listo para medir.

## Perfil 2

La pseudosección eléctrica de este perfil es mostrada en la Figura 6.103; destacan dos regiones centrales que coinciden con el ancho de las balsas de purines y que indica una afección lateral del purín hacia estas zonas, debido a la presencia de arenas con algo de gravas que facilitan la transmisión hidráulica del purín.

La pseudosección eléctrica muestra una región superficial resistiva y que es atribuible a un contenido superficial de textura arenosa; además el suelo había sido arado con lo que se favorece la creación de poros vacíos que aumentan la resistividad eléctrica (Foto 6.57).

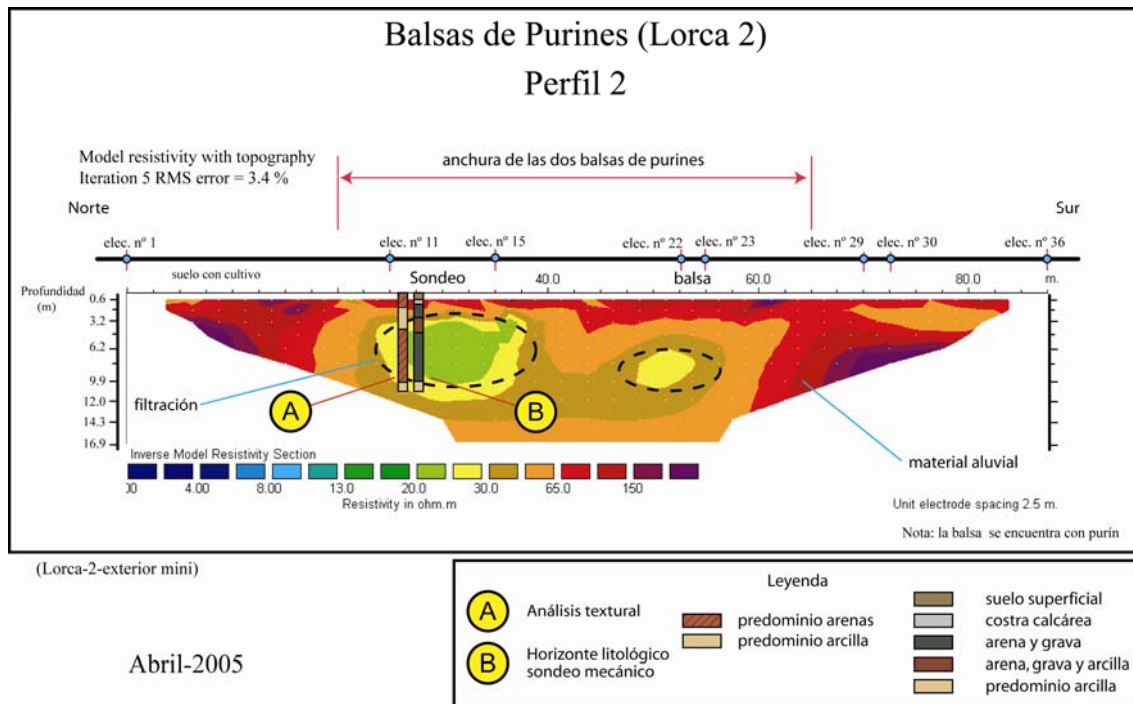


Figura 6. 103. Seudosección geoelectrica interpretada del perfil nº 2 realizado en abril de 2005.

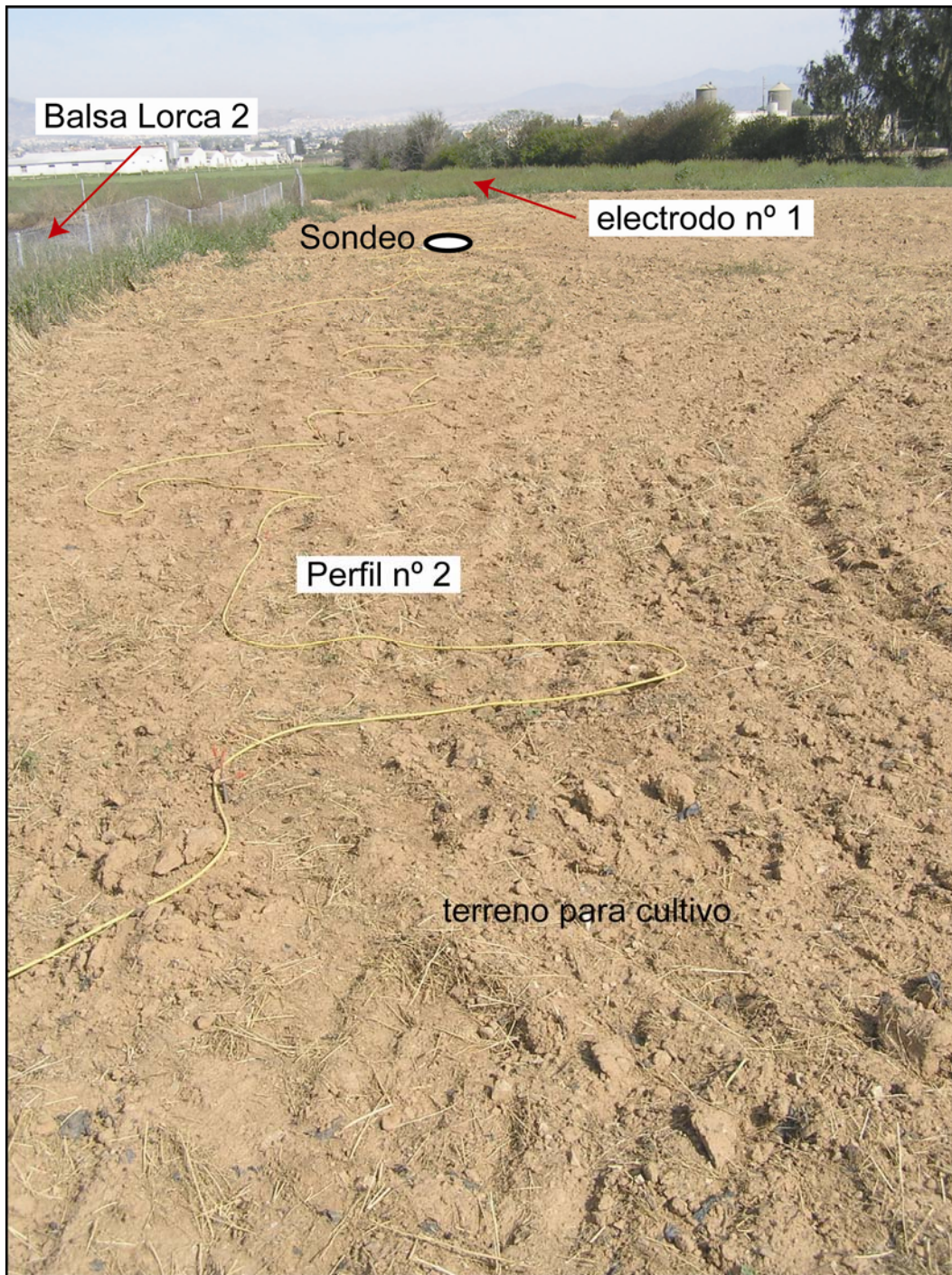


Foto 6. 57. Vista parcial del perfil nº 2 y posicionamiento del brocal del sondeo mecánico realizado en octubre de 2005.

### **6.4.3 Tomografía eléctrica 3D – Lorca 1**

En la balsa de purines Lorca 1 se ejecutó, durante el mes de septiembre de 2005, una malla compuesta por 5 perfiles paralelos de tomografía eléctrica separados 2 metros entre ellos y con una separación de 2,5 metros entre electrodos (Figura 6.104). Estos

perfiles consistieron en 36 electrodos con una longitud de 87,5 metros. El dispositivo empleado fue el Schlumberger-Wenner que es muy adecuado ante cambios laterales y verticales de resistividad eléctrica (ver Capítulo 4).

La situación de estos perfiles se efectuó atendiendo a los siguientes criterios: que la zona cubierta por la malla 3D de tomografía eléctrica pasara por la posición de los perfiles de tomografía eléctrica 2D de las anteriores campañas; que la longitud de los perfiles fuera suficiente para conseguir la profundidad de investigación necesaria para alcanzar la zona afectada por una posible filtración; y que la zona intermedia de los perfiles estuviera posicionada sobre la balsa, puesto que es la zona de mayor profundidad de investigación (Foto 6.58).

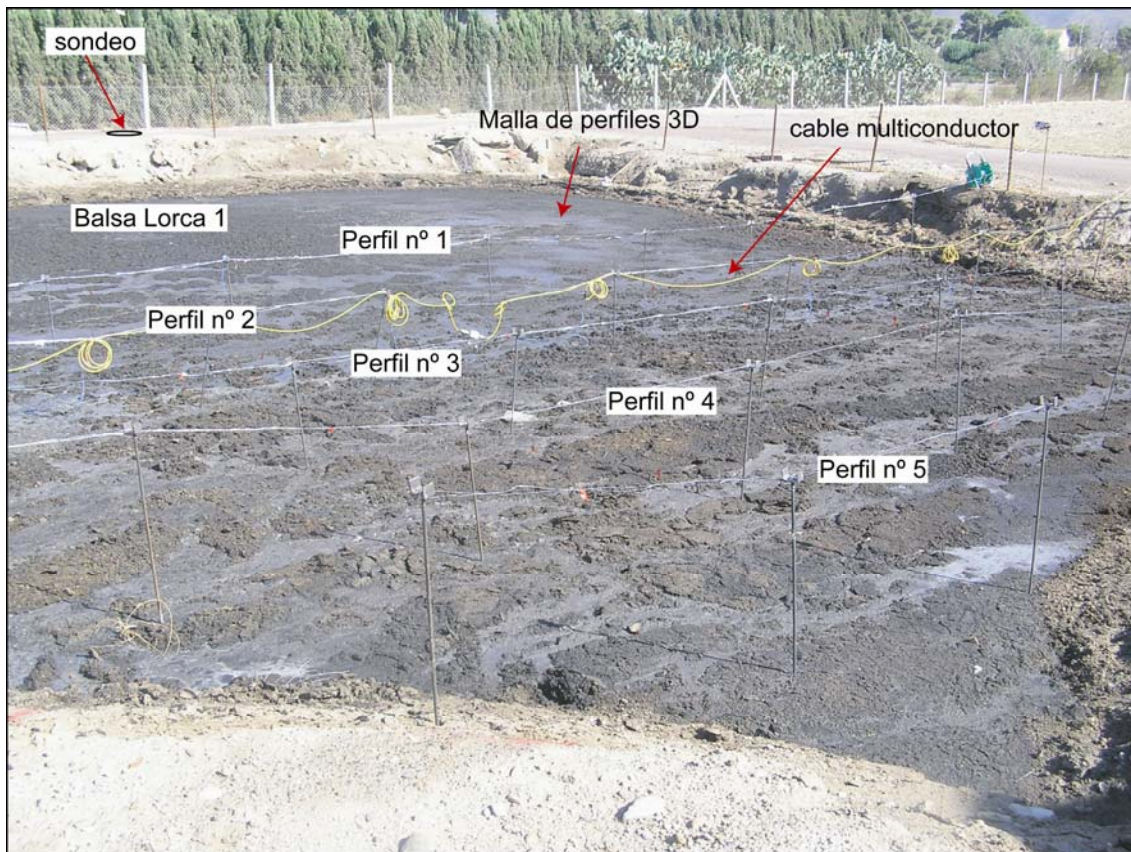


Foto 6. 58. Instalación para tomografía eléctrica 3D en Lorca 1 orientada a electrodos nº 1.

El procesamiento de los valores eléctricos medidos sobre el terreno se realizó con el programa RES3DINV de Geotomo. Posteriormente a la corrección topográfica y al proceso de inversión 3D se generó un bloque 3D de resistividades reales el cual se ha manejado a través del programa SLICER DICER de Pixotec para la obtención de los

diferentes volúmenes de material obtenidos en la inversión según su resistividad eléctrica (Figura 6.105).

Desde la Figura 6.105 hasta la Figura 6.107 podemos observar diferentes vistas 3D obtenidas con la tomografía eléctrica 3D, en las que se pone de manifiesto la idoneidad de esta técnica para el estudio volumétrico de regiones someras afectadas por balsas de purines, puesto que caracteriza resistivamente la región investigada con adecuada resolución y corrobora la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D.

El rango de valores de resistividad eléctrica está representado en forma logarítmica decimal, así, según la escala, un valor de 0,6 corresponde a 3,98 ohm·m, un valor de 1,4 corresponde a 25,12 ohm·m, un valor de 2,6 corresponde a 398,11 ohm·m y, así sucesivamente.

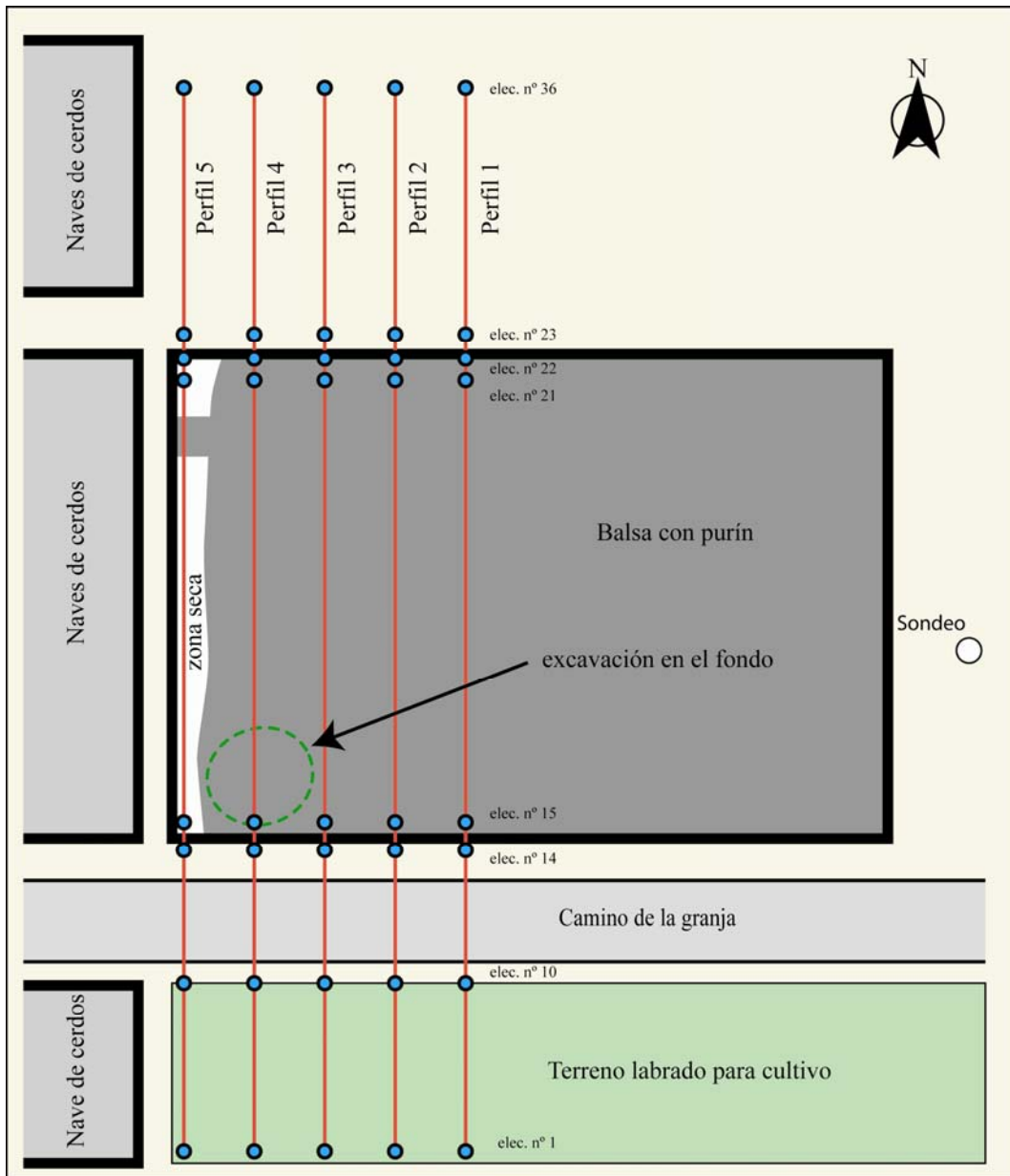
Sobre el bloque 3D obtenido con la tomografía eléctrica 3D (Figura 6.105) se ha indicado la posición exacta de los electrodos para los diferentes perfiles geoelectrónicos (Figura 6.104) y la posición del sondeo realizado. Es interesante ver como el bloque ha marcado los límites de la región afectada por el purín almacenado en la balsa Lorca 1, que se extienden hasta unos 12 metros bajo la balsa con una zona de mayor filtración que llega hasta los 4 metros (Figura 6.105). Es lógico pensar que esta afección será principalmente motivada por el agua embalsada. En el bloque geoelectrónico 3D de la Figura 6.105 se señalan los límites de la región afectada por la filtración acuosa del purín, correspondiendo éstos a un penacho con tendencia lateral (Figura 6.98) que progresa por los materiales aluviales constituidos por arenas y gravas y que han sido identificados a través de los análisis de texturas y de los testigos del sondeo (Figura 6.112).

La presencia de capas más o menos continuas con alto contenido en arcillas (Figura 6.112) obstaculizaría la progresión vertical del penacho acuoso, debido a una disminución de la permeabilidad, manteniéndolo “recluido” en una región somera. Esto puede observarse claramente a través de los cortes realizados al bloque geoelectrónico 3D (Figura 6.106 y Figura 6.107). Los análisis de conductividad eléctrica de alguna manera corroboran esto último, pues los valores altos de conductividad eléctrica, asociados a la

presencia de sales, se han obtenido dentro de los primeros 8 metros de profundidad y con una regularidad destacada dentro de los primeros 4 metros (Figura 6.116).

Es interesante ver la similitud del bloque geoelectrico 3D de la Figura 6.105, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de septiembre de 2005, y la pseudosección geoelectrica 2D de la Figura 6.96, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de abril de 2005 durante la cual la balsa se encontraba en la misma situación de llenado (Figura 6.95 y Figura 6.104). Esto confirma la bondad de las medidas efectuadas y el procesamiento de los datos efectuado a posteriori.

La tomografía eléctrica 3D ha resuelto bastante bien la zonificación bajo las balsas de purín, mostrando realmente la zona afectada por las balsas que no deja de ser somera. Por otro lado, se ha señalado una región superficial donde se situaron los electrodos nº 29 y que durante la ejecución de los perfiles se visualizaron una serie de oquedades superficiales, esto ha sido señalado por la tomografía eléctrica 3D a través de una ligera subida de la resistividad eléctrica en superficie (Figura 6.105).



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
Granja porcina Lorca 1 (Lorca)  
Septiembre 2005  
Separación interelectrónica = 2.5 metros  
Distancia entre perfiles = 2 metros



Figura 6. 104. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico en la balsa de purines Lorca 1.



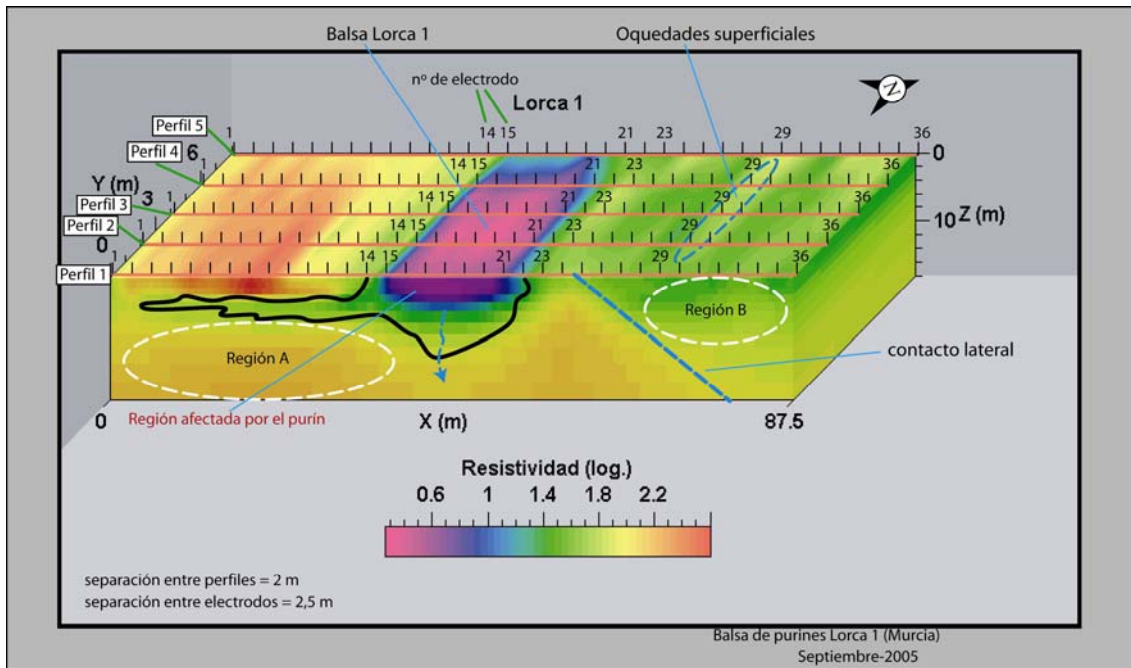


Figura 6. 105. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado en Lorca 1.

En la Figura 6.105, se ha marcado una línea azul a trazos que vendría a ser como un cambio de facies laterales, y que señala el límite de material con un mayor contenido en arcillas, indicado como región B, esta región conductora ha sido identificada también con la tomografía eléctrica 2D (Figura 6.96).

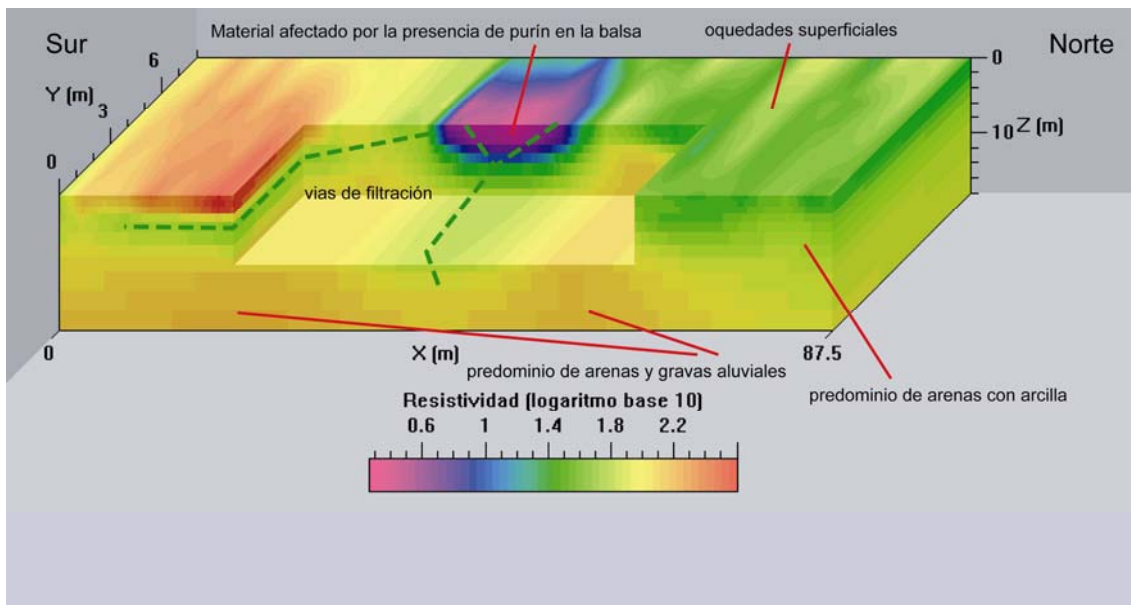


Figura 6. 106. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, señalando con líneas a trazos regiones alcanzadas ligeramente por la filtración del purín.

En la Figura 6.106 y en la Figura 6.107 se puede apreciar como justamente debajo de la región afectada por la filtración acuosa del purín se ha señalado con una línea verde a trazos una región donde esta afección aparece muy limitada y que señalaría el límite inferior de la filtración.

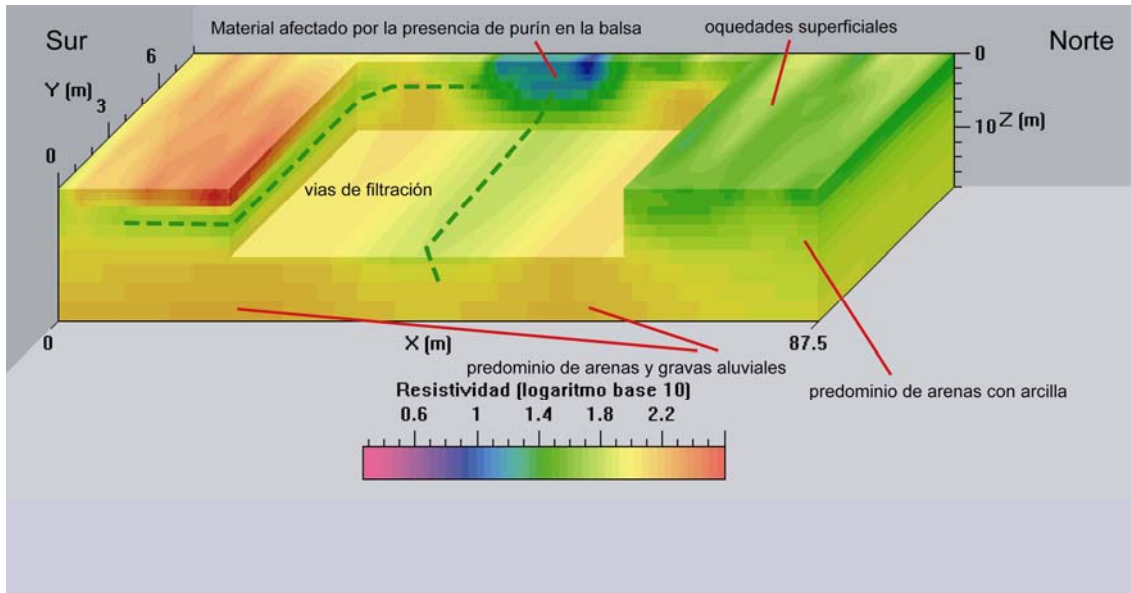


Figura 6. 107. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, destacando la región afectada por el purín próxima al perfil nº 5.

La tomografía eléctrica 3D ha demostrado ser una técnica importante para establecer la relación geométrica existente entre los diferentes horizontes litológicos y la acumulación del purín, y que gracias a su fuerte contraste resistivo lo delimita de forma precisa y marcando posibles vías por donde el agua salina puede penetrar en las formaciones geológicas.

#### **6.4.4 Tomografía eléctrica 3D – Lorca 2**

En el grupo de balsas de purines Lorca 2 se ejecutó, durante el mes de septiembre de 2005, una malla compuesta por 5 perfiles paralelos de tomografía eléctrica separados 2 metros entre ellos y con una separación de 2,5 metros entre electrodos (Figura 6.108). Estos perfiles consistieron en 36 electrodos con una longitud de 87,5 metros. El dispositivo empleado fue el Schlumberger-Wenner que es muy adecuado ante cambios laterales y verticales de resistividad eléctrica (ver Capítulo 4).

La situación de estos perfiles se efectuó atendiendo a los siguientes criterios: que la zona cubierta por la malla 3D de tomografía eléctrica pasara por la posición de los perfiles de tomografía eléctrica 2D de las anteriores campañas; que la longitud de los perfiles fuera suficiente para conseguir la profundidad de investigación necesaria para alcanzar la zona afectada por una posible filtración, que la zona intermedia de los perfiles estuviera posicionada sobre las dos balsas, puesto que es la zona de mayor profundidad de investigación (Foto 6.59).

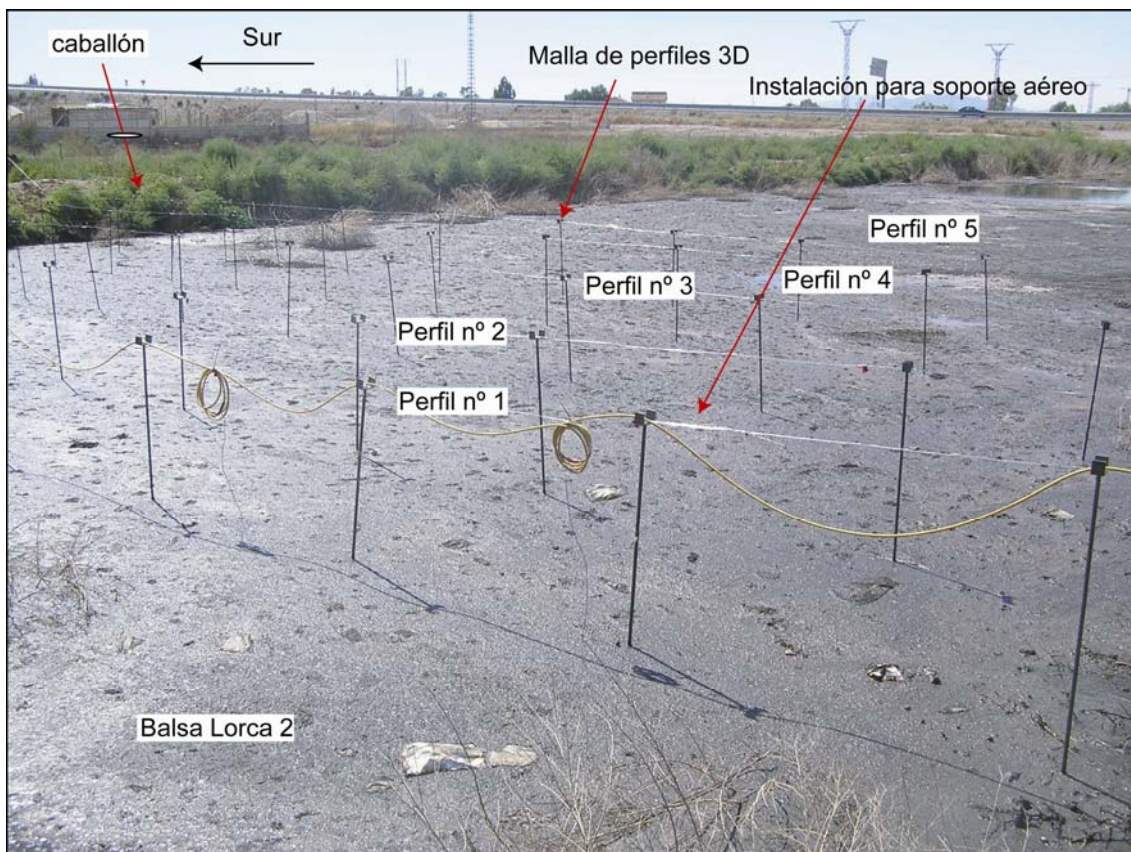


Foto 6. 59. Instalación para tomografía eléctrica 3D en Lorca 2 orientada a electrodos n° 36.

El procesamiento de los valores eléctrico medidos sobre el terreno se realizó con el programa RES3DINV de Geotomo. Posteriormente a la corrección topográfica y al proceso de inversión 3D se generó un bloque 3D de resistividades reales el cual se ha manejado a través del programa SLICER DICER de Pixotec para la obtención de los diferentes volúmenes de material obtenidos en la inversión según su resistividad eléctrica (Figura 6.109).

Desde la Figura 6.109 hasta la Figura 6.111 podemos ver diferentes vistas 3D obtenidas con la tomografía eléctrica 3D, en las que se pone de manifiesto la idoneidad de esta técnica para el estudio volumétrico de regiones someras afectadas por balsas de purines, puesto que caracteriza resistivamente la región investigada con adecuada resolución y corrobora la información obtenida con la tomografía eléctrica 2D.

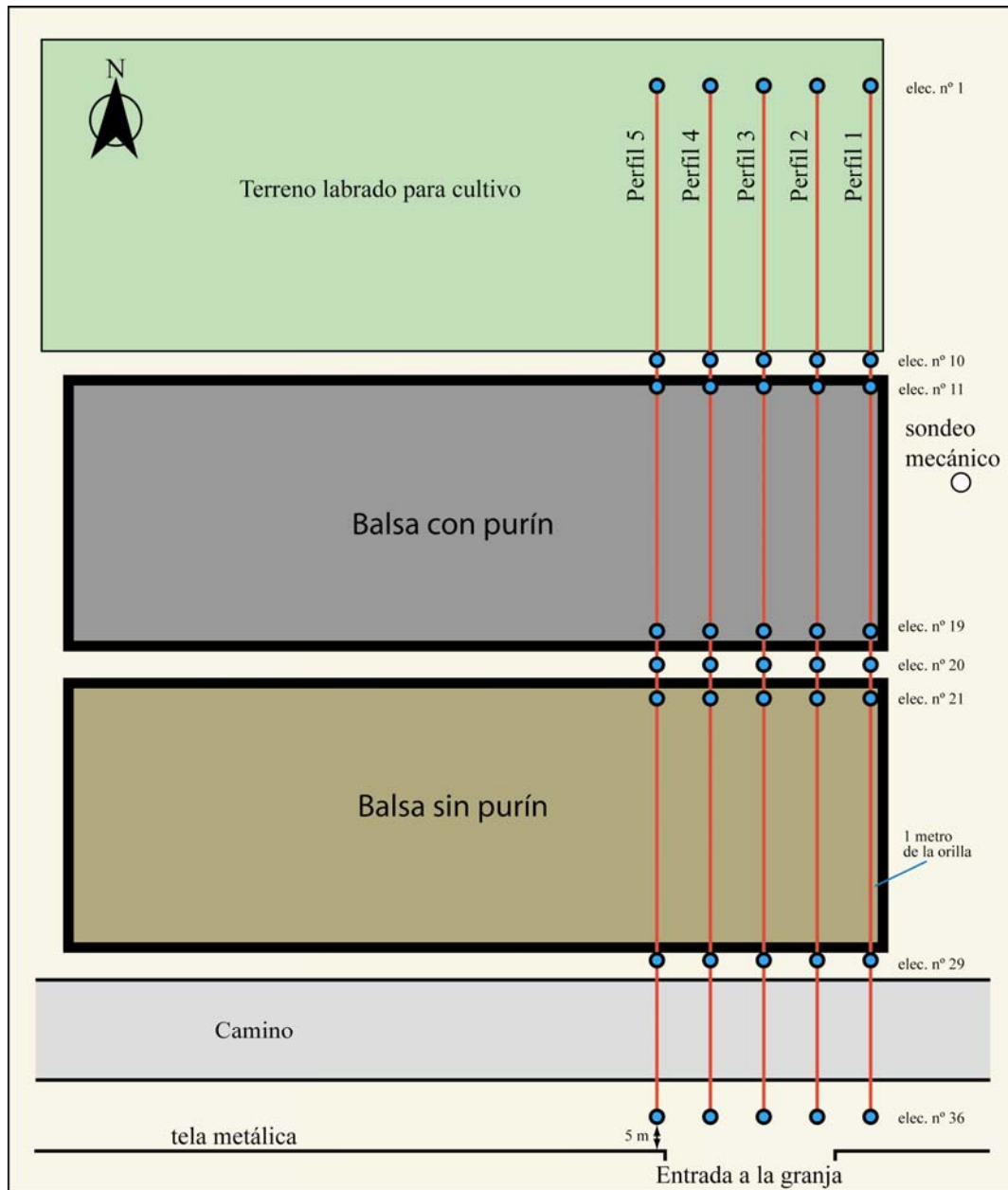
El rango de valores de resistividad eléctrica está representado en forma logarítmica decimal, así según la escala un valor de 0,6 corresponde a 3,98 ohm·m, un valor de 1,4 corresponde a 25,12 ohm·m, un valor de 2,6 corresponde a 398,11 ohm·m y, así sucesivamente.

Sobre el bloque 3D obtenido con la tomografía eléctrica 3D (Figura 6.109) se ha indicado la posición exacta de los electrodos para los diferentes perfiles geoelectricos (Figura 6.108) y la posición del sondeo realizado. Es interesante ver como el bloque ha marcado los límites de la región afectada por el purín almacenado en las balsas de Lorca 2, que se extienden hasta unos 7-8 metros bajo la balsa con una zona de mayor filtración que llega hasta los 3 metros (Figura 6.109). Es lógico pensar que esta afección será principalmente motivada por el agua embalsada. En el bloque geoelectrico 3D de la Figura 6.109 se señalan los límites de la región afectada por la filtración acuosa del purín, correspondiendo éstos a un penacho con tendencia lateral (Figura 6.98) que progresa por los materiales aluviales constituidos por arenas y gravas y que han sido identificados a través de los análisis de texturas y de los testigos del sondeo (Figura 6.114).

La presencia de capas más o menos continuas con alto contenido en arcillas (Figura 6.112) obstaculizaría la progresión vertical del penacho acuoso, debido a una disminución de la permeabilidad, manteniéndolo “recluido” en una región somera. Esto puede observarse claramente a través de los cortes realizados al bloque geoelectrico 3D (Figura 6.110). Los análisis de conductividad eléctrica de alguna manera corroboran esto último, pues los valores altos de conductividad eléctrica ( $> 5$  dS/m), asociados a la presencia de sales, se han obtenido dentro de los primeros 3 metros de profundidad (Figura 6.117).

Es interesante ver la similitud del bloque geoelectrico 3D de la Figura 6.109, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de septiembre de 2005, y la pseudosección geoelectrica 2D de la Figura 6.102, resultado de las medidas efectuadas en la campaña de abril de 2005 durante la cual la balsa se encontraba en la misma situación de llenado (Figura 6.101 y Figura 6.108). Esto confirma la bondad de las medidas efectuadas y el procesamiento de los datos efectuado a posteriori.

La tomografía eléctrica 3D ha resuelto bastante bien la zonificación bajo las balsas de purín, mostrando realmente la zona afectada por las balsas que no deja de ser somera.



Plano de emplazamiento de los perfiles geoelectricos  
 Granja porcina Lorca 2 - Purias (Lorca)  
 Septiembre 2005  
 Separación interelectrónica = 2.5 metros  
 Distancia entre perfiles = 2 metros

LEYENDA	
	Purín
	Sin purín

Figura 6. 108. Situación de los perfiles para la tomografía eléctrica 3D y el sondeo mecánico en la balsa de purines Lorca 1.

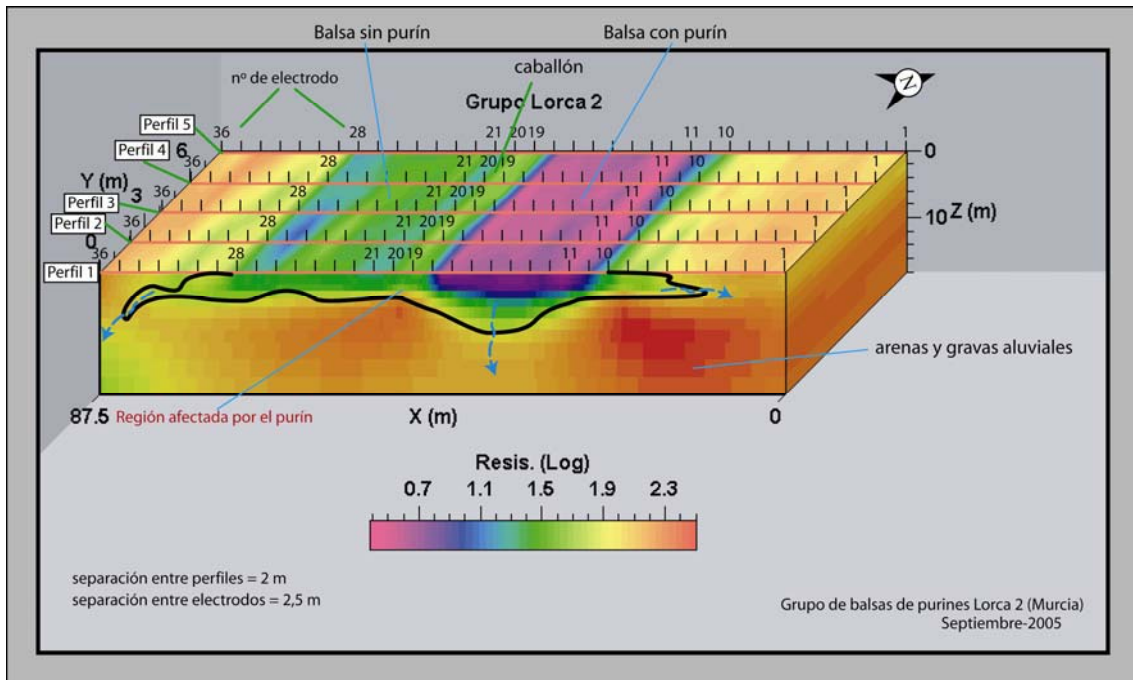


Figura 6. 109. Perfiles de tomografía eléctrica sobre el bloque 3D de resistividad eléctrica generado en Lorca 2.

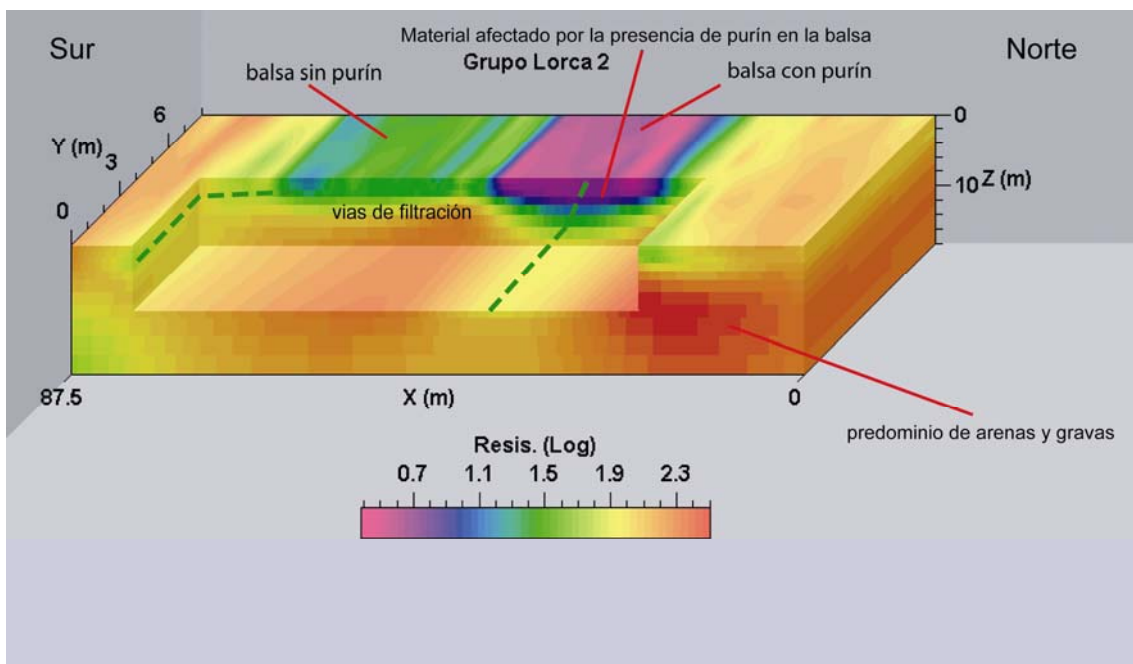


Figura 6. 110. Vista seccionada del bloque geoelectrico 3D, señalando con líneas a trazos regiones alcanzadas ligeramente por la filtración del purín.

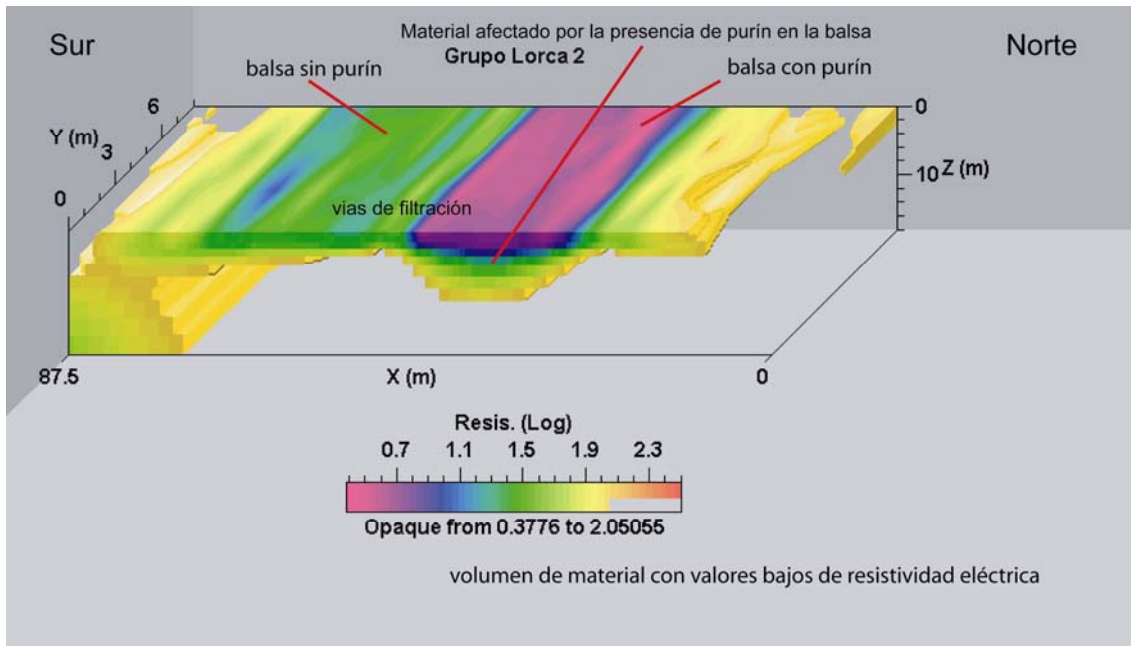


Figura 6. 111. Volumen correspondiente a materiales del bloque geoelectrico 3D con valores bajos de resistividad eléctrica ( $< 0,37 [\log_{10}\rho]$ ).

La tomografía eléctrica 3D ha demostrado ser una técnica importante para establecer la relación geométrica existente entre los diferentes horizontes litológicos y la acumulación del purín, y que gracias a su fuerte contraste resistivo lo delimita de forma precisa y marcando posibles vías por donde el agua salina puede penetrar en las formaciones geológicas. El comportamiento de la filtración acuosa en las balsas de Lorca se ha demostrado, a través de la tomografía eléctrica, que es similar como no puede ser de otra manera puesto que se trata de la misma geología.

#### **6.4.5 Sondeos mecánicos**

Se ejecutaron dos sondeos mecánicos en el grupo de balsas de Lorca, uno exterior a la balsa de Lorca 1 y otro exterior al grupo de balsas Lorca 2 (Figura 6.95 y Figura 6.101); estos sondeos se perforaron con tubería de 101 mm de diámetro hasta completar un total de 11 metros de longitud en cada uno.

Gracias a la realización de estos sondeos fue posible obtener los testigos continuos hasta los 11 metros de profundidad, depositándolos sobre cajas porta-testigos para facilitar la columna litológica atravesada por la corona de corte. Además, posteriormente estos testigos sirvieron para obtener muestras cada metro de profundidad



y ser sometidas a ensayos de texturas empleando la pipeta de Robinson (ver Apartado 2.2.3). En las Figuras 6.84 y 6.86 se presentan los resultados de los análisis de texturas para ambos sondeos mecánicos.

Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Sondeo Mecánico columna litológica Lorca 1
0	8,1	7,9	53,6	38,4	8,0	Franco	arena con gravas 2,4 m
1	8,1	7,9	47,8	44,0	8,2	Franco	
2	8,3	8,1	67,5	28,4	4,1	Franco Arenoso	
3	8,3	8,0	55,9	35,7	8,5	Franco	arcilla con arena 6,8 m
4	8,2	7,9	39,0	42,7	18,3	Franco	
5	8,4	8,0	57,7	34,9	7,5	Franco Arenoso	
6	8,2	8,0	44,0	47,3	8,8	Franco	arena con gravas 7,8 m
7	8,3	7,9	49,7	40,4	9,8	Franco	
8	8,3	8,0	59,9	33,1	7,1	Franco Arenoso	
9	8,3	8,0	52,6	37,4	10,1	Franco	arcilla 11,0 m
10	8,5	8,0	52,8	39,0	8,3	Franco	
11	8,5	7,9	32,7	50,0	17,3	Franco	

Figura 6. 112. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo de Lorca 1 analizadas, junto con la columna litológica atravesada.

#### 6.4.5.1 Sondeo Lorca 1

Este sondeo se realizó en octubre de 2005 en el exterior de la balsa de purines Lorca 1 del grupo de Lorca (Foto 6.60), pero próximo al borde de la misma. Su longitud fue de 11 metros. En el transcurso de su realización la balsa de purines se encontraba llena. Se fue añadiendo agua para facilitar la perforación a rotación, de ahí la humedad en los testigos obtenidos (Figura 6.85).

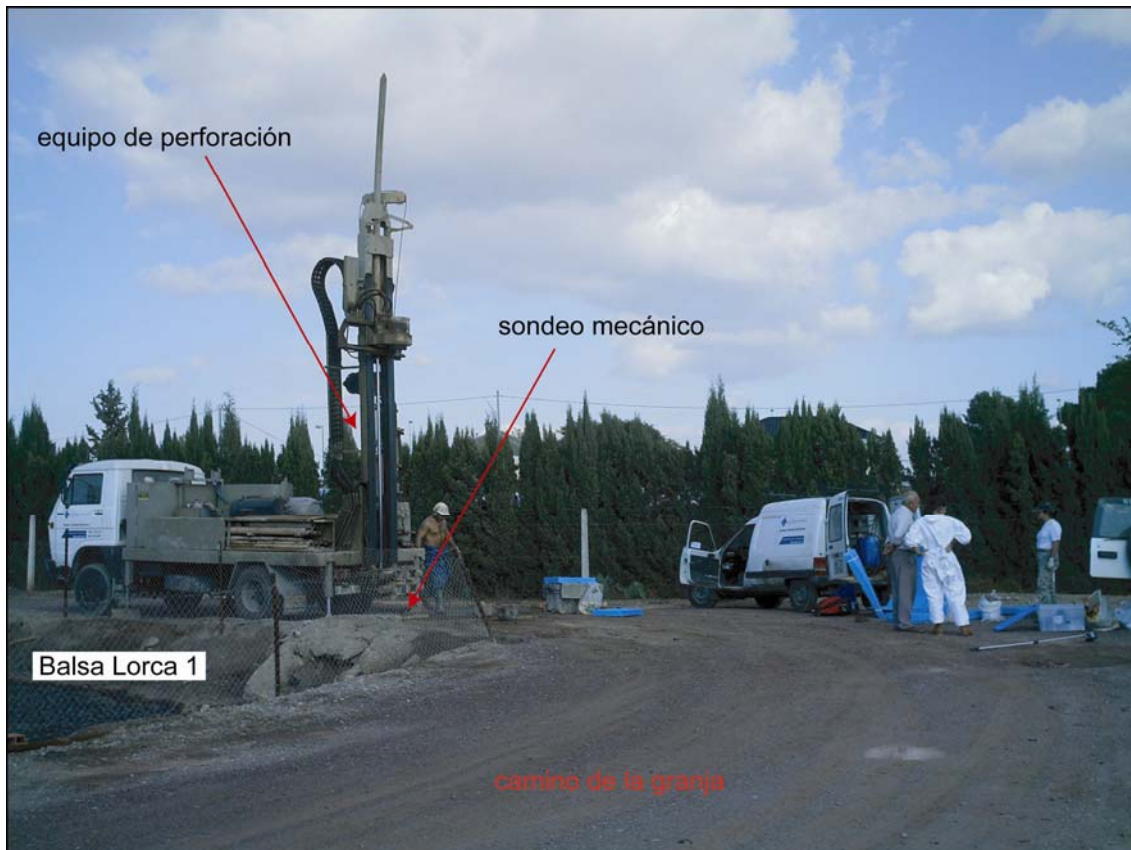


Foto 6. 60. Vista de la posición del sondeo mecánico de Lorca 1.

En la Figura 6.84 se muestran los resultados obtenidos de pH y de textura, además se han incluido la columna litológica levantada durante la realización del sondeo para comparar los diferentes horizontes obtenidos y analizar las dispersiones propias de la subjetividad del sondista. Las clases texturales se han basado en el empleo del triángulo de texturas (Figura 6.113).

En la Figura 6.112 se han sombreado, empleando diferentes colores, aquellas filas de la tabla que tienen en común alguna propiedad textural destacable, principalmente los porcentajes en el contenido de arcilla y de arenas, señaladas por las elipses de trazo blanco. Al hacer esto se ha simplificado los horizontes litológicos a cuatro caracterizados por la presencia destacable de arcilla o de arena. Observando la Figura 6.112, se puede ver como entre ciertos niveles del subsuelo, estos contenidos de arenas y de arcilla coinciden con los indicados por el sondista. Según el sondeo mecánico, el material atravesado hasta los 11 metros estaría formado por una alternancia de materiales aluviales consistentes en paquetes de diferente espesor formados por arenas y gravas con algún contenido en arcilla y capas donde la arcilla se presenta de una forma más importante pero sin llegar a ser predominante frente al

contenido de arenas y limos. A este último tipo de capas, sin llegar a ser verdaderamente una capa de material arcilloso, se las ha definido como capas de arcilla con arena o simplemente capa de arcillas.

Como ya se matizó anteriormente la pequeña dispersión de la Figura 6.112 correspondiente a la información de la columna litológica, levantada por el perforista in situ, y la correspondiente a la información de la columna litológica basada en la clase textural se debe a la componente subjetiva del perforista a la hora de emitir una valoración sobre el tipo de material que ha atravesado la sonda de perforación. Sin embargo, esta valoración se puede tomar como adecuada, salvo pequeños errores de matización, puesto que se ajusta adecuadamente a lo obtenido en los análisis de texturas.



Figura 6. 113. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo de Lorca 1.

### 6.4.5.2 Sondeo Lorca 2

Este sondeo, se realizó durante el mes de octubre de 2005 próximo al borde de una de las balsas del grupo Lorca 2, estando la balsa más próxima al sondeo llena de purín (Figura 6.108 y Foto 6.61).

La longitud perforada fue de 11 metros y los testigos obtenidos se fueron depositando sobre cajas porta-testigos para poder facilitar de forma visual la columna litológica y servir posteriormente a la toma de las muestras para los análisis geoquímicos (Figura 6.115).

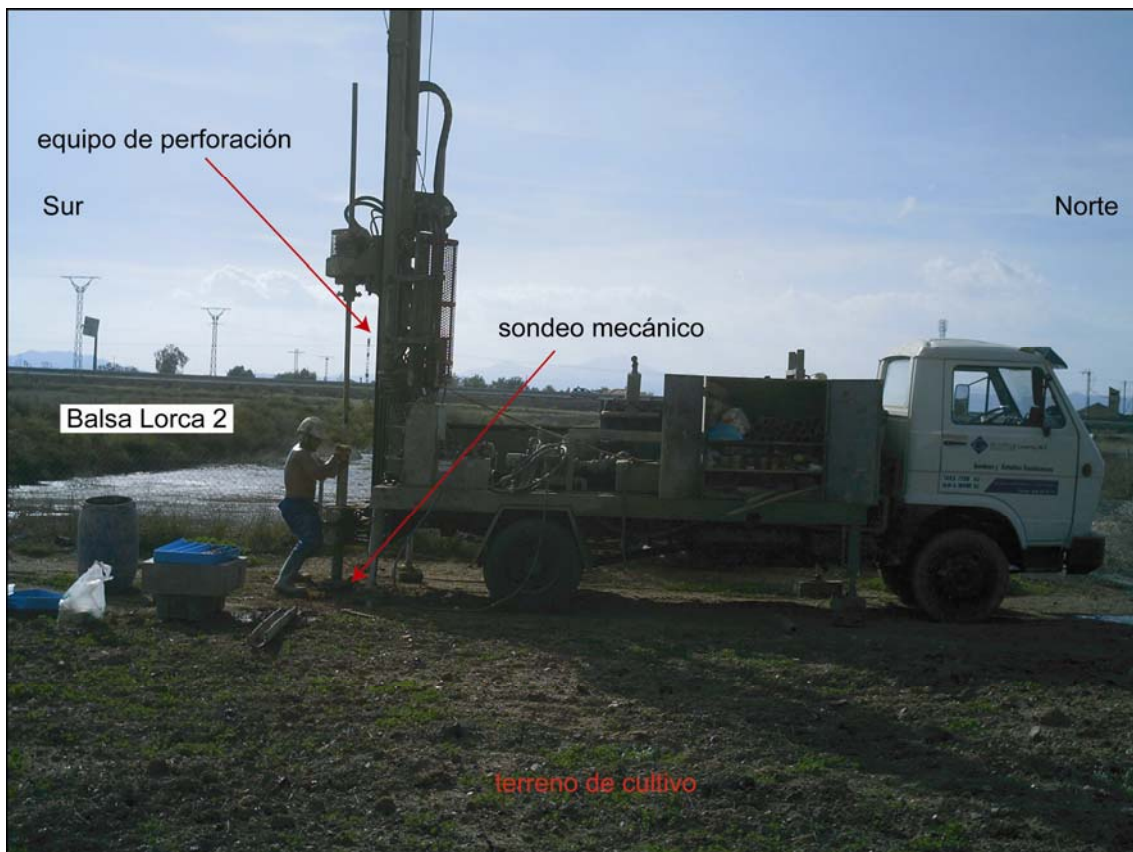


Foto 6. 61. Vista de la posición del sondeo mecánico en Lorca 2.

En la Figura 6.114 se presentan los porcentajes de arena, limo y arcilla de las muestras del sondeo analizadas, su clase textural y la comparación con la columna litológica levantada durante la realización del sondeo. Al igual que en el caso anterior se han sombreado con colores las filas que tienen en común algún porcentaje destacable de arena o arcilla. La inspección visual de las cajas porta-testigos determinó más horizontes litológicos que los obtenidos con el análisis de texturas, sin embargo, se

podría establecer como cuatro horizontes principales los existentes hasta los 11 metros atendiendo a la poca entidad de alguno de los horizontes establecido por el sondista. Es decir, una capa superficial de arenas, gravas y alguna costra calcárea para seguir a continuación con una capa de arena, arcilla y grava que daría paso a otra de mayor contenido en arenas y gravas para terminar con el comienzo de una con un mayor porcentaje en el contenido de arcilla.

Comparando con el sondeo de Lorca 1, aquí puede verse tramos de arenas y gravas de mayor espesor y un contenido en arcillas menor en los tramos intermedios del sondeo, lo que viene a corroborar una mayor facilidad en la progresión lateral del purín como quedó de manifiesto en el perfil exterior de tomografía eléctrica realizado en abril de 2005.

Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Sondeo Mecánico columna litológica Lorca 2
0	8,2	7,8	58,7	25,7	15,7	Franco Arenoso	suelo superficial
1	8,2	7,8	50,6	34,1	15,3	Franco	0,5 m
2	8,3	8,0	50,0	39,6	10,4	Franco	costra calcárea 0,9 m
3	8,3	7,8	43,7	42,1	14,2	Franco	arena y grava 1,7 m
4	8,5	8,0	66,6	27,3	6,1	Franco	arena, arcilla y grava
5	8,4	8,0	69,9	24,3	5,8	Franco Arenoso	
6	8,6	8,1	67,9	25,2	6,9	Franco Arenoso	arena y grava
7	8,7	8,2	66,9	27,5	5,6	Franco	
8	8,7	8,2	77,9	17,8	4,4	Franco Arenoso	
9	8,7	8,2	63,8	30,7	5,5	Franco Arenoso	
10	8,8	8,1	59,8	33,1	7,1	Franco Arenoso	9,9 m
11	8,6	8,0	41,9	46,1	12,0	Franco	arcilla y arena 11,0 m

Figura 6. 114. Tabla de valores de pH y clase textural de las muestras del sondeo de Lorca 2 analizadas, junto con la columna litológica atravesada.

Para apoyar lo anterior se ha colocado sobre la seudosección geoelectrónica de la Figura 6.103 los resultados litológicos y texturales del sondeo mecánico, ubicándolo en su posición exacta y se puede observar de forma clara como justamente sobre los horizontes de mayor contenido en arenas y gravas se dan zonificaciones de valores

bajos de resistividad eléctrica indicando la presencia de humedad y sales procedentes del purín, puesto que las arenas y gravas son materiales que tienen asociados mayores valores de resistividad eléctrica cuando están sin saturar o con contenidos muy bajos de arcilla. Además según la Figura 6.114 es bastante indicativo observar como a dicha profundidad, entre los 7 y los 10 metros de profundidad, también los valores de pH son los máximos de los obtenidos para todo el sondeo siendo sus valores superiores a 8,6 y clasificándolo como suelo alcalino.



Figura 6. 115. Vistas de las cajas porta-testigos del sondeo de Lorca 2.

### **6.4.6 Análisis geoquímico**

Se aprovecharon las muestras obtenidas cada metro de profundidad de los sondeos para ser sometidas a análisis de conductividad eléctrica. El valor de la conductividad eléctrica media del purín varía entre 14,81 dS/m (Lobera *et al.*, 1998) y 20,04 dS/m (Costa Yagüe, 1987), citados por Lobera *et al.*, (1998). A continuación se describen los resultados de conductividad eléctrica de las muestras de sondeo para cada uno de los grupos de balsas de Lorca.

#### **6.4.6.1 Conductividad eléctrica del sondeo Lorca 1**

En la Figura 6.116 se ha añadido una columna en la que se indican los valores de conductividad eléctrica obtenidos sobre las muestras del sondeo mecánico; del conjunto de valores destacan los mayores valores de conductividad eléctrica correspondientes para los 4 primeros metros del sondeo. Concretamente destacan los valores de las dos primeras muestras con valores de conductividad eléctrica (C.E.) superiores a 16 dS/m que clasifican al suelo como de salinidad elevada (Cobertera, 1993), si bien valores por encima de 5 dS/m como los existentes hasta los 4 metros de profundidad, clasificarían al subsuelo de salinidad media (Cobertera, 1993) que reflejarían una influencia clara del purín por su naturaleza salina y que viene a respaldar el análisis ofrecido para la tomografía eléctrica 2D (Figura 6.97).

Lorca 1 Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Conductividad Eléctrica dS/m
0	8,1	7,9	53,6	38,4	8,0	Franco	21,08
1	8,1	7,9	47,8	44,0	8,2	Franco	24,5
2	8,3	8,1	67,5	28,4	4,1	Franco Arenoso	7,09
3	8,3	8,0	55,9	35,7	8,5	Franco	6,14
4	8,2	7,9	39,0	42,7	18,3	Franco	5,42
5	8,4	8,0	57,7	34,9	7,5	Franco Arenoso	4,4
6	8,2	8,0	44,0	47,3	8,8	Franco	3,71
7	8,3	7,9	49,7	40,4	9,8	Franco	4,32
8	8,3	8,0	59,9	33,1	7,1	Franco Arenoso	4,47
9	8,3	8,0	52,6	37,4	10,1	Franco	4,11
10	8,5	8,0	52,8	39,0	8,3	Franco	2,7
11	8,5	7,9	32,7	50,0	17,3	Franco	3,04

Figura 6. 116. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo realizado en Lorca 1.

En la Figura 6.116 también se ha señalado el valor de conductividad eléctrica de 4,47 dS/m puesto que esta próximo a 5 dS/m y marca una tendencia alcista desde los 5 metros de profundidad para a continuación comenzar su descenso hasta los 10 metros donde alcanza un valor de 2,7 dS/m. Este valor de conductividad eléctrica podría estar relacionado con región afectada por el purín que la tomografía eléctrica 2D detectó con su perfil exterior (ver Figura 6.97) y respondería al por qué se tiene un aumento de la conductividad eléctrica frente a un horizonte textural caracterizado por arenas y gravas y bajos contenidos en arcillas.

A partir de los 11 metros de profundidad se detecta una débil progresión ascendente del valor de la conductividad eléctrica asociado a la aparición de un horizonte con un mayor contenido en arcillas.



### 6.4.6.2 Conductividad eléctrica del sondeo Lorca 2

Lorca 2 Nombre Muestra	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Arena	Limo %	Arcilla	Clase Textural	Conductividad Eléctrica dS/m
0	8,2	7,8	58,7	25,7	15,7	Franco Arenoso	7,18
1	8,2	7,8	50,6	34,1	15,3	Franco	6,74
2	8,3	8,0	50,0	39,6	10,4	Franco	6,64
3	8,3	7,8	43,7	42,1	14,2	Franco	5,38
4	8,5	8,0	66,6	27,3	6,1	Franco	3,2
5	8,4	8,0	69,9	24,3	5,8	Franco Arenoso	3,83
6	8,6	8,1	67,9	25,2	6,9	Franco Arenoso	2,98
7	8,7	8,2	66,9	27,5	5,6	Franco	2,77
8	8,7	8,2	77,9	17,8	4,4	Franco Arenoso	1,86
9	8,7	8,2	63,8	30,7	5,5	Franco Arenoso	2,25
10	8,8	8,1	59,8	33,1	7,1	Franco Arenoso	1,97
11	8,6	8,0	41,9	46,1	12,0	Franco	2,44

Figura 6. 117. Tabla de valores de conductividad eléctrica del sondeo realizado en Lorca 2.

La tabla de la Figura 6.117, también en este caso, destaca una influencia del purín hasta los 3 primeros metros de profundidad con valores de conductividad eléctrica superiores a 5 dS/m. No obstante, la pseudosección geoelectrica 2D (Figura 6.103) puso de manifiesto valores de resistividad eléctrica superiores a 65 ohm·m en el primer metro que estarían en desacuerdo con los datos del análisis geoquímico pero que podría ser explicado por encontrarse el material que hay en superficie labrado, durante la ejecución del perfil de tomografía eléctrica, dando lugar a un esponjamiento del terreno y, por consiguiente, una mayor porosidad (Foto 6.57); además unido a la presencia de costras calcáreas en superficie.

A partir de los 4 metros de profundidad y hasta los 6 metros los valores de conductividad eléctrica descienden por debajo de los 5 dS/m hasta alcanzar valores comprendidos en torno de los 3 dS/m; entre los 7 metros y los 11 metros de profundidad los valores de conductividad eléctrica son los propios del material original. Según la salinidad de las muestras de suelo analizadas, se puede deducir que el purín se ha

filtrado hasta una profundidad de 3-4 metros y que la elevada conductividad eléctrica de las muestras de suelo más superficiales, puede deberse a aplicaciones de purín del pasado o al uso de aguas muy salinas. No obstante, hay que volver a señalar que la tomografía eléctrica detectó influencia del purín por filtración en torno a los 6 metros de profundidad para ambas balsas tanto para los perfiles de tomografía eléctrica interiores como para el perfil exterior, por ello no es descabellado pensar que hasta los 6 metros de profundidad los valores de conductividad eléctrica que se sitúan próximos a 3 dS/m, y que clasifican al suelo de ligeramente salino, serían debidos a la influencia de la filtración purín y a partir de ahí ya son valores de conductividad eléctrica propios del material original.

#### **6.4.7 Discusión de los resultados del grupo de Lorca**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D han permitido extraer los análisis que a continuación desglosamos.

- La zona donde se asientan las balsas de purines es una región formada predominantemente por materiales aluviales de arenas y gravas con alguna intercalación de arcillas. Esto ha sido reflejado en las seudosecciones de tomografía eléctrica 2D y de tomografía eléctrica 3D con regiones de valores elevados de resistividad eléctrica ( $> 50 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) y que indican la no afección de estas zonas por la filtración acuosa del purín.
- El modelo de filtración detectado en ambas por geofísica balsas difiere ligeramente del modelo de filtración estudiado para el grupo de Fuente-Álamo (Murcia), en el sentido de que la zona afectada por la filtración del purín tiene una extensión lateral y vertical mayor que en Fuente-Álamo (Murcia) con una límites mucho más definidos debido al carácter aluvial de la zona y al volumen de purín embalsado durante largos periodos de tiempo.
- Los perfiles de tomografía eléctrica 2D exteriores a las balsas han definido de forma clara regiones afectadas por el purín, no obstante esta influencia, según la geofísica, va perdiendo intensidad conforme se va profundizando, lo que indicaría que el

penacho contaminante se mantienen en una región somera. Los análisis de conductividad eléctrica de las muestras del sondeo apoyan lo anterior porque únicamente reflejan altos valores de conductividad eléctrica, asociados a contenidos salinos, hasta profundidades de 4 metros con algún repunte a los 8 metros pero que a continuación se regresan los valores hasta niveles propios del material original.

- La técnica geofísica aplicada ha puesto de manifiesto que durante la etapa de limpieza del estiércol, los niveles de contaminación del subsuelo tienden a remitir, puesto que la región afectada disminuye aumentando ligeramente los valores de resistividad eléctrica, hay que tener en cuenta que estamos en una región con un clima semiárido donde la desecación de las balsas es muy rápida y esta pérdida de humedad favorece el aumento de la resistividad eléctrica.

## **7 Discusión General**

En este capítulo se agrupan las discusiones para cada una de las zonas de estudio según los resultados obtenidos y que han sido descritos y comentados en el Capítulo 6.

### ***7.1 Discusión de los Depósitos de estériles mineros***

#### **7.1.1 Depósito de estériles “El Lirio”**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D (ver Capítulo 6) han permitido identificar diferentes zonas dentro del depósito de estériles mineros, con base en sus características resistivas, que a continuación sintetizamos.

- Las seudosecciones eléctricas obtenidas han permitido determinar la profundidad de los estériles mineros a lo largo de los perfiles geoelectricos; esto ha sido corroborado por el sondeo mecánico, el cual alcanzó el zócalo mioceno a partir de los 13,50 metros. Esta información geoelectrica ha servido para obtener el volumen de material almacenado en el depósito con bastante precisión, valor que ha sido comparado con la información obtenida a través de la cubicación realizada a partir

de las fotografías aéreas realizadas en 1956, cuando el depósito se encontraba en sus primeras fases de recrecimiento (Faz *et al.*, 2003a).

- Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D señalan una región somera en la parte occidental del depósito, caracterizada por valores altos de resistividad eléctrica y, que según la información que se dispone del sondeo mecánico y de los análisis geoquímicos, es debido a la presencia en superficie de un material de naturaleza franco arenosa y con un pH alcalino. La naturaleza franco arenosa es debida a una pérdida de los finos debido a una clasificación gravimétrica durante las etapas de vertido y a efectos de erosión hídrica y eólica. Por otro lado, un pH alcalino indica procesos oxidativos de meteorización de los restos de sulfuros en superficie no muy intensos, hecho que se ve acrecentado por el clima mediterráneo semiárido; aunque los procesos de salinización ocurren especialmente en superficie, sin embargo, estos valores altos de resistividad eléctrica demuestran que en la medida que estas sales se solubilizan, se van evacuando hacia zonas más bajas (Faz *et al.*, 2006).
- Los análisis geoquímicos han aportado que los valores de pH ligeramente ácidos ocurren a cierta profundidad del depósito. Acompañando a una disminución del pH va un aumento de la conductividad eléctrica según los análisis geoquímicos de las muestras del sondeo. Esto último explica el por qué la tomografía eléctrica muestra regiones de resistividad eléctrica baja ( $< 8 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) a partir de los dos primeros metros de profundidad. Además los análisis geoquímicos de metales pesados han demostrado mayores contenidos de cobre, zinc, plomo y cadmio en las capas profundas del depósito lo cual favorece que las resistividades eléctricas obtenidas con tomografía eléctrica disminuyan (Faz *et al.*, 2005b).
- Los análisis geoquímicos de metales pesados sobre las muestras del sustrato han aportado valores que indican que no se ha producido una importante incorporación de zinc, cobre, plomo y cadmio al sustrato subyacente. La tomografía eléctrica ha reflejado importantes contrastes de resistividad eléctrica entre el estéril y el sustrato miocénico, lo que permite deducir que no hay transmisiones de lixiviación de estos metales.

- Todas las seudosecciones geoelectrica 2D y el bloque geoelectrico 3D, generado a partir de los perfiles de tomografía eléctrica 3D, muestran una región oriental del depósito con valores de conductividad eléctrica altos. Esta región se extiende desde la superficie hasta el contacto estéril-sustrato con una inclinación hacia el oeste. Esta región se caracteriza por presentar humedades significativas en superficie y la aparición de una vegetación autóctona espontánea, lo que se traduce en una posible filtración del agua hacia el interior del depósito durante épocas de lluvias. No obstante, sería necesario ejecutar algún sondeo en esta zona puesto que el sondeo mecánico realizado en la parte occidental del depósito no ha detectado el nivel freático en las diferentes inspecciones realizadas (Faz *et al.*, 2004).

### **7.1.2 Depósito de estériles “Brunita”**

Los estériles mineros son los subproductos generados a raíz de la actividad minera de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, como resultado del procesamiento minero-metalúrgico al que se sometió a los sulfuros metálicos; siendo estos procesamientos similares en las diferentes minas de la Sierra y dando lugar a depósitos, que salvo innovaciones puntuales, seguían el mismo procedimiento de vertido (ver Capítulo 5), de ahí que los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D en este depósito (ver Capítulo 6) son similares, en líneas generales, a los obtenidos en el depósito “El Lirio”. De hecho las variaciones que se han manifestado en los resultados se deben principalmente a las características mineralógicas de los materiales vertidos. Las diferentes zonas identificadas dentro del depósito de estériles mineros, con base en sus características resistivas, se sintetizan a continuación.

- Las seudosecciones eléctricas obtenidas han permitido determinar la profundidad de los estériles mineros a lo largo de los perfiles geoelectricos. Esto ha sido corroborado por el sondeo mecánico, el cual alcanzó el zócalo mioceno a partir de los 13,70 metros. Esta información geoelectrica ha servido para obtener el volumen de material almacenado en el depósito con bastante precisión, extremo éste que ha sido comparado con la información obtenida a través de la cubicación realizada a partir de las fotografías aéreas realizadas en 1956 cuando el depósito se encontraba en sus primeras fases de recrecimiento (Faz *et al.*, 2003b). Por ello, se puede

- concluir que la tomografía eléctrica se ha revelado muy eficaz para obtener la morfología del sustrato o para ubicar el material depositado (Martínez-Pagán *et al.*, 2005a).
- Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D han identificado una superficie muy conductora en el depósito, con valores inferiores a 8 ohm·m, donde se ha situado el sondeo mecánico y el cual ha confirmado valores de pH muy bajos en superficie que han llegado a alcanzar los 4,89 y valores de conductividad eléctrica de 11,83 dS/m; esto es debido a que los distintos compuestos del suelo se encuentran oxidados formando sulfatos, carbonatos, fosfatos, etc., y en profundidad se encuentran en forma de sulfuros, puesto que el ambiente es más reductor (Aracil *et al.*, 2005b). Por otra parte también se ha identificado otra superficie en el depósito más resistiva con valores superiores a 12 ohm·m y que según la inspección realizada sobre el depósito coincide con la presencia de suelo fuertemente compactado o endurecido con un alto grado de lajiosidad lo que disminuye la conductividad eléctrica vertical.
  - Los análisis geoquímicos han puesto de relieve la existencia de condiciones extremadamente ácidas entre los 9 y los 13 metros de profundidad con valores de pH en torno a 4,5. Esto también ha sido reflejado a través de los análisis de conductividad eléctrica con subidas del valor de este parámetro; hecho que también se refleja en los perfiles de tomografía eléctrica a través de las seudosecciones geoeléctricas 2D y del bloque 3D con valores inferiores a 8 ohm·m. Éste pone de manifiesto la idoneidad de la técnica de tomografía eléctrica para localizar y delimitar regiones ácidas puesto que, por lo general, se trata de regiones salinas lo que facilita el contraste de resistividad eléctrica entre el material y su entorno (Aracil *et al.*, 2004b).
  - Los análisis geoquímicos de metales pesados han demostrado mayores contenidos de cobre, zinc, plomo y cadmio en las capas profundas del depósito lo cual favorece que las resistividades eléctricas obtenidas con tomografía eléctrica disminuyan también. Hay que tener en cuenta que la resistividad eléctrica del zinc en estado puro a 25° C es de  $6,01 \cdot 10^{-8}$  ohm·m, lo que le da características conductoras; sólo es superado en conductividad eléctrica por el cobre, el cual tiene una resistividad

eléctrica a 25° C de  $1,71 \cdot 10^{-8}$  ohm·m. El resto de metales pesados, cadmio y plomo, tienen resistividades eléctricas algo superiores, sobre todo el plomo, con una resistividad eléctrica a 25° C de  $21,1 \cdot 10^{-8}$  ohm·m; pero en definitiva no dejan de ser buenos conductores eléctricos (Lide, 2000).

- Los análisis geoquímicos de metales pesados sobre las muestras del sustrato han aportado valores que indican que no se ha producido una importante incorporación de zinc, cobre, plomo y cadmio al sustrato subyacente. La tomografía eléctrica ha reflejado esto último con contrastes de resistividad eléctrica entre el estéril y el sustrato miocénico.
  
- Las seudosecciones geoelectricas 2D desplegadas sobre la zona de cárcavas y el bloque geoelectrico 3D, generado a partir de los perfiles de tomografía eléctrica 3D, muestran una región resistiva dentro del depósito formando una especie de lentejón con material conductor en superficie. La explicación a esto sería que los materiales más finos, tipo limo, como consecuencia de la erosión hídrica y de la clasificación gravimétrica durante las etapas de vertido, se han ido depositando en esta parte del depósito originando una capa conductora en superficie con valores inferiores a 8 ohm·m. Por otro lado, la erosión hídrica ha favorecido en profundidad el lavado de las posibles fisuras generadas durante el episodio de distensión al que se sometió a esta parte del depósito durante su rotura en el año 1973 (Faz *et al.*, 2003b). Este hecho, favorece la formación de estos cuerpos resistivos, denominados “lentejones”, en las seudosecciones geoelectricas y en el bloque geoelectrico 3D.

## **7.2 *Discusión de las Balsas de Purines***

### **7.2.1 Grupo de balsas de Fuente-Álamo (Murcia)**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D en este grupo de balsas han permitido extraer los análisis que a continuación se desglosan.

- Los resultados de la tomografía eléctrica 2D y de la tomografía eléctrica 3D han identificado adecuadamente los principales horizontes litológicos que han sido



cotejados por los análisis de texturas y por los testigos continuos. Esto ha permitido asignarle a cada capa de material un rango de valores de resistividad eléctrica (Martínez-Pagán *et al.*, 2005b).

- Las seudosecciones geoelectricas 2D y el bloque 3D geoelectrico han delimitado de forma adecuada la región del subsuelo afectada por la humedad y las sales del purín cuando éste se encuentra almacenado en las balsas durante tiempo prolongado para su desecación y ser aprovechado como fertilizante agrícola en fase sólida. Tanto la tomografía eléctrica 2D como la tomografía eléctrica 3D han obtenido una región afectada que en la mayoría de los casos no alcanza el horizonte arcilloso que se encuentra a partir de los 12 metros de profundidad; si bien, muestran vías por las cuales ha penetrado la humedad hasta alcanzar el paquete de arenas y gravas pero sin una progresión posterior clara (Martínez-Pagán *et al.*, 2006).
- Las seudosecciones geoelectricas 2D y el bloque 3D geoelectrico han demostrado que durante la etapa de limpieza del estiércol, los niveles de contaminación del subsuelo tienden a remitir, puesto que la región afectada disminuye quedando zonas fósiles de humedad o de contenidos salinos y donde en superficie comienza de nuevo a aumentar los valores de resistividad por la presencia de las costras calizas y la desaparición de la humedad; hay que tener en cuenta que estamos en una región con un clima semiárido donde la desecación de las balsas es muy rápida.
- Los resultados obtenidos para los perfiles de tomografía eléctrica exteriores a las balsas han dado regiones laterales del subsuelo, próximas a las balsas, afectadas por el purín que en muy pocos casos presentan una penetración en profundidad importante y que en cualquier caso existe una capa impermeable natural formada por arcillas a partir de los 12 metros de profundidad, que ha sido corroborada por los sondeos mecánicos.
- Los análisis de conductividad eléctrica realizados a las muestras de los sondeos mecánicos han permitido determinar el grado de filtración del purín en el subsuelo, siendo éste bastante somero puesto que los valores de conductividad eléctrica en ambos sondeos descienden de forma significativa a partir de los dos metros de

profundidad; este hecho corrobora de forma fiel lo obtenido en la tomografía eléctrica efectuada durante aquellas campañas donde prevalecían condiciones similares a las existentes durante la ejecución de los sondeos mecánicos. Por otro lado los análisis de conductividad eléctrica del sondeo n° 2 han puesto de relieve la aparición de un horizonte con predominio de arcilla a partir de los 11 metros de profundidad, situación que también se ha puesto de manifiesto con la tomografía eléctrica 2D.

### **7.2.2 Grupo de balsas de Lorca (Murcia)**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D han permitido extraer los comentarios que enumeramos a continuación.

- La zona donde se asientan las balsas de purines es una región formada predominantemente por materiales aluviales de arenas y gravas con alguna intercalación de arcillas. Esto ha sido reflejado en las seudosecciones de tomografía eléctrica 2D y de tomografía eléctrica 3D con regiones de valores elevados de resistividad eléctrica ( $> 50 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ ) y que indican la no afección de estas zonas por la filtración acuosa del purín.
- El modelo de filtración detectado en ambas balsas por geofísica difiere ligeramente del modelo de filtración estudiado para el grupo de Fuente-Álamo (Murcia), en el sentido de que la zona afectada por la filtración del purín tiene una extensión lateral y vertical mayor que en Fuente-Álamo (Murcia), con una límites mucho más definidos debido al carácter aluvial de la zona y al volumen de purín embalsado durante largos periodos de tiempo.
- Los perfiles de tomografía eléctrica 2D exteriores a las balsas han definido de forma clara regiones afectadas por el purín; no obstante, esta influencia, según la geofísica, va perdiendo intensidad conforme se va profundizando, lo que indicaría que el penacho contaminante se mantiene en una región somera. Los análisis de conductividad eléctrica de las muestras del sondeo apoyan lo anterior porque únicamente reflejan altos valores de conductividad eléctrica, asociados a contenidos

salinos, hasta profundidades de 4 metros con algún repunte a los 8 metros pero que a continuación regresan hasta niveles propios del material original.

- La técnica geofísica aplicada ha puesto de manifiesto que, durante la etapa de limpieza del estiércol, los niveles de contaminación del subsuelo tienden a remitir, puesto que la región afectada disminuye aumentando ligeramente los valores de resistividad eléctrica; hay que resaltar de nuevo que estamos en una región con un clima semiárido donde la desecación de las balsas es muy rápida y esta pérdida de humedad favorece el aumento de la resistividad eléctrica.

## 8 Conclusiones

### **8.1 Conclusiones de los Depósitos de estériles mineros**

De acuerdo a los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y la tomografía eléctrica 3D realizadas sobre los depósitos mineros, se puede concluir lo siguiente:

- Se ha revelado muy eficaz como técnica geofísica para la determinación del volumen de material vertido en los depósitos mineros y la obtención del relieve correspondiente al contacto estéril-sustrato rocoso.
- Conjuntamente con el empleo de la información proveniente del sondeo mecánico y de los análisis geoquímicos, permiten ayudar a la delimitación de regiones superficiales de naturaleza franco arenosa y con un pH alcalino y regiones donde existe una posible filtración de agua hacia el interior de depósito en épocas de lluvias; útil para trabajos de restauración y bioremediación sobre los depósitos mineros y para caracterizar las etapas de vertido del depósito.

- Ha sido capaz de relacionar la disminución de la resistividad eléctrica con valores de pH más ácidos con la profundidad. Además, si bien es difícil relacionar concentraciones de metales con valores de resistividad eléctrica, en este caso los valores inferiores de resistividad eléctrica han delimitado regiones del sondeo con los mayores contenidos de cobre, zinc, plomo y cadmio.
- Ha confirmado el hecho de que no se ha producido una importante incorporación de zinc, cobre, plomo y cadmio al sustrato subyacente, lo que demuestra la baja permeabilidad de los materiales del zócalo y la inexistencia de fracturas o fallas en el fondo de los depósitos estudiados que serían los principales accidentes geológicos que controlarían el flujo de los lixiviados de metales pesados, además de la presencia de galerías y pozos mineros.
- Es idónea para señalar, dentro del depósito, hacia dónde progresarían los lixiviados de metales pesados, lo que ayudarían a adoptar de forma adecuada medidas correctoras o la realización de actuaciones encaminadas a evitar que estos lixiviados progresen y puedan contaminar el medio hídrico.
- Desde el punto de vista geotécnico, se ha demostrado capaz de señalar zonas del depósito donde existe la presencia de fisuras provocadas durante episodios de distensión y que favorecen la erosión hídrica a través del lavado.

## **8.2 Conclusiones de las Balsas de Purines**

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica 2D y 3D en los dos grupos de balsas han permitido extraer las conclusiones que a continuación desglosamos:

- Identifican los horizontes litológicos con una resolución adecuada hasta 17 metros, siendo ésta la profundidad que se ha establecido *a priori* como suficiente para estudiar la posible contaminación por purín del subsuelo.
- Han delimitado eficazmente la región del subsuelo afectada por la humedad y las sales del purín. A través de un seguimiento estacional del efecto de la actividad de

las balsas de purín sobre el subsuelo se ha podido conocer el comportamiento del penacho contaminante, siendo este diferente si el subsuelo es de tipo coluvial (zona de Fuente-Álamo) o de tipo aluvial (zona de Lorca).

- Han puesto de manifiesto que la contaminación por purín sólo alcanza profundidades someras, siendo estas profundidades mayores en la zona de Lorca que en la zona de Fuente-Álamo; dicha afección tiende a remitir de forma rápida favorecida por la zona de clima semiárido en la que se encuentran las balsas de purines. En principio, este hecho garantizaría que la contaminación por purín no alcanzaría los acuíferos más superficiales.

### **8.3 Perspectivas**

- Sería deseable llevar a cabo algún sondeo mecánico más sobre los depósitos mineros y que se ubicaría sobre las zonas de los depósitos donde la tomografía eléctrica ha presentado mayores probabilidades de darse procesos de lixiviación por metales pesados.
- Sería interesante volver a aplicar estas técnicas *a posteriori* sobre los depósitos mineros en el caso de que se lleven a cabo actuaciones de enmienda o de bioremediación con el fin de evaluar geoelectricamente el comportamiento del material depositado en superficie.
- Respecto a las balsas de purines, la técnica de tomografía eléctrica ha resuelto adecuadamente los horizontes litológicos con contenido salino debido a la actividad de las balsas y ha determinado, junto a la información geoquímica, que no hay progresión del contaminante en profundidad; no obstante, la realización de análisis químicos de muestras de agua procedentes de sondeos próximos a las balsas de purines completaría el análisis abordado en esta Tesis Doctoral.
- Los estudios sobre balsas de purines sería aconsejable la realización de perfiles de tomografía eléctrica con orientación diferente a los realizados en esta Tesis Doctoral y poder evaluar cualquier tipo de anisotropía geoelectrica o una posible influencia

del purín almacenado sobre los perfiles exteriores. También se podría llevar a cabo algún vertido de agua salina a través de algún sondeo realizado para obtener con tomografía eléctrica cualidades hidráulicas de los terrenos sobre los que se asientan las balsas de purines. Finalmente, la aplicación de testificación geofísica permitiría determinar con mayor precisión las profundidades a las que se producen los cambios litológicos determinados con tomografía eléctrica y con los análisis de texturas.

## 9 Referencias

Abbas, A.M., Atya, M.A., Al-Sayed, E.A., Kamei, H. 2004. Assessment of groundwater resources of the Nuweiba area at Sinai Peninsula, Egypt by using geoelectric data corrected for the influence of near surface inhomogeneities. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 56, pp. 107-122.

Akcil, A., Koldas, S. 2005. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, in press, corrected proof, available online 28 April 2005.

Alcaraz, F.J. 1999. Manual de teoría y prácticas de geobotánica. DM, Murcia, 401 pp.

Alcaraz, F., Álvarez, J., Delgado, M.J., Faz, A., Inocencio, C. 1999. Recursos del medio natural. *Atlas del Medio Natural de la Región de Murcia*, ITGE, pp. 15-35.

A.N.C.O.L.D. (Australian National Committee On Large Dams). 1999. Guidelines on tailings dam design, construction and operation. 53 pp.

Annan, A.P., Cosway, S.W. 1991. Ground penetrating radar survey design. *Comunicación presentada en el 53<sup>rd</sup> Annual Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists*, Florence, Italy, May 26-30, 1991.

Annan, A.P., Davis, J.L. 1989. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, vol. 37, pp. 531-551.

Apparao, A. 1997. Developments in geoelectrical methods. A.A. Balkema, Rotterdam, 293 pp.



Aracil, E., Porres, J.A., Fernández A., **Martínez-Pagán, P.**, Maruri, U., Vallés, J. 2005a. Balsas mineras abandonadas y balsas de purines: dos problemas ambientales abordables mediante tomografía eléctrica. Póster presentado en la *Semana de la Ciencia de la Universidad de Burgos* (inédito).

Aracil, E., Faz, A., **Martínez-Pagán, P.**, Martínez-Martínez, S., Acosta, J.A., Fisher, T., Maruri, U. 2005b. Geochemical composition and geophysical characterization of “Brunita” mining pond, Cartagena, SE Spain. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Mine Water Association Congress*, Oviedo, España, pp. 295-302.

Aracil, E., Maruri, U., Vallés, J., **Martínez-Pagán, P.**, Porres, J.A. 2004a. Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica, *Ingeopres*, vol. 122, pp. 34-39.

Aracil, E., Porres, J.A., Faz, A., **Martínez-Pagán, P.**, Maruri, U., Vallés, J. 2004b. Balsas mineras abandonadas y balsas de purines: dos problemas medioambientales abordables mediante tomografía eléctrica. *Póster, IV Semana de la Ciencia*, Universidad de Burgos.

Aracil, E., Maruri, U., Porres, J.A., Espinosa, A.B. 2002. La tomografía eléctrica: una herramienta al servicio de la piedra natural. *Roc Máquina*, vol. 72, pp. 30-37.

Aragón, R. 1999. Delimitación de acuíferos. *Atlas del Medio Natural de la Región de Murcia*, ITGE, pp. 43-45.

Arranz, J.C. 1999. Síntesis edafológica. *Atlas del Medio Natural de la Región de Murcia*, ITGE, pp. 36-37.

Atallah, T. 1993. Conditions de valorisation du fumier et risques de lixiviation de l'azote. *Cahiers Agricultures*, vol. 2, pp. 26-35.

Atekwana, Elliot A., Atekwana, Estella A., Rowe, R.S., Werkema, D.D., Legall, F.D. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 56, pp. 281-294.

Ayala, F.J., Rodríguez, J.M. 1986. Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros. IGME, Madrid, 182 pp.

Barker, R.D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, vol. 54, pp. 1031-1037.

Barker, R.D. 1979. Signal contribution sections and their use in resistivity studies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 54, pp. 1031-1037.

Basset-Mens, C., Van der Werf, H. 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 105, pp. 127-144.

- 
- Benderitter, Y., Jolivet, A., Mounir, A., Tabbagh, A. 1994. Application of the electrostatic quadrupole to sounding in the hectometric depth range. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 31, pp. 1-6.
- Ben-Miloud, K. 1986. Geophysical mapping of the subsurface at a landfill site near North Bay, Ontario. *M. Sc. Project, Department of Earth Sciences*, University of Waterloo, 68 pp.
- Bentley, L.R., Gharibi, M. 2004. Two- and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site. *Geophysics*, vol. 69, pp. 674-680.
- Bernal, M.P., Roig, A., Madrid, R., Navarro, A.F. 1992. Salinity risks on calcareous soils following pig slurry applications. *Soils Use and Management*, vol. 8, pp. 125-130.
- Bernard, J. 2003. Short note on the depth of investigation of electrical methods. IRIS Instruments, Orléans. Francia. 8 pp.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W. 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. *Environmental Geology*, vol. 39, pp. 360-371.
- Bernstone, C., Dahlin, T. 1997. DC resistivity mapping of old landfills: two case studies. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2 (2), pp. 121-136.
- Bevc, D., Morrison, H.F. 1991. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment. *Geophysics*, vol. 56, pp. 769-777.
- Bourennane, H., King, D., Le Parco, R., Isambert, M., Tabbagh, A. 1998. Three-dimensional analysis of soil and surface materials by electrical resistivity survey. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 3, pp. 5-23.
- Breiner, S. 1973. Applications manual for portable magnetometers. Technical notes of Geometrics, Sunnyvale, California, 58 pp.
- Broome, J. 1991. Display and enhancement of aeromagnetic data with examples from Guysborough County, Nova Scotia. In Goodacre, A.K., Ed., *Interpretation of gravity and magnetic anomalies for non-specialists, Notes for Canadian Geophysical Union Short Course*, Geological Survey of Canada, pp. 249-284.
- Brunner, I., Friedel, S., Jacobs, F., Danckwardt, E. 1999. Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging. *Geophys J Int*, 136, pp. 771-780.
- B.S. (British Standards) 1377:1975. 1975. Methods of test for soils for civil purposes. British Standards Institution. Londres.
- Burger, H.R. 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface. Prentice Hall. New Jersey.

Buselli, G., Lu, K. 1999. Applications of some new techniques to detect groundwater contamination at mine tailings dams. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Oakland, CA. pp. 507-516.

Buselli, G., Lu, K. 2000. Detection of groundwater contamination with induced polarisation and resistivity methods using 64-channels receiver. *EAGE 62<sup>nd</sup> Conference and Technical Exhibition, Extended Abstract Book, D-07*, Glasgow, Scotland. 4 pp.

Buselli, G., Lu, K., Hwang, H.S. 1998. Minesite groundwater contamination mapping. *Exploration Geophysics*, vol. 29, pp. 296-300.

Buselli, G., Lu, K. 2001. Grounwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetical methods. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, pp. 11-23.

Butler, D.K., Llopis, J.L. 1990. Assessment of anomalous seepage conditions. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2: Environmental and Groundwater, Investigations in Geophysics, No. 5, Ed. Ward, S.H.*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 153-173.

C.A.A.M.A. (Consejería de Agricultura Agua y Medio Ambiente), Secretaría Sectorial de Agua y Medio Ambiente. Región de Murcia. 2001. Guía de buenas prácticas ambientales. Sector Agropecuario, 78 pp.

Calvo, M. 1996. Mineralogía. *Revista Bocamina "La Unión"*, vol. 2, pp. 14-35.

Campbell, D.L., Fitterman, D.V. 2000. Geoelectrical methods for investigating mine dumps. *Proceedings from the fifth International Conference on Acid Rock Drainage*, Denver, Colorado. pp. 1513-1523.

Cardarelli, E., Bernabini, M. 1997. Two case studies of the determination of parameters of urban waste dumps. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 36, pp. 167-174.

Carmichael, R.S. 1989. Practical handbook of physical properties of rocks and minerals. CRC Press, Inc., Florida, 741 pp.

Carpenter, P.J., Kaufmann, R.S., Price, B. 1990. Use of resistivity sounding to determine landfill structure. *Groundwater*, vol. 28, pp. 569-575.

Carpenter, P.J., Calkin, S.F., Kaufmann, R.S. 1991. Assessing a fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. *Geophysics*, vol. 56, pp. 1896-1904.

Casas, A., Himi, M., Tapias, J.C. 2005. Sensibility analysis of electrical imaging method for mapping aquifer vulnerability to pollutants. *P012 Extended Abstract of the Near Surface Geophysics Conference*, Palermo (Italy), 4 – 7 September, 4 pp.

Chambers, J.E., Ogilvy, R.D., Kuras, O., Cripps, J.C., Meldrum, P.L. 2002. 3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site. *Environmental Geology*, vol. 41, pp. 690-704.

- 
- Chambers, J., Ogilvy, R., Meldrum, P. 1999. 3D resistivity imaging of buried oil and tar contaminated waste deposits. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 4, pp. 3-14.
- Chapellier, D. 1987. *Diagraphies appliqués à l'hydrologie*. Lavoisier. Paris. 165 pp.
- Chouteau, M., Beaulieu, S. 2002. An investigation on application of the electrical resistivity tomography method to concrete structures. *Geophysics 2002*, Los Angeles, CA, Abril, 8 pp.
- Chouteau, M., Vallières, S., Toe, E. 2003. A multi-dipole mobile array for the non-destructive evaluation of pavement and concrete infrastructures: a feasibility study. *International Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering 2003*, Septiembre, Berlín, Alemania, Septiembre.
- Christensen, N.B., Sorensen, K. 2001. Pulled array continuous electrical sounding with an additional inductive source: an experimental design study. *Geophysical Prospecting*, vol. 49, pp. 241-254.
- Cobertera, E. 1993. *Edafología aplicada*. Ediciones Cátedra S.A., Madrid, 326 pp.
- Conesa, H.M. 2005. Restauración/estabilización de suelos contaminados por metales pesados como consecuencia de actividades mineras en la zona de Cartagena y La Unión. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Cartagena-Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 398 pp.
- Dahlin, T., Zhou, B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, pp. 379-398.
- Dahlin, T., Zhou, B. 2001. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with eight electrode arrays. *Procs. EEGS'01 (Engineering and Environmental Geophysics Society), ELEM01*, Birmingham, UK, 3-6 September 2001.
- Dahlin, T. 1993. *On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications*. Tesis doctoral. Universidad de Lund. Suecia. 187 pp.
- Dahlin, T. 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers and Geosciences*, vol. 27, pp. 1019-1029.
- Dahlin, T., Bernstone, C., Loke, M.H. 2002. A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, vol. 67, pp. 1692-1700.
- Dahlin, T., Loke, M.H. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, 38, pp. 237-259.
- Dahlin, T., Bernstone, C. 1997. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays. In *Proc SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)*, Wheat Ridge, USA, pp. 927-935.

Dahlin, T., Loke, M.H. 1997. Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional resistivity techniques. In *Proceedings 3<sup>rd</sup> Meeting Environmental and Engineering Geophysics, European Section*, Aarhus, Denmark, pp. 143-146.

Dahlin, T., Johansson, S., Landin, O. 1994. Resistivity surveying for planning of infrastructure. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Boston, Massachusetts, pp. 509-527.

Daily, W., Ramirez, A. 1995. Electrical resistance tomography during in-situ trichloroethylene remediation at the Savannah River Site. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 239-249.

Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D., Barber, W. 1995. Electrical resistance tomography experiments at the Oregon Graduate Institute. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, pp. 227-237.

Daniels, J.L., Keys, W.S. 1990. Geophysical well logging for evaluating hazardous waste sites. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol.1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics, No. 5, Ed. Ward, S.H.*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 263-285.

deGroot-Hedlin, C., Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional model from magnetotelluric data. *Geophysics*, vol. 55, pp. 1613-1624.

Delaloye, R., Reynard, E., Lambiel, C., Marescot, L., Monnet, R. 2003. Thermal anomaly and processes in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland). *The 8<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*, Zurich, Suiza, Julio, pp. 175-180.

Denis, A., Marache, A., Obellianne, T., Breysse, D. 2002. Electrical resistivity borehole measurements: application to an urban tunnel site. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 50, pp. 319-331.

Dey, A., Morrison, H.F. 1979. Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, pp. 1020-1036.

Dimri, V. 1992. Deconvolution and inverse theory. Elsevier, Amsterdam, 230 pp.

Draskovits, P., Simon, A. 1992. Application of geoelectric methods using buried electrodes in exploration and mining. *Geophysical Prospecting*, vol. 40, pp. 573-586.

Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, vol. 42, pp. 1020-1036.

Farquharson, C.G., Oldenburg, D.W. 1998. Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure. *Geophysical Journal International*, vol. 119, pp. 187-194.

Faz, A., **Martínez-Pagán, P.**, Aracil, E., Maruri, U. 2006. Aplicación de la tomografía eléctrica al estudio de los depósitos de estériles mineros "El Lirio" y "Brunita" (Murcia). Rodríguez, R. (Ed.), I.G.M.E., 29 pp. (en edición).

---

Faz, A., Lobera, J.B., Andujar, M., Acosta, J.A., Carmona, D.M., Llona, M., Martínez-Martínez, S., **Martínez-Pagán, P.**, Palop, A., Plana, V., Tortosa, J.L., Zanuzzi, A. 2005a. Pig slurries sustainable reutilization: potential application for crop production and soil remediation, water recycling and disposal risk assessment. *Comunicación Oral, International Conference on Industrial Crops and Rural Development*, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo, Murcia.

Faz, A., Aracil, E., **Martínez-Pagán, P.**, Acosta, J.A., Martínez-Martínez, S., Maruri, U., Martínez-Segura, M.A. 2005b. Geochemical and geophysical techniques application to characterize a mining silt pond from Cartagena-Unión (Murcia): potential pollution pathways. *Comunicación Oral, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Mine Water Association Congress*, Oviedo, España, pp. 295-302.

Faz, A., Martínez-Martínez, S., Acosta, J.A., Peñas, J.M., Aracil, E., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., **Martínez-Pagán, P.**, Martínez, M.A., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2004. Risk assesment and restoration possibilities of some abandoned mining silt ponds in the Region de Murcia: Study Case "El Lirio". *Póster, 4<sup>th</sup> International Conference on Land Degradation*, Cartagena, España.

Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., **Martínez-Pagán, P.**, Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2003a. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "El Lirio" (Nº 0978-1-0026). Universidad Politécnica de Cartagena, 263 pp.

Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., **Martínez-Pagán, P.**, Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2003b. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "Brunita" (Nº 0977-4-0021). Universidad Politécnica de Cartagena, 259 pp.

Fitterman, D.V., Stewart, M.T. 1986. Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, vol. 51, pp. 995-1005.

Flathe, H. 1955. A practical method of calculating geoelectrical model graphs for horizontally stratified media. *Geophysical Prospecting*, vol. 3, pp. 268-294.

Fountain, D.K. 1972. Geophysical case histories of disseminated sulphide deposits in British Columbia. *Geophysics*, vol. 37, pp. 142-159.

Frohlich, R.K., Urish, D.W. 2002. The use of geoelectrics and test wells for the assessment of groundwater quality of a coastal industrial site. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 50, pp. 261-278.

Fundación Sierra Minera. 2001. Medio ambiente y empleo en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Fundación Sierra Minera. 256 pp.

Gallego, A., Monllor, J. 1993. Recursos naturales: la minería. En “Estructura económica de la Región de Murcia”. Colino, J. (Dir.). Editorial Cívitas, Madrid.

García, C. 2004. Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España). *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Cartagena, 424 pp.

García, C., Hernández, T., Roldán, A., Albaladejo, J., Castillo, V. 2000. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a practice in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: effect on their microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 32, pp. 1173-1181.

Geotomo Software. 2004. RES2DINV ver. 3.54. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least square method. 130 pp.

Geotomo Software. 2001. RES3DINV ver. 2.1. Rapid 3D resistivity and IP inversion using the least-squares method. 50 pp.

Gex, P. 1998. Notes du cours d'électromagnétisme. Institut de Géophysique de Lausanne, Suisse, 23 pp.

Gilbert, R., Douma, M., Dyke, L., Good, R.L., Hunter, J.A., Hyde, C., Michaud, Y., Pullan, S.E., Robinson, S.D. 1999. A handbook of geophysical techniques for geomorphic and environmental research. Open file 3731, Geological Survey of Canada, 125 pp.

Glenn, W.E., Hohmann, G.W. 1981. Well logging and borehole geophysics in mineral exploration. In *Economic Geology*, 75<sup>th</sup> Anniversary Volume, Ed. Skinner, B.J., pp. 850-862.

Glynn, P.D., Plummer, L.N. 2005. Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeology Journal*, vol. 13, pp. 263-287.

Goldman, M., Rabinovich, B., Rabinovich, M., Gilad, D., Gev, I., Schirov, M. 1994. Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 31, pp. 27-52.

Granda, A., Cambero, J.C. 2000. Introducción al método de la tomografía eléctrica. *Revista Ingeopres*, nº 80, pp. 68-70.

Grant, F.S., West, G.F. 1965. Interpretation theory in applied geophysics. McGraw Hill, Toronto, 582 pp.

Greenhouse, J.P., Gudjurgis, P., Slaine, D. 1997. An introduction to near-surface and environmental geophysical methods and applications. Reference Notes, SAGEEP Short Course, Ed. Versteeg, R., Denver, Colorado, 131 pp.

Guérin, R. 2005. Borehole and surface-based hydrogeophysics. *Hydrogeological Journal*, vol. 13, pp. 251-254.

- Guérin, R., Bégassat, P., Benderitter, Y., David, J., Tabbagh, A., Thiry, M. 2004a. Geophysical study of the industrial waste land in Mortagne-du-Nord (France) using electrical resistivity. *Near Surface Geophysics*, vol. 2, pp. 137-143.
- Guérin, R., Munoz, M.L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., Grellier, S. 2004b. Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. *Waste Management*, vol. 24, pp. 785-794.
- Guérin, R. 2004c. *Contribution à l'hydrogéophysique*. Memoria de habilitación para la dirección de investigaciones. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 262 pp.
- Guérin, R., Panissod, C., Thiry, M., Benderitter, Y., Tabbagh, A., Huet-Taillanter, S. 2002. La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) – III – Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 173, pp. 471-477.
- Guiziou, F., Béline, F. 2005. In situ measurement of ammonia and greenhouse gas emissions from broiler house in France. *Bioresource Technology*, vol. 96, pp. 203-207.
- Hacini, Y., **Martínez-Pagán, P.**, Chapellier, D., Aracil, E. 2006. Caracterización petrofísica y mineralógica de un acuífero perialpino de gravas empleando la testificación geofísica. Yacimiento de pruebas de Kappelen, Suiza. *Comunicación de la 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla (aún no publicado).
- Hearst, J.R., Nelson, P.H. 1985. Well logging for physical properties. McGraw Hill, 571 pp.
- Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A. 1986. New prospect in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics*, vol. 51, pp. 585-594.
- Hinze, W.J. 1990. The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol.1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics, No. 5, Ed. Ward, S.H.*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 75-126.
- Hördt, A., Greinwald, S., Hoheisel, A., Neubauer, F.M., Schaumann, G., Tezkan, B. 2000. Joint 3D interpretation of radiomagnetotelluric (RMT) and transient electromagnetic (TEM) data from an industrial waste deposit in Mellendorf, Germany. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 4, pp. 151-170.
- Horvitz, L. 1939. On geochemical prospecting. *Geophysics*, vol. 4, pp. 210-225.
- Hunt, R.E. 1984. Geotechnical engineering investigation manual. McGraw-Hill Book Co.
- Iakubovskii, I.V., Liajov, L.L. 1980. Exploración eléctrica. Editorial Reverté. Barcelona. 421 pp.
- I.C.A.R.D (International Conference on Acid Rock Drainage). 2000. *Proceedings from 5<sup>th</sup> International Conference on Acid Rock Drainage*, Denver, EEUU, 1559 pp.



I.G.M.E. (Instituto Geológico y Minero de España). 1974. Inventario Nacional de Balsas y Escombreras. Murcia, 151 pp.

I.N.M. (Instituto Nacional de Meteorología). 1998. Memorándum climatológico descriptivo del aeródromo de San Javier. Centro Meteorológico Territorial de Murcia.

INGEOMUR. 2002. Estudio hidrogeológico de las balsas de vertido de purines y su entorno. Granja porcina Salvador Martínez Navarro (MU-2103051), 31 pp.

IRIS Instruments. 2004. Magnetic resonance sounding: step-by-step operation of NUMIS systems. IRIS Instruments, Orleans, France, 6 pp.

IRIS Instruments. 2001. Syscal switch v. 11.4. *User's manual*, Orléans. Francia. 66 pp.

I.T.G.E. (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1993a. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 978, (28-39).

I.T.G.E. (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1993b. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 977, (27-39).

I.T.G.E. (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1993c. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 954, (26-38).

I.T.G.E. (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1993d. Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 975, (25-39).

I.T.G.M.E. (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1999. Inventario Nacional de Balsas Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Cartagena,

Johansson, S., Dahlin, T. 1996. Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 1, pp. 229-247.

Kalenov, E.N. 1987. Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales. MOPU. Madrid.

Karlýk, G., Ali Kaya, M. 2001. Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey. *Environmental Geology*, vol. 40, pp. 725-731.

Keller, G.V., Frischknecht, F.C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press. London, 523 pp.

Keller, G.V. 1988. Rock and mineral properties. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol.1: Theory, Investigations in Geophysics No. 3*, Ed. Nabighian, M.N., Society of Exploration Geophysicists, pp. 13-51.

Koefoed, O. 1979. Geosounding principles, 1. *Methods in Geochemistry and Geophysics, No 14A*, Elsevier, 276 pp.

- 
- Kunetz, G., Rocroi, J.P. 1969. Traitement automatique des sondages electriques automatic processing of electrical soundings. *Geophysical Prospecting*, vol. 18, pp. 157-198.
- Lankston, R.W. 1990. High-resolution refraction seismic data acquisition and interpretation. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 45-72.
- Lataste, J.-F. 2002. *Evaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton par mesure de résistivités électriques*. Tesis doctoral. Université de Bordeaux I. 346 pp.
- Legchenko, A., Beauce, A., Guillen, A., Valla, P., Bernard, J. 1997. Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2, pp. 173-190.
- Li, Y., Oldenburg, D.W. 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophys J Int*, 109, pp. 343-362.
- Lide, D.R. 2000. CRC handbook of chemistry and physics. CRC Press, London.
- de Lima, O.A.L., Sato, H.K., Porsani, M.J. 1995. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 34, pp. 93-108.
- Linares, F. 2001. La crisis de la comarca minera de Cartagena-La Unión (1987-1991). Ayuntamiento de Cartagena. 295 pp.
- Linderholm, P., Bertsch, A., Renaud, P. 2004. Resistivity probing of multi-layered tissue phantoms using microelectrodes, *Physiological Measurement*, vol. 25, pp. 645-658.
- Lines, L.R., Newrick, R.T. 2004. Fundamentals of geophysical interpretation. Geophysical monograph series nº 13, Society of Exploration Geophysicists, 274 pp.
- Lines, L.R., Treitel, S. 1984. Tutorial: A review of least squares inversion and its application to geophysical problem. *Geophysical Prospecting*, vol. 32, pp. 159-186.
- Lionheart, W.R.B. 2004. EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges, and recent developments, *Physiological Measurement*, vol. 25, pp. 125-142.
- Lobera, J.B., Martínez, P., Ferrández, F., Martín, J. 1998. Reutilización agronómica de los purines de cerdo. Serie técnica y de estudios Nº 21, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Consejería de Agricultura Agua y Medio Ambiente, 162 pp.
- Loke, M.H. 2001. RES2DMOD ver. 3.0. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods. 20 pp.

Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, 61 pp.

Loke, M.H., Barker, R.D. 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, vol. 44, pp. 131-152.

Loke, M.H., Barker, R.D. 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, vol 44, pp. 499-523.

Loke, M.H., Barker, R.D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, pp. 1682-1690.

Llona, M. 2005. *Utilización agronómica de purines de cerdo en broccoli y sandía en condiciones mediterráneas semiáridas. Influencia en el sistema suelo-planta. Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena. 374 pp.

Maillol, J.M., Seguin, M.-K., Gupta, O.P., Akhauri, H.M., Sen, N. 1999. Electrical resistivity tomography survey for delineating uncharted mine galleries in West Bengal, India. *Geophysical Prospecting*, vol. 47, pp. 103-116.

Manteca, J.I., Ovejero, G. 1992. Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de la Unión-Cartagena, Bética oriental. *Recursos Minerales de España*. C.S.I.C. Edit. C.S.I.C. Col. Textos Universitarios, 115, pp. 1085-1101.

Marcuello, A. 2005. Notes sobre el problema invers discret. Dept. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, 12 pp.

Mares, S. 1984. Introduction to applied geophysics. Kluwer Academic Publishers. Praga. 581 pp.

Marescot, L., Monnet, R., Baron, L., Lambiel, C., Reynard, E., Delaloye, R., Chapellier, D. 2001. 2D electrical resistivity imaging in mountain permafrost studies: three challenging surveys in the Swiss Alps and Jura Mountains. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> EEGS-ES meeting*, Birmingham, Inglaterra, pp. 104-105.

Marescot, L., Chapellier, D. 2003a. Resistivity surveying applied to hydrogeological characterisation of Quaternary paleo-valleys. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> EEGS-ES meeting*, Praga, República Checa, 31 agosto-4 septiembre.

Marescot, L., Chapellier, D. 2003b. 2D resistivity tomography applied to the study of Quaternary paleo-valleys. *Proceedings of the First Swiss Geoscience Meeting*, Basilea, Suiza, 28-29 noviembre.

Marescot, L., Liaci, S., Chapellier, D. 2003a. Etude géoélectrique des cours d'eau interglaciaires à l'Ouest de la ville de Fribourg (Suisse). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, vol. 96, pp. 261-273.

---

Marescot, L. 2004. *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis*. Tesis doctoral. Universidad de Lausanne. Suiza. 208 pp.

Marescot, L., **Martínez-Pagán, P.** 2004. Ejemplos de aplicación del índice DOI (Depth of investigation) en tomografía eléctrica. *Revista Ingeopres*, vol. 132, pp. 40-45.

Marescot, L. 2003. Imagerie électrique pour géologues. Acquisition, traitement, interpretation. Notes du cours d'imagerie électrique. Institut de Geophysique de Lausanne, Suisse, 62 pp.

**Martínez-Pagán, P.**, Faz, A., Aracil, E., Rios, A.C. 2006. Aplicación de técnicas geofísicas y geoquímicas a diferentes problemas relacionados con la contaminación ambiental en balsas de purines de la Región de Murcia (España). *Comunicación Oral, 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla.

**Martínez-Pagán, P.**, Aracil, E., Maruri, U., Faz, A. 2005a. Tomografía eléctrica 2D/3D sobre depósitos de estériles mineros. *Revista Ingeopres*, nº 138, pp. 34-36.

**Martínez-Pagán, P.**, Faz, A., Fisher, T., Aracil, E., Maruri, U. 2005b. Potential use of 2D electrical tomography in slurry ponds to establish environmental pollution. *Póster, Proceedings of the Near Surface Meeting (EAGE)*, Palermo, Italy.

**Martínez-Pagán, P.**, Aracil, E., Faz, A. 2004. Técnicas geoelectricas para la detección y monitorización de filtraciones en embalses. *Revista Ingeopres*, nº 133, pp. 28-30.

Maturana, S., Bernárdez, M.J., Sánchez-Oro, J.J., Carrasco, I. 1996. Historia. *Revista Bocamina "La Unión"*, vol. 2, pp. 56-69.

Mazac, O., Kelly, W.E., Landa, I. 1986. A hydrogeophysical model for relationships between electrical and hydraulic properties of aquifers. *Journal of Hydrology*, 79, pp. 1-19.

McGechan, M.B., Wu, L. 1998. Environmental and economic applications of some slurry management options. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 71, pp. 273-283.

McNeill, J.D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. *Technical Note TN-5*, Geonics Limited, Mississauga, Canada, 22 pp.

McNeill, J.D., Labson, V.F. 1991. Geological mapping using VLF radiofields. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol.2: Applications, Investigations in Geophysics No. 3*, Ed. Nabighian, M.N., Society of Exploration Geophysicists, pp. 521-640.

McNeill, J.D. 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 191-218.

Meju, M.A. 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 115-150.

Meju, M.A. 2003. Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice. Course Notes Series, No. 6, 4<sup>th</sup> ed., Society of Exploration Geophysicists, 296 pp.

Menke, W. 1984. Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic Press Ins., Orlando, Florida.

Michot, D. 2003. *Intéret de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle interparcellaire*. Tesis doctoral. Université de Paris 6, 395 pp.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, M.A.P.Y.A. (2001). [www.mapya.es](http://www.mapya.es)

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, M.A.P.Y.A. (2003). [www.mapya.es](http://www.mapya.es)

Misselbrook, T.H., Nicholson, F.A., Chambers, B.J. 2005. Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresource Technology*, vol. 96, pp. 159-168.

Monier-Williams, M.E., Greenhouse, J.P., Mendes, J.M., Ellert, N. 1990. Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2: Environmental and Groundwater, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 41-55.

Moyle, P.R., Fay, J.M., Friedel, M.J. 1994. Integrated geophysical characterization of mine-waste sites in the Cœur d'Alene mining district, Idaho. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 857-868.

Mwenifumbo, C.J. 1991. Borehole geophysics in environmental applications. *Preprint, CIM Annual General Meeting*, Vancouver, April 28 – May 2.

Naudet, V., Revil, A., Bottero, J.Y., Bégassat, P. 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, pp. 2091, doi:10.1029/2003GL018096.

Ogilvy, R., Meldrum, P., Chambers, J. 1999. Imaging of industrial waste deposits and buried quarry geometry by 3-D resistivity tomography. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 3, pp. 103-113.

Olayinka, A.I., Yaramanci, U. 1999. Choice of the best model in 2-D geoelectrical imaging: case study from a waste dump site. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 3, pp. 221-244.

Oldenburg, D., Li, Y. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, vol. 64, pp. 403-416.

- 
- Olhoeft, G.R. 1986. Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity, in *Proc. Of the National Water Well Assoc. Conf. on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*, Nov. 12-14, Houston.
- Olhoeft, G.R. 1992. Geophysical detection of hydrocarbon and organic chemical contamination. In the *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, SAGEEP'92, vol. 2, pp. 587-595.
- Orellana, E. 1972. Prospección geoeléctrica en corriente continua. Biblioteca Técnica Philips. Madrid. 523 pp.
- Ovejero, G., Jacquin, J.P., Servajean, G. 1976. Les minéralisations et leur contexte géologique dans la Sierra de Cartagena. (Sud-Est de l'Espagne). *Bull. Soc. Géol. France*. (7) t. XVIII, 3, pp. 619-633.
- Palacky, G.J. 1988. Resistivity characteristics of geologic targets, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol.1: Theory, Investigations in Geophysics, No. 3, Ed. Nabighian, M.N.*, Society of Exploration Geophysicists, pp. 53-129.
- Palacky, G.J. 1991. Application of the multi-frequency horizontal loop EM method in overburden investigations. *Geophysical Prospecting*, vol. 39, pp. 1061-1082.
- Panissod, C. 1997. *Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des structures en 3-D*. Tesis doctoral. Université de Paris 6, 238 pp.
- Panissod, C., Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, J., Tabbagh, A. 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*. vol. 63, pp. 1542-1550.
- Parasnis, D.S. 1997. Principles of applied geophysics. Chapman and Hall. 5<sup>th</sup> ed. London, 429 pp.
- Parasnis, D.S. 1970. Principios de geofísica aplicada. Paraninfo, Madrid, 208 pp.
- Park, S. 1998. Fluid migration in the vadose zone from 3-D inversion of resistivity monitoring data. *Geophysics*, vol. 63, pp. 41-51.
- Park, S.K., Van, G.P. 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, vol. 56, pp. 951-960.
- Paterson, N. 1995. Application of geophysical methods to the detection and monitoring of acid mine drainage. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 181-189.
- Patra, H.P., Nath, S.K. 1999. Schlumberger geoelectric sounding in ground water. Balkema, Rotterdam, 153 pp.

Pazdirek, O., Blaha, V. 1996. Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. *EAGE 58<sup>th</sup> Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts*, Amsterdam.

Peech, M. 1965. Hydrogen-ion activity. In C.A. Black (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.D.A. vol. 2, pp. 914-916.

Pekeris, C.L. 1940. Direct method of interpretation in resistivity prospecting. *Geophysics*, vol. 5, pp. 31-46.

Penman, A.D.M. 1996. A guide to tailings dams and impoundments. Design, construction, use and rehabilitation. *Bulletin 106*, UNEP-PNUE, Paris, 239 pp.

Plata, J.L., Rubio, F.M. 2006. Instrumentación disponible para la medición de sondeos de resonancia magnética. *Comunicación de la 5<sup>a</sup> Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla (aún no publicado).

Plata, J.L., Rubio, F. 2002. MRS experiments in a noisy area of a detrital aquifer in the south of Spain. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 50, pp. 83-94.

Plata, J.L. 2000. Técnicas convencionales de geofísica de superficie aplicadas en hidrogeología. En "Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología". Olmo, M., López, J.A. (ed.). IGME. Gráficas Chile. Madrid. pp. 21-32.

Porres, J.A. 2003. *Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica. Aplicación al yacimiento arqueológico de Clunia*. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos. 433 pp.

Porsani, J.L., Filho, W.M., Elis, V.R., Shimeles, F., Dourado, J.C., Moura, H.P. 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination pluma in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 55, pp. 199-209.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa, 2<sup>a</sup> Edición.

Pratt, M. 1965. Potassium and sodium. In C. A. Black (Ed.) *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA, vol. 2, pp. 1022-1030.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. 1992. Numerical recipes in C: The art of scientific computing. Cambridge University Press, 1020 pp.

Pullan, S.E., Hunter, J.A. 1990. Delineation of buried bedrock valleys using the optimum offset shallow seismic reflection technique. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 3: Geotechnical, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 75-87.

Puy, J. 1981. Procedimiento de sondeos. Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear. 2<sup>a</sup> ed. Madrid, 667 pp.

Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M., Ilaghi, O. 2001. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, pp. 33-41.

R.D. 1310/1.990. Real Decreto 1310/1.990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE, nº 262, pp. 32339-32340.

Reynard, E., Delaloye, R., Baron, L., Chapellier, D., Devaud, G., Lambiel, C., Marescot, L., Monnet, R. 2003. Glacier/permafrost relationships in recently deglaciated forefields of small alpine glaciers (Penninic Alps, Valais, Western Switzerland). *The 8<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*, Zurich, Suiza, Julio, pp. 947-952.

Reynolds, J.M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons Ltd. Chichester. England, 796 pp.

Rider, M. 2002. The geological interpretation of well logs. 2ª Ed. Revisada, Rider-French Consulting Ltd, Escocia, 280 pp.

Risse, L.M., Cabrera, M.L., Franzluebbbers, A.J., Gaskin, J.W., Gilley, J.E., Killorn, R., Radcliffe, D.E., Tollner, W.E., Zhang, H. 2001. Land application of manure for beneficial reuse. White paper on Animal Agriculture and the Environmental for National Center for Manure and Animal Waste Management, MWPS, Ames, IA, 38 pp.

Ritz, M., Robain, H., Pervago, E., Albouy, Y., Camerlynck, C., Descloitres, M., Mariko, A. 1999. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, vol. 47, pp. 85-101.

Robain, H., Bobachev, A. 2002. X2IPI: Tool box for 2D DC measurements with SYSCAL equipment. User Manual, Institut de Recherche pour le Développement, 24 pp.

Roberts, R.G., Hinze, W.J., Leap, D.I. 1989. A multi-technique geophysical approach to landfill investigations. In *Pro. 3<sup>rd</sup> Nat. Outdoor Action Conf. on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring and Geophysical Methods*, National Water Well Association, pp. 797-811.

Robinson, E.S., Çoruh, C. 1988. Basic exploration geophysics. Wiley. 576 pp.

Robles-Arenas, V.M., García, C., Rodríguez, R., Manteca, J.I., Candela, L. 2004. Impacto de la minería sobre los recursos hídricos de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (España). Groundwater flor understanding from local to regional scales, XXXIII Congreso IAH, 7<sup>th</sup> Congress ALHSUD, Zacatecas, México, Octubre de 2004. ISBN: 970-32-1749-4.

Rodríguez-Estrella, T. 2006. Hidrogeología de la Región de Murcia. Universidad de Murcia, 36 pp. (En edición).

Rodríguez-Estrella, T. 2000. Transformaciones físicas, químicas y biológicas, por la acción de las aguas del trasvase Tajo-Segura, en la unidad hidrogeológica del Campo de



Cartagena y en su vecino Mar Menor (Murcia, España). *Hydrogéologie*, vol. 3, pp. 23-37.

Rodríguez-Estrella, T. 1995. Funcionamiento hidrogeológico del Campo de Cartagena. *Hidrogeología de la A.E.H.S.*, Granada, vol. 11, pp. 21-38.

Rodríguez-Estrella, T. 1987. Problemática de la presencia de gases en las aguas subterráneas del Valle del Guadalentín (Murcia). *IV Simposio de Hidrogeología*, Palma de Mallorca, pp. 117-137.

Rolandi, B. 1954. Sucinta historia de la minería cartagenera desde su mismo origen. Actas conmemorativas de la creación del Cuerpo de Ingenieros de Minas. Madrid.

Sáinz de Baranda Graf, B. 1996. Geología. *Revista Bocamina "La Unión"*, vol. 2, pp. 4-9.

Roman, I. 1963. The Kernel function in the surface potential for a horizontally stratified earth. *Geophysics*, vol. 28, pp. 232-249.

Roy, J., Lubczynski, M. 2003. The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. *Hydrogeology Journal*, vol. 11, pp. 455-465.

Roy, A., Apparao, A. 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, pp. 943-959.

Rubio, F.M., Plata, J.L. 2006. Estudio mediante SRM en algunos acuíferos aluviales del río Ebro. *Comunicación de la 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla (aún no publicado).

Rust, W.M. 1938. A historical review of electrical prospecting methods. *Geophysics*, vol. 3, pp. 1-6.

Sánchez, Y., Himi, M., Tapias, J.C., Puigcerver, D., Carmona, J.M., Font, X., Viladevall, M., Casas, A. 2006. Análisis de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación difusa mediante tomografía eléctrica. *Comunicación de la 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Sevilla (aún no publicado).

Sasaki, Y. 1994. 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics*, 59, pp. 1839-1848.

Sauck, W.A. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44 (2-3), pp. 151-165.

Schröder, J.J., Scholefield, D., Cabral, F., Hofmans, G. 2004. The effects of nutrients losses from agriculture on ground and surface water quality: the position of science in developing indicators for regulation. *Environ. Sci. Policy*, vol. 7 (1), pp. 15-23.

Schumacher, D. 2000. Surface geochemical exploration for oil and gas: New life for an old technology. *The Leading Edge*, pp. 258-261.

- 
- Serra, O., Serra, L. 2000. Diagraphies – Acquisition et applications. Editions Serralog. Paris. 586 pp.
- Silvester, P.P., Ferrari, R.L. 1996. Finite elements for electrical engineers. 3<sup>rd</sup> ed., Cambridge University Press, 512 pp.
- Slater, L., Binley, A.M., Daily, W., Johnson, R. 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 85-102.
- S.M.M.P.E. (Sociedad Minero Metalúrgica Peñarroya España). 1983. Libro del centenario 1881-1981. Madrid, 757 pp.
- S.M.M.P (Sociedad Minero Metalúrgica Peñarroya). 1980. Lavadero Roberto. *Monografía – 80*, Portman, Murcia, 85 pp.
- Sorensen., K. 1994. Pulled array continuous electrical profiling. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Boston, Massachusetts, pp. 977-983.
- Spitzer, K., Kümpel, H.J. 1997. 3D FD resistivity modelling and sensitivity analyses applied to a highly resistive phonolitic body. *Geophysical Prospecting*, 45, pp. 963-982.
- Steeple, D.W., Miller, R.D. 1990. Seismic reflection methods applied to engineering, environmental and groundwater problems. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 1-30.
- Stefanescu, S.S., Schlumberger, C., Schlumberger, M. 1930. Sur la distribution électrique autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales homogènes et isotropes. *Le Journal de Physique et le Radium*, vol. 1 serie 7<sup>a</sup>, pp. 132-140.
- Stegena, L. 1961. On the principles of geochemical oil prospecting. *Geophysics*, vol. 26, pp. 447-451.
- Tabbagh, A. 2005. Reconnaissance géophysique pour la genie civil. Apuntes del UMR 7619 SISYPHE, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 40 pp.
- Tabbagh, A., Hesse, A., Grard, R. 1993. Determination of electrical properties of the ground shallow depth with an electrostatic quadrupole: field trials on archaeological sites. *Geophysical Prospecting*, vol. 41-4, pp. 579-597.
- Tabbagh, A., Panissod, C., Benech, C., Dabas, M., Jolivet, A., Guérin, R. 2002. Un outil de reconnaissance géophysique en milieu urbain: la prospection électrostatique. *Revue Française de Géotechnique*, vol. 101, pp. 3-10.
- Tarantola, A. 1987. Inverse problem theory. Elsevier, Amsterdam.
- Tarantola, A. 2005. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, 358 pp.

Taylor, R.W., Fleming, A.H. 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water*, vol. 26, pp. 464-474.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 2004. Applied geophysics. Cambridge University Press. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, 770 pp.

Timofeev, V.M., Rogozinski, A.W., Hunter, J.A., Douma, M. 1994. A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP'94*, Boston, Mass., vol. 2, pp. 701-716.

U.S. Army Corps of Engineers (U.S.A.C.E.). 1979. Geophysical exploration. Engineer Manual EM 1110-1-1802, Department of the Army, Washington, DC, 313 pp.

U.S.D.A. (United States Department of Agriculture). 2003. Keys to Soil Taxonomy. U.S.D.A. (ed) 8th Eds. Washington, D.C., 326 pp.

U.S.D.A (United States Department of Agriculture). 1996. Rango de valores de conductividad eléctrica. En <http://www.eda.etsia.upm.es/docencia/AmpEda2/CATALOGACI%C3%93N%20PROP IEDADES%20DEL%20SUELO%2003-04.doc>.

Vanhala, H., Soininen, H., Kukkonen, I. 1992. Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial Hill environment, *Geophysics*, vol. 57, pp. 1014-1017.

Varian, R.H. 1962. Ground liquid prospecting method and apparatus. US Patent 3019383.

Vera, J.A. (editor). 2004. Geología de España. SGE-IGME, Madrid, 884 pp.

Vick, S.G. 1990. Planning, desing and analysis of tailings dams. Bitech Publishers, Ltd. Canada, 361 pp.

Vickery, A., Hobbs, B.A. 2003. Resistivity imaging to determine clay cover and permeable units at an ex-industrial site. *Near Surface Geophysics*, vol. 1, pp. 21-30.

Vilar, J.B., Egea, P.M. 1990. La minería murciana contemporánea (1840-1930). ISBN: 84-505-1119-4, 389 pp.

Vilar, J.B., Egea, P.M., Fernández, J.C. 1991. La minería murciana contemporánea (1930-1985). Instituto Tecnológico Geominero de España. ISBN: 84-7840-050-8, Madrid.

Wang, T., Stodt, J., Stierman, D., Murdoch, L. 1991. Mapping hydraulic fractures using a borehole-to-surface electrical resistivity method. *Geoexploration*, vol. 28, pp. 349-369.

Ward, S.H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. In *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1: Review and Tutorial, Investigations in Geophysics No. 5*, Ed. Ward, S.H., Society of Exploration Geophysicists, pp. 147-189.

Ward, S.H., Parry, W.T., Nash, W.P., Sill, W.R., Cook, K.L., Smith, R.B., Chapman, D.S., Brown, F.H., Whelan, J.A., Bowman, J.R. 1978. A summary of the geology, geochemistry, and geophysics of the Roosevelt Hot Springs thermal area, Utah. *Geophysics*, vol. 43, pp. 1515-1542.

Watanabe, F.S., Olsen, S.R. 1965. Test of ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO<sub>3</sub> extracts from soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, pp. 677-678.

Watson, G.N. 1995. A treatise on the theory of Bessel functions. Cambridge Mathematical Library, Cambridge.

Waxman, M.H. y Smits, L.J.M. 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 8, pp. 107-122.

Werkema, D.D., Atekwana, E.A., Endres, A.L., Sauck, W.A., Cassidy, D.P. 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, pp. 1647-1651.

Yaramanci, U. 2000. Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 181-196.

Yaramanci, U., Kiewer, M. 2000. Geoelectrical characterisation of disturbed rock zone in Opalinus clay (Mont-Terri / Switzerland). *Proceedings of 6<sup>th</sup> Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Bochum, Germany.

Zambaz, C., Messeiller, M. 2004. *Etude géoélectrique d'un aquifère côtier et de ses interactions avec la mer dans la baie d'Ho, Danemark*. Diploma de Geología. Université de Lausanne, Suiza, 132 pp.

Zhdanov, M.S., Keller, G.V. 1994. The geoelectrical method in geophysical exploration. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, No. 31, Elsevier, Amsterdam, 873 pp.

Zhdanov, M.S. 2002. Geophysical inverse theory and regularization problems. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, No. 36, Elsevier, Amsterdam, 609 pp.

## Anexo A: Principios básicos de los métodos eléctricos

### **Densidad de corriente en un terreno homogéneo.**

El flujo de corriente en un medio está basado sobre el principio de la conservación de la carga y viene expresado por la siguiente relación (Telford *et al.*, 2004):

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

Siendo  $\vec{J}$  la densidad de corriente en amperios por metro cuadrado ( $\text{A/m}^2$ ),  $t$  el tiempo en segundos (s), y  $Q$  la densidad de carga en culombios por metro cúbico ( $\text{C/m}^3$ ). La expresión (A.1) es también conocida como la *ecuación de continuidad* (Patra y Nath, 1999). En regiones con una conductividad finita, la carga no se acumulará durante el flujo de corriente (omitiendo el caso de los conductores electrolítico) por lo tanto bajo esta premisa  $Q$  se anula y la expresión anterior se reduce a:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{A.2})$$

La Ley de Ohm relaciona la densidad de corriente  $\vec{J}$  y el campo eléctrico  $\vec{E}$ , en voltios por metro (V/m) a través de la siguiente expresión:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{A.3})$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del medio, en siemens por metro (S/m). Como el campo eléctrico es el gradiente de un potencial escalar,

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{A.4})$$

Siendo  $V$  el potencial eléctrico en voltios (V); así, combinando las expresiones (A.3) y (A.4), nos queda:

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \nabla V \quad (\text{A.5})$$

Si ahora introducimos la expresión (A.5) en la expresión (A.2) tenemos:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V) = 0 \quad (\text{A.6})$$

La expresión (A.6) es válida para medios isotrópicos. Desarrollando la expresión anterior nos queda como:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \cdot \nabla^2 V = 0 \quad (\text{A.7})$$

Además si el medio es homogéneo, es decir, la conductividad  $\sigma$  es constante en él, entonces la expresión (A.7) puede escribirse como:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{A.8})$$

Esta es la ecuación de Laplace, válida para un medio homogéneo en ausencia de fuentes de corriente,  $Q = 0$ , (Orellana, 1972). Si la expresamos en coordenadas cilíndricas ( $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$ ) viene dada por:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (\text{A.9})$$

Y en coordenadas esféricas ( $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) por:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right] = 0 \quad (\text{A.10})$$

Esta expresión es muy importante desde el punto de vista de los sondeos eléctricos verticales (SEV) y de las calicatas eléctricas para poder obtener información geoelectrónica del subsuelo.

### **Electrodo de corriente puntual sobre un terreno homogéneo**

Como requisito para poder evaluar la distribución del potencial en un terreno estratificado horizontalmente se debe calcular el potencial normal debido a una fuente de corriente puntual en superficie. En un medio homogéneo e infinito de resistividad  $\rho$ , expresada en ohmios-metro (Ohm·m), hallamos el valor del potencial  $V$  en cualquier punto a través de la ecuación de Laplace. Debido a la simetría respecto a  $\theta$  y  $\varphi$ , la ecuación de Laplace se simplifica:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{A.11})$$

Integrando (A.11) hallamos que:

$$V = C_1 + \frac{C_2}{r} \quad (\text{A.12})$$

Siendo  $C_1$  y  $C_2$  constantes de integración. Como el potencial se toma cero a una gran distancia de la fuente puntual de corriente, ya que en el infinito el potencial se anula, la constante de integración  $C_1 = 0$ , luego tenemos que:

$$V = \frac{C_2}{r} \quad (\text{A.13})$$

La expresión anterior del potencial eléctrico nos indica que en un medio infinito, homogéneo e isótropo las superficies equipotenciales son superficies esféricas de radio  $r$  y con centro en la fuente puntual y, que las líneas del campo eléctrico y las líneas de corriente serán radiales y perpendiculares a las superficies equipotenciales. Ahora la densidad de corriente (A.5) se expresa, en forma escalar, como:

$$J = -\sigma \cdot \frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{C_2}{r^2} \quad (\text{A.14})$$

La corriente total que atraviesa una superficie esférica de radio  $r$  viene dada por:

$$4\pi r^2 \cdot J = \frac{4\pi}{\rho} \cdot C_2 \quad (\text{A.15})$$

De donde despejando obtenemos el valor para la constante de integración  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{I\rho}{4\pi} \quad (\text{A.16})$$

Sabiendo que  $I$  es la intensidad de corriente, en amperios (A) que penetra en el terreno a través de la fuente puntual de corriente.

Para investigaciones geoelectricas es más adecuado estudiar el caso de un medio semi-infinito en lugar de un medio infinito. Ahora, en lugar de considerar la corriente total que atraviesa una superficie esférica de radio  $r$  se considera una superficie semiesférica con lo que la expresión (A.15) queda modificada como:

$$2\pi r^2 J = \frac{2\pi}{\rho} \cdot C_2 \quad (\text{A.17})$$

Obteniendo para la constante de integración  $C_2$  el valor de:

$$C_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (\text{A.18})$$

Sustituyendo el valor de la constante de integración en la expresión (A.13) obtenemos:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (\text{A.19})$$

Que nos indica el valor del potencial,  $V$ , que se obtendría en cualquier punto  $P_1$  situado a una distancia  $r$  de una fuente puntual  $A$  de corriente  $I$  que se encuentra en la superficie de un terreno semi-infinito, homogéneo e isótropo (Figura A.1).

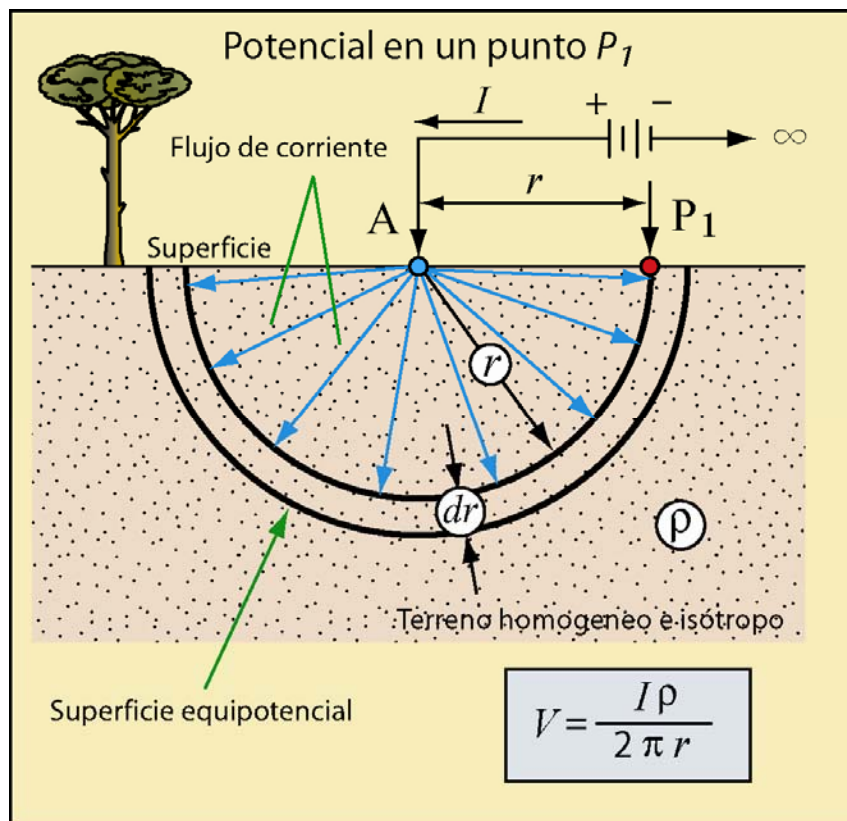


Figura A.1. Potencial en un punto  $P_1$  provocado por una fuente de corriente puntual  $A$  (Burger, 1992).

Sin embargo, en la práctica normalmente se tienen dos electrodos de corriente sobre la superficie del terreno, uno positivo ( $A$ ), que envía corriente al terreno, y otro negativo ( $B$ ) que recibe la corriente de regreso así, el potencial en cualquier punto  $P_1$ , debido a este dispositivo bipolar, debe cumplir el principio de superposición (Parasnis, 1997), siendo su valor:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{A.20})$$



Siendo  $r_1$  y  $r_2$  las distancias de los electrodos A y B al punto  $P_1$  de medida de potencial respectivamente (Figura A.2).

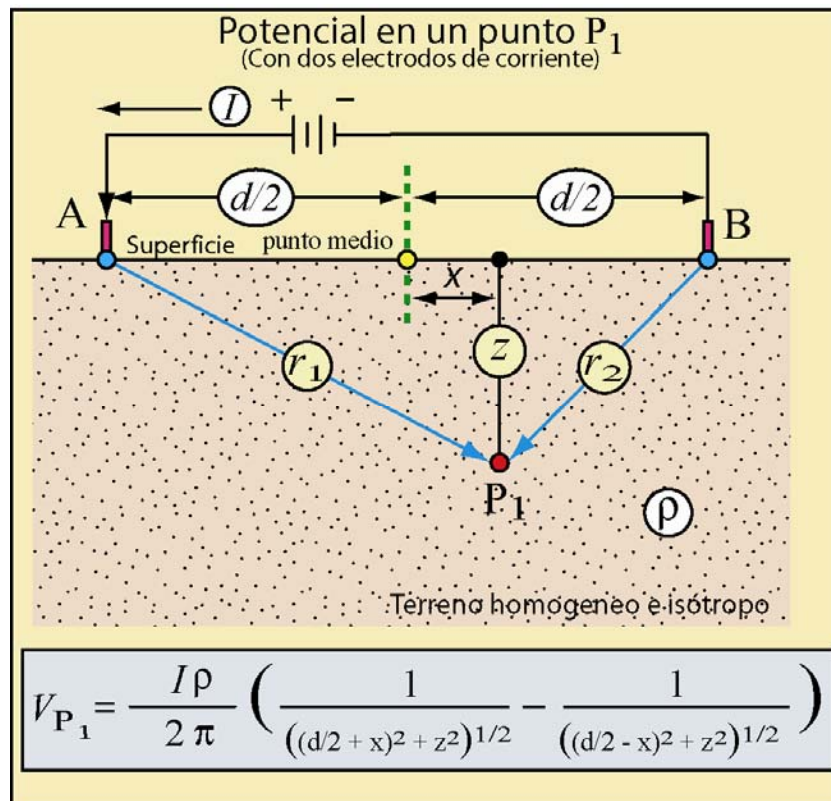


Figura A.2. Potencial en un punto  $P_1$  provocado por dos electrodos de corriente A y B (Burger, 1992).

### **Medida de la resistividad con dispositivos tetrapolares**

Si una corriente continua  $I$  es introducida en un medio homogéneo e isótropo por medio de dos electrodos de corriente puntuales A y B (Figura A.3 y Figura A.4). La diferencia de potencial entre dos puntos M y N situados en superficie viene dada por la expresión (A.20).

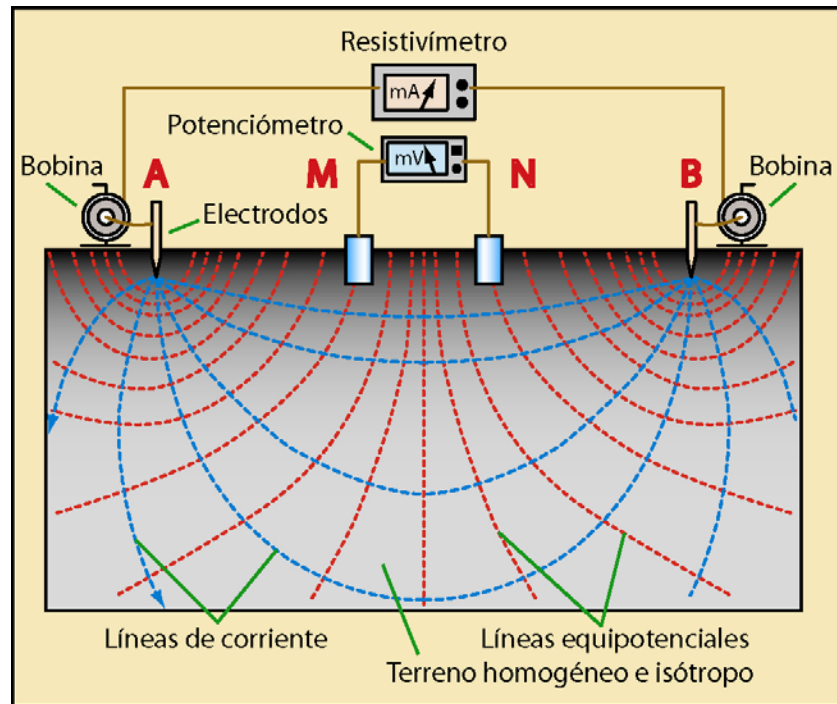


Figura A.3. Dispositivo tetrapolar sobre un terreno homogéneo e isótropo.

Sin embargo, la expresión (A.20) debe ser modificada para incorporar la presencia de un nuevo electrodo de medida quedando entonces como:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (\text{A.21})$$

Donde  $AM$  (Figura A.4) es la distancia entre el electrodo de corriente A y el electrodo de medida M,  $BM$  es la distancia entre el electrodo de corriente B y el electrodo de medida M,  $AN$  es la distancia entre el electrodo de corriente A y el electrodo de medida N,  $BN$  es la distancia entre el electrodo de corriente B y el electrodo de medida N,  $\rho$  es la resistividad del terreno, e  $I$  es la intensidad de corriente introducida a través de los electrodos.

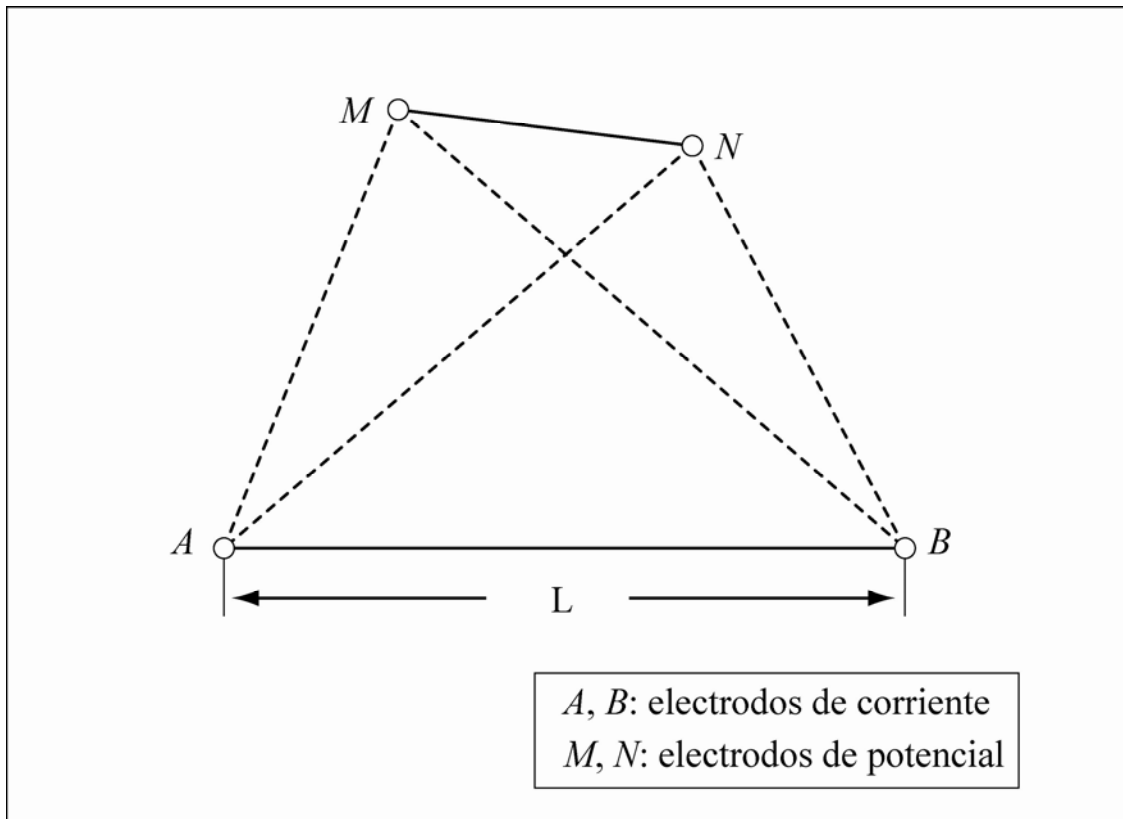


Figura A.4. Electrodo puntuales sobre un terreno homogéneo e isótropo.

Existen diversos tipos de dispositivos: dispositivos electródicos lineales, dispositivos dipolares, dispositivos de agrupación, dispositivos apantallados, y por último, dispositivos apantallados de agrupación (Orellana, 1972). De todos ellos, los más importantes, por su empleo, son los dispositivos lineales y los dispositivos dipolares. Los dispositivos dipolares son generalmente reservados para los sondeos eléctricos de exploración más profunda, es decir más allá de 1 km de profundidad (Patra y Nath, 1999).

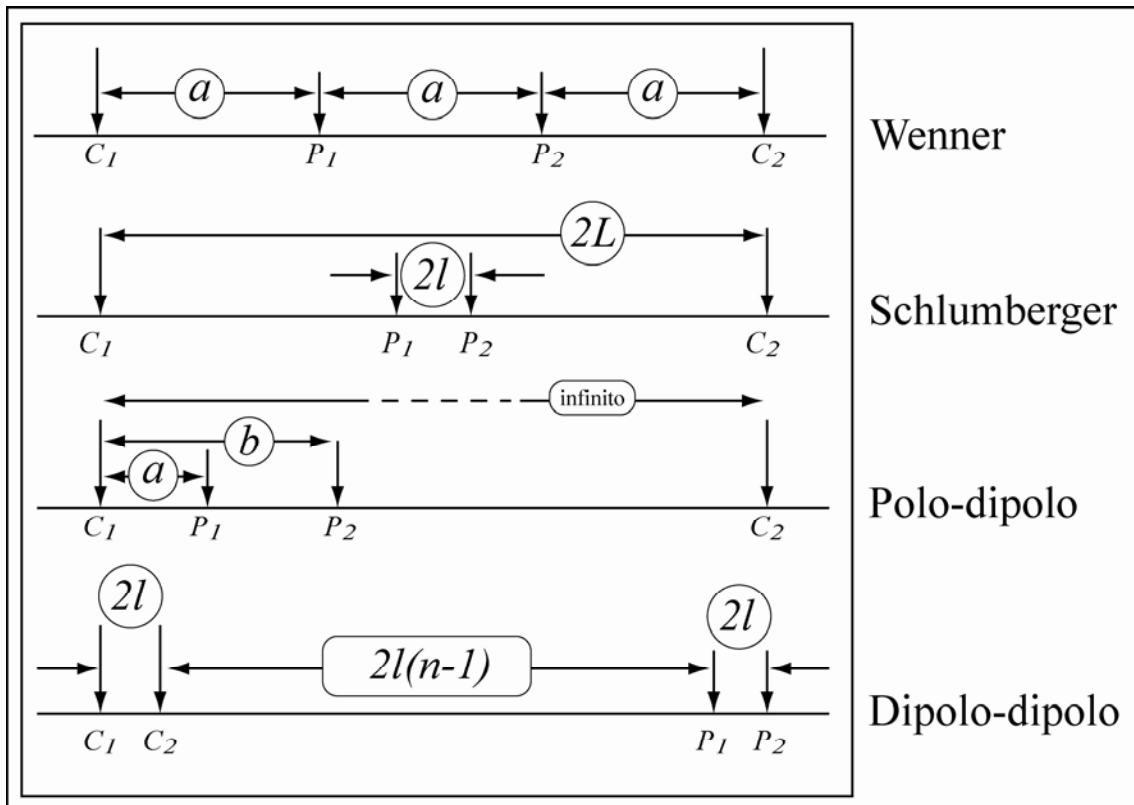


Figura A.5. Tipos de dispositivos electrónicos lineales más comunes (Telford *et al.*, 2004)

La Figura A.5 ilustra los dispositivos lineales más comúnmente empleados. Los dos primeros han sido desde un inicio los más populares debido al desarrollo de la seudosección en trabajos de polarización inducida, pero actualmente la configuración dipolo-dipolo también ha conseguido un nivel similar de empleo (Telford *et al.*, 2004).

En los dispositivos simétricos Wenner y Schlumberger, los electrodos  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $P_1$  y  $P_2$  (también denominados como electrodos A, B, M y N, respectivamente) se sitúan sobre una línea recta y los electrodos  $P_1$  y  $P_2$  se colocan simétricamente respecto al centro del perfil  $C_1C_2$  (Figura A.5).

Siguiendo la notación de la Figura A.5 el valor medido de la resistividad,  $\rho$ , en un terreno homogéneo e isótropo, con un dispositivo Wenner, viene dado por (Patra y Nath, 1999):

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{A.22})$$

Si, ahora, la resistividad es medida con un dispositivo simétrico Schlumberger su valor valdrá:

$$\rho = \frac{\pi L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{A.23})$$

A los dispositivos Wenner y Schlumberger también se les conoce como dispositivo de potencial y dispositivo de gradiente de potencial respectivamente (Patra y Nath, 1999; Telford *et al.*, 2004; Orellana, 1972).

Hasta aquí hemos considerado el valor de la resistividad real de un terreno semi-infinito, homogéneo e isotrópico; pero para medios no homogéneos hay que definir una nueva cantidad,  $\rho_a$ , conocida como resistividad aparente. La resistividad aparente de una formación geológica es igual a la resistividad real,  $\rho$ , de un terreno ficticio homogéneo e isotrópico en el cual, para el mismo dispositivo eléctrico e igual intensidad de corriente  $I$ , se mediría la misma diferencia de potencial,  $\Delta V$ , que en la formación geológica considera. La resistividad aparente depende de la geometría y de las resistividades de los elementos constituyentes del medio geológico dado. La resistividad aparente cumple la siguiente expresión:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{A.24})$$

Siendo  $K$  un factor geométrico, expresado en metros (m), que dependerá de la geometría del dispositivo de medida empleado.

### **Flujo de corriente en un terreno homogéneo y anisótropo**

En un medio homogéneo y anisótropo la conductividad forma un tensor simétrico caracterizado por seis componentes (Patra y Nath, 1999). Orientando los ejes de coordenadas de forma apropiada para formar ejes principales de anisotropía, ahora los valores de la densidad de corriente,  $\vec{J}$ , y del campo eléctrico,  $\vec{E}$ , vienen dados en coordenadas rectangulares como:

$$J_x = \frac{1}{\rho_x} E_x ; J_y = \frac{1}{\rho_y} E_y ; J_z = \frac{1}{\rho_z} E_z \quad (\text{A.25})$$

Donde  $x, y, z$  son los ejes principales de anisotropía. La ecuación de continuidad (A.2) puede ahora escribirse en términos de los ejes principales como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{E_x}{\rho_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{E_y}{\rho_y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{E_z}{\rho_z} \right) = 0 \quad (\text{A.26})$$

Para un terreno homogéneo la expresión anterior se reduce a:

$$\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.27})$$

La solución a dicha ecuación es:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2}} \quad (\text{A.28})$$

Siendo  $C$  una constante de integración,  $V$  el valor del potencial en un punto  $(x, y, z)$ . De la expresión (A.28) vemos que:

$$\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2 = K^2 \quad (\text{A.29})$$

Esto quiere decir que las curvas equipotenciales de un terreno homogéneo y anisótropo son elipsoides con los ejes principales coincidentes con la anisotropía. Según lo anterior las densidades de corriente para cada uno de dichos ejes vienen dadas como:

$$\begin{aligned} J_x &= -\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{C \cdot x}{\sqrt{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^3}} \\ J_y &= -\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{C \cdot y}{\sqrt{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^3}} \\ J_z &= -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{C \cdot z}{\sqrt{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^3}} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

La anisotropía en un cuerpo geológico puede ser debida a diversas razones (Patra y Nath, 1999). Es sabido que en materiales estratificados, el rumbo de la estratificación ofrece un camino favorable para el flujo de la corriente eléctrica. La razón puede ser el gran número de cristales con formas planas o alargadas (mica, caolín, etc.). Durante su deposición, ellos tomaron naturalmente una orientación paralela a la sedimentación. La zona superficial, debido a la materia orgánica, a la deposición de minerales en el suelo, etc., también manifiestan un carácter anisotrópico. En exploración eléctrica, es habitual caracterizar las propiedades eléctricas de un macizo rocoso a través de dos parámetros llamados la resistividad longitudinal  $\rho_s$ , paralela al plano de estratificación, y la resistividad transversal  $\rho_t$ , normal al plano de estratificación. De forma que cualquier anisotropía dentro del propio plano de estratificación se supone despreciable ya que es muy pequeña en la mayor parte de los casos prácticos (Patra y Nath, 1999).

Si el plano de estratificación es elegido como plano  $xy$ , que coincide con la orientación de la superficie de separación aire-terreno, entonces la expresión (A.27) se reduce a:

$$\frac{1}{\rho_s} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.31})$$

Las superficies de equipotencial son dadas por:

$$x^2 + y^2 + \frac{\rho_t}{\rho_s} z^2 = \text{constante} \quad (\text{A.32})$$

Expresión que define elipsoides de revolución alrededor del eje  $z$ . De la expresión (A.32) se definen dos nuevos parámetros:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_s}} \quad (\text{A.33})$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_s}$$

Donde  $\lambda$  se denomina coeficiente de anisotropía o pseudo-anisotropía (Orellana, 1972) y  $\rho_m$  es una resistividad cuadrática media o simplemente una resistividad media del medio (Orellana, 1972).

Por lo tanto la solución de la expresión (A.31) ahora se puede escribir como:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\rho_s} \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2}} \quad (\text{A.34})$$

Donde  $C$  es la constante de integración. Y la densidad de corriente tiene la expresión:

$$J = (J_x^2 + J_y^2 + J_z^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{C \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\sqrt{\rho_s^3} \sqrt{(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2)^3}} \quad (\text{A.35})$$

Sabiendo que la constante de integración  $C$ , para el caso de una fuente puntual de corriente  $I$  colocada sobre la superficie de un terreno homogéneo y anisotrópico, tiene como expresión:

$$C = \frac{I}{2\pi} \lambda \sqrt{\rho_s^3} \quad (\text{A.36})$$

Las expresiones (A.34) y (A.35) quedan ahora como:

$$V = \frac{I \rho_m}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2}} \quad (\text{A.37})$$

$$J = \frac{I \lambda}{2\pi} \frac{R}{\sqrt{(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2)^3}} \quad (\text{A.38})$$

En un caso más general donde el plano de estratificación  $xy$  no coincida con la orientación de la superficie de separación aire-terreno (Figura A.6), ahora representada por un nuevo sistema de coordenadas  $(x', y', z')$ , la expresión (A.37) se verá

modificada. Esta expresión la obtendremos pasando de un sistema de coordenadas a otro a través de la siguiente transformación (Orellana, 1972):

$$\begin{aligned}x &= x' \\y &= y' \cos \alpha + z' \sin \alpha \\z &= -y' \sin \alpha + z' \cos \alpha\end{aligned}\tag{A.39}$$

Introduciendo estas nuevas variables en la expresión (A.37) y poniendo  $z' = 0$ , tenemos:

$$V = \frac{I\rho_m}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{x'^2 + (1 + (\lambda^2 - 1)\sin^2 \alpha)y'^2}}\tag{A.40}$$

Si ahora escribimos  $r^2 = x'^2 + y'^2$ ,  $\tan \phi = \frac{y'}{x'}$ , tenemos:

$$V = \frac{I\rho_m}{2\pi r} \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1)\sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha}}\tag{A.41}$$

Expresión que da el valor del potencial en cualquier punto  $M$  situado sobre la superficie a una distancia  $r$  de la fuente puntual  $O$  (Figura A.6).

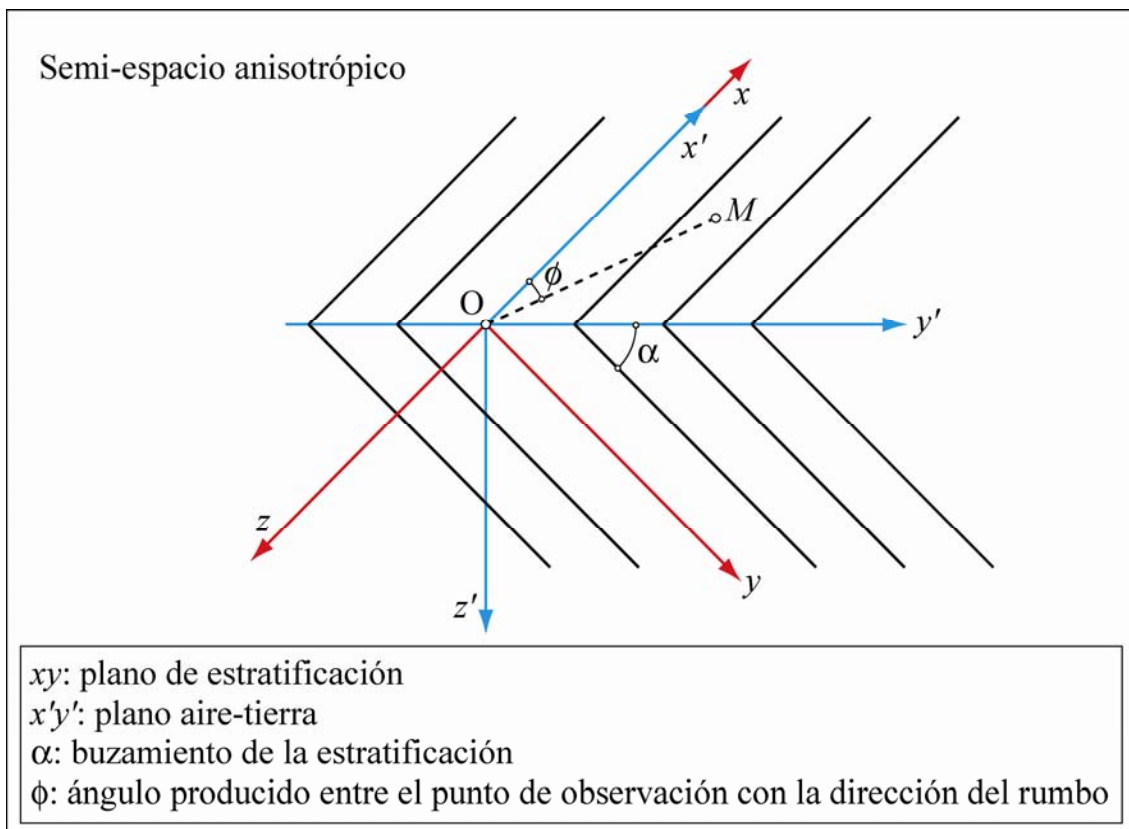


Figura A. 6. Medida del potencial sobre un semi-espacio homogéneo con anisotropía estratificada.



Derivando la expresión (A.41) respecto a  $r$ , obtenemos la componente radial del campo eléctrico, es decir:

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{I\rho_m}{2\pi r^2} \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1)\sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha}} \quad (\text{A.42})$$

Ahora, definiendo la resistividad aparente ( $\rho_a$ ), como en el caso de un medio isotrópico para un dispositivo simétrico Schlumberger, tenemos:

$$\rho_a = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1)\sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha}} \quad (\text{A.43})$$

### Flujo de corriente en un terreno estratificado horizontalmente.

En prospección geoelectrica a menudo se le presenta la tarea del cálculo de los espesores y de las resistividades de las múltiples capas de material que conforman un subsuelo con estratificación horizontal o subhorizontal. En base a lo anterior, ahora se plantea la necesidad de resolver el potencial y el campo eléctrico existente en cualquier punto de la superficie de un terreno estratificado con una fuente puntual de corriente A (Figura A.7).

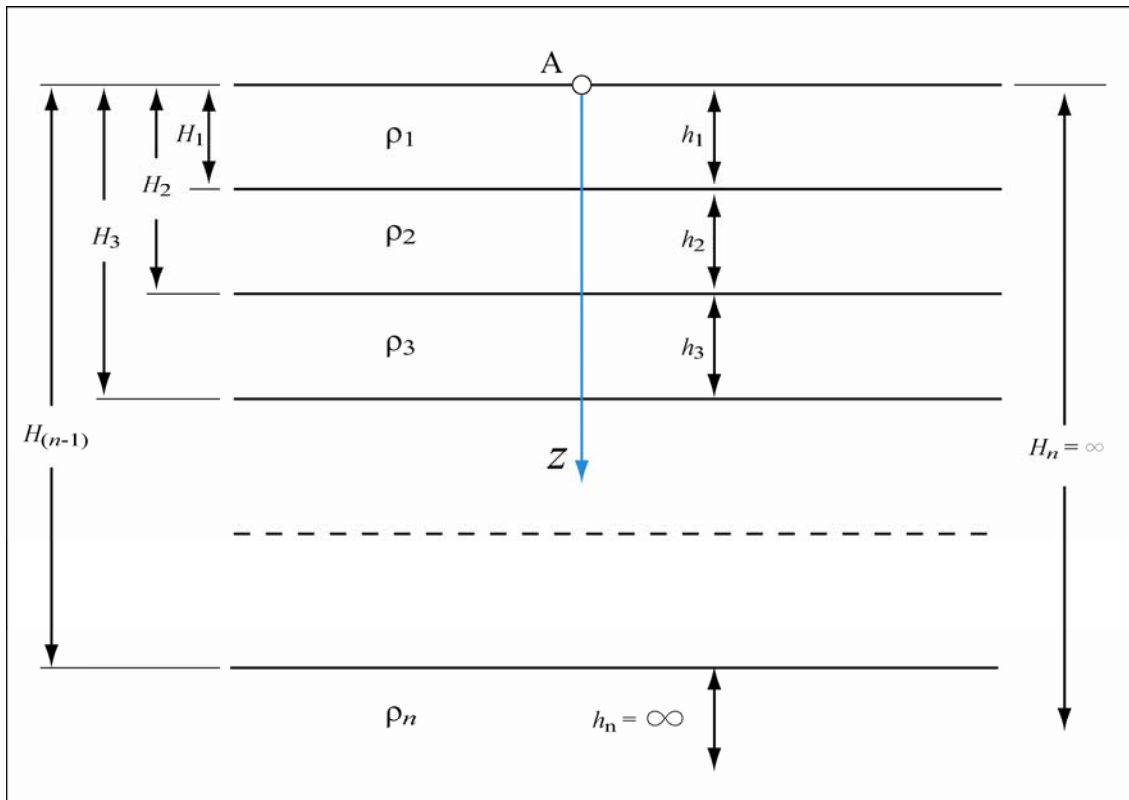


Figura A. 7. Representación de un terreno estratificado horizontalmente.

Para resolver el problema propuesto, el terreno estratificado se representa por un sistema de coordenadas cilíndricas teniendo como origen la fuente de corriente, que denotaremos por A (Figura A.7), y el eje  $z$  estará dirigido hacia abajo y perpendicular a la superficie del terreno. Las resistividades de las diferentes capas se denotan por  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ ; los espesores se denotan por  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$  y las profundidades hasta la base de las diferentes capas por  $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ . Se asume que la capa inferior se extiende hasta el infinito. El problema planteado se reduce a resolver la ecuación (A.9) que debe tener solución en cualquier punto. Considerando simetría con respecto a la coordenada  $\varphi$  la expresión (A.9) se reduce a:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.44})$$

Ecuación que debe satisfacerse en cualquier punto del terreno estratificado, y cuya solución general para el potencial  $V$  viene dada por:

$$V = \int_0^{\infty} (A(m) \cdot e^{-mz} + B(m) \cdot e^{mz}) J_0(mr) dm \quad (\text{A.45})$$

Siendo  $J_0$  la función Bessel de orden cero (Watson, 1995), y  $m$  una constante independiente de  $r$  y de  $z$  que actuará como parámetro de integración (Keller y Frischknecht, 1966; Parasnis, 1997). Sabemos el potencial creado por una fuente de corriente A en cualquier punto de un terreno homogéneo e isótropo (A.19). Si dicha expresión la expresamos en coordenadas cilíndricas vendría dada por:

$$V_0 = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (\text{A.46})$$

En el caso de un terreno estratificado (Figura A.7), el valor del potencial en cualquier punto dentro de dicho terreno se puede considerar como suma de dos potenciales, uno sería el del potencial normal, correspondiente al potencial de un terreno homogéneo, y el otro sería el de un potencial de perturbación que puede ser explicado físicamente como la contribución debida a dos series compuestas de un número infinito de imágenes sobre ambos lados de la capa considerada. Es decir,  $V_1 = V_0 + V_1'$ ;  $V_2 = V_0 + V_2'$ ;  $V_3 = V_0 + V_3'$ ; ...  $V_i = V_0 + V_i'$ ; etc. Así la expresión general sería:

$$V_i = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \int_0^{\infty} \{A_i(m) \cdot e^{-mz} + B_i(m) \cdot e^{mz}\} J_0(mr) dm \quad (\text{A.47})$$

Donde  $A_i$  y  $B_i$  son coeficientes que deben determinarse con las condiciones de contorno. Las condiciones de contorno que deben cumplirse en cualquier contacto o interfaz son:

$$\begin{aligned} V_i &= V_{i+1} \\ \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial V_i}{\partial z} &= \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial V_{i+1}}{\partial z} \quad z = H_i \end{aligned} \quad (\text{A.48})$$

Además, el potencial en el infinito debe anularse y se debe cumplir que el campo eléctrico no puede tener componente normal a la superficie  $z = 0$ , ya que el aire es aislante (Orellana, 1972).

Usando la integral de Weber-Lipschitz de la teoría de funciones Bessel (Watson, 1995) se puede emplear la siguiente identidad:

$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^{\infty} e^{-m|z|} J_0(mr) dm \quad (\text{A.49})$$

Para simplificar adoptamos que  $q = \frac{I\rho_1}{2\pi}$  y tenemos que los potenciales dentro del terreno valen:

$$\begin{aligned} V_1 &= q \int_0^{\infty} e^{-m|z|} J_0(mr) dm + \int_0^{\infty} A_1(m)(e^{mz} + e^{-mz}) J_0(mr) dm \\ V_i &= q \int_0^{\infty} e^{-m|z|} J_0(mr) dm + \int_0^{\infty} (A_i(m)e^{-mz} + B_i(m)e^{mz}) J_0(mr) dm \quad (\text{A.50}) \\ V_n &= q \int_0^{\infty} e^{-m|z|} J_0(mr) dm + \int_0^{\infty} A_n(m)e^{-mz} J_0(mr) dm \end{aligned}$$

A partir de las relaciones (A.48) y (A.50) surge el siguiente sistema de ecuaciones para las diferentes profundidades del terreno estratificado horizontalmente:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} A_1(e^{mH_1} + e^{-mH_1}) J_0(mr) dm &= \int_0^{\infty} (A_2 e^{-mH_1} + B_2 e^{mH_1}) J_0(mr) dm; \\ -\frac{q}{\rho_1} \int_0^{\infty} e^{-mH_1} J_0(mr) dm + \frac{1}{\rho_1} \int_0^{\infty} A_1(e^{mH_1} - e^{-mH_1}) J_0(mr) dm &= \quad (\text{A.51}) \\ = -\frac{q}{\rho_2} \int_0^{\infty} e^{-mH_1} J_0(mr) dm + \frac{1}{\rho_2} \int_0^{\infty} (-A_2 e^{-mH_1} + B_2 e^{mH_1}) J_0(mr) dm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\infty} (A_i e^{-mH_i} + B_i e^{mH_i}) J_0(mr) dm = \int_0^{\infty} (A_{i+1} e^{-mH_i} + B_{i+1} e^{mH_i}) J_0(mr) dm; \\
& -\frac{q}{\rho_i} \int_0^{\infty} e^{-mH_i} J_0(mr) dm + \frac{1}{\rho_i} \int_0^{\infty} (-A_i e^{-mH_i} + B_i e^{mH_i}) J_0(mr) dm = \\
& = -\frac{q}{\rho_{i+1}} \int_0^{\infty} e^{-mH_i} J_0(mr) dm + \frac{1}{\rho_{i+1}} \int_0^{\infty} (-A_{i+1} e^{-mH_i} + B_{i+1} e^{mH_i}) J_0(mr) dm
\end{aligned} \tag{A.52}$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\infty} (A_{n-1} e^{-mH_{n-1}} + B_{n-1} e^{mH_{n-1}}) J_0(mr) dm = \int_0^{\infty} (A_n e^{-mH_{n-1}}) J_0(mr) dm; \\
& -\frac{1}{\rho_{n-1}} \int_0^{\infty} (A_{n-1} e^{-mH_{n-1}} + B_{n-1} e^{mH_{n-1}}) J_0(mr) dm - \frac{q}{\rho_{n-1}} \int_0^{\infty} e^{-mH_{n-1}} J_0(mr) dm \\
& = -\frac{q}{\rho_n} \int_0^{\infty} e^{-mH_{n-1}} J_0(mr) dm - \frac{1}{\rho_n} \int_0^{\infty} A_n e^{-mH_{n-1}} J_0(mr) dm
\end{aligned} \tag{A.53}$$

Como las relaciones anteriores se deben cumplir para todo  $r$  tenemos que:

$$\begin{aligned}
& A_1(e^{-mH_1} + e^{mH_1}) - A_2 e^{-mH_1} - B_2 e^{mH_1} = 0 \\
& A_1 \rho_2 (e^{mH_1} - e^{-mH_1}) + A_2 \rho_1 e^{-mH_1} - B_2 \rho_1 e^{mH_1} - q(\rho_2 - \rho_1) e^{-mH_1} = 0
\end{aligned} \tag{A.54}$$

$$\begin{aligned}
& A_i e^{-mH_i} + B_i e^{mH_i} - A_{i+1} e^{-mH_i} - B_{i+1} e^{mH_i} = 0 \\
& \rho_{i+1} (-A_i e^{-mH_i} + B_i e^{mH_i}) + \rho_i A_{i+1} e^{-mH_i} - \rho_i B_{i+1} e^{mH_i} - q(\rho_{i+1} - \rho_i) e^{-mH_i} = 0
\end{aligned} \tag{A.55}$$

$$\begin{aligned}
& A_{n-1} e^{-mH_{n-1}} + B_{n-1} e^{mH_{n-1}} - A_n e^{-mH_{n-1}} = 0 \\
& -\rho_n A_{n-1} e^{-mH_{n-1}} + \rho_n B_{n-1} e^{mH_{n-1}} + \rho_{n-1} A_n e^{-mH_{n-1}} - q(\rho_n - \rho_{n-1}) e^{-mH_{n-1}} = 0
\end{aligned} \tag{A.56}$$

A partir del sistema de ecuaciones anterior (A.54), (A.55) y (A.56) teóricamente se puede calcular el potencial eléctrico,  $V_i$ , y el campo eléctrico,  $E_i$ , en cualquier punto dentro de un terreno estratificado (Figura A.7). Sin embargo en exploración eléctrica interesa conocer sólo el potencial en superficie y por ello, de acuerdo a la expresión (A.50), para el cálculo de  $V_1$  sólo será suficiente encontrar el valor del coeficiente  $A_1$ . Así por ejemplo el valor del potencial en superficie,  $V$ , para varios casos especiales sería:

Caso de un terreno homogéneo:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (\text{A.57})$$

Caso de un terreno estratificado de dos capas:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{r^2 + (2nh_1)^2}} \right] \quad (\text{A.58})$$

Siendo:

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{A.59})$$

Caso de un terreno estratificado de tres capas:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{\sqrt{r^2 + (2nH_0)^2}} \right] \quad (\text{A.60})$$

Siendo  $b_n$  una serie de coeficientes que hay que calcular por métodos de recurrencia (Patra y Nath, 1999), y  $H_0$  un valor fijo que es proporcional a  $H_1$  y a  $H_2$ .

Caso de  $n$  capas:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} N_n(m) J_0(mr) dm \quad (\text{A.61})$$

Esta expresión compacta resume lo visto anteriormente, dando el valor del potencial en la superficie de un medio estratificado de  $n$  capas. Siendo  $N_n$  una función de los espesores y resistividades de las capas, así como del parámetro de integración  $m$  y que se la conoce como función núcleo o Kernel (Roman, 1963; Pekeris, 1939; Kunetz y Rocroi, 1969; Flathe, 1955) o también como función característica (Orellana, 1972). Su empleo para la obtención de curvas patrón de resistividades, para la interpretación de las curvas de SEV, se ha facilitado con el uso de los ordenadores ya que el número de coeficientes a resolver se incrementa muchísimo,  $(2n-2)$ , a medida que aumenta el número de capas (Patra y Nath, 1999).

**Resistividad aparente en un terreno estratificado horizontalmente**

Conociendo el potencial en superficie de un terreno estratificado originado por dos electrodos de corriente A y B, se puede obtener la curva de resistividades aparentes (Orellana, 1972) que se obtendría sobre él para un dispositivo eléctrico determinado permitiéndonos así llevar a cabo la resolución del problema directo (ver Anexo C).

Para el dispositivo Schlumberger (Figura A.5) la resistividad aparente viene expresada por:

$$\rho_a = \pi r^2 \frac{E}{I} \quad (\text{A.62})$$

Donde  $r$  es la distancia desde el punto central del dispositivo hasta el electrodo de corriente,  $E$  es el campo eléctrico e  $I$  es la intensidad de corriente introducida a través de los electrodos de corriente o emisión.

Pero sabiendo que el potencial eléctrico para un terreno estratificado vale:

$$\begin{aligned} E &= -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{I\rho_1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^\infty N_n(m) J_0(mr) dm = \\ &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty N_n(m) J_1(mr) m dm \end{aligned} \quad (\text{A.63})$$

Siendo,  $J_1$  la función de Bessel de primera especie y orden uno,  $N_n$  la función característica,  $m$  es el parámetro integrador, y  $\rho_1$  es la resistividad real de la primera capa.

Introduciendo la expresión (A.63) en la expresión (A.62) tenemos de forma compacta el valor de la resistividad aparente teórica que se mediría en superficie con un dispositivo Schlumberger sobre un terreno estratificado:

$$\rho_a = \rho_1 r^2 \int_0^\infty N_n(m) J_1(mr) m dm \quad (\text{A.64})$$

Otro dispositivo tetrapolar comúnmente usado es el dispositivo Wenner (Orellana, 1972; Mares, 1984) y para este dispositivo el valor de la resistividad aparente se expresa ahora como:

$$\rho_a = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{A.65})$$

Donde tenemos que  $\Delta V$  es la diferencia de potencial observada entre los electrodos de potencial,  $r$  es la distancia entre electrodos, e  $I$  la intensidad de corriente introducida a través de los electrodos de emisión.

Conociendo que la diferencia de potencial para un terreno estratificado vale:

$$\Delta V = \frac{I\rho_1}{\pi} \int_0^\infty N_n(m) J_0(mr) dm - \frac{I\rho_1}{\pi} \int_0^\infty N_n(m) J_0(2mr) dm \quad (\text{A.66})$$

E introduciendo esta expresión en (A.65) nos queda:

$$\rho_a = 2\rho_1 r \int_0^\infty N_n(m) J_0(mr) dm - 2\rho_1 r \int_0^\infty N_n(m) J_0(2mr) dm \quad (\text{A.67})$$

Siendo éste el valor de la resistividad aparente que se mediría teóricamente en superficie con un dispositivo Wenner sobre un terreno estratificado. La notación empleada es la misma que la establecida para las expresiones anteriores.

Las expresiones (A.64) y (A.67) proporcionan las colecciones de ábacos o curvas teóricas de resistividades aparentes para terrenos estratificados de  $n$ -capas empleando los dos dispositivos arriba comentados (Kalenov, 1987; Iakubovskii y Liajov, 1980).

## Anexo B: Teoría óptica de las imágenes

En este anexo se presenta la formulación empleada para el cálculo del potencial eléctrico sobre algunos modelos simples basándose en la teoría óptica de las imágenes. Son unos pocos casos donde esta teoría óptica tiene cierta validez y su resolución resulta simple comparada con otros procedimientos.

### **Terreno estratificado horizontalmente con dos capas**

La teoría óptica supone que las corrientes eléctricas se comportan como los rayos de luz y donde los contactos entre los diferentes medios se asemejan a espejos semi-transparentes. Por lo tanto se ha de establecer una correlación entre los coeficientes de reflexión y de refracción y las resistividades de los diferentes medios, las expresiones de los coeficientes de reflexión y de refracción para un modelo de dos capas vienen dados por (Keller y Frischknecht, 1966):

Coefficiente de reflexión:

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{B.1})$$

Siendo  $\rho_1$  la resistividad del primer medio y  $\rho_2$  la resistividad del segundo medio.

Coefficiente de refracción (Burger, 1992):

$$1 - K_{12} \quad (\text{B.2})$$

La geometría del problema que se plantea aquí (Figura B.1) consiste en dos capas horizontales de material donde la capa superior tiene un espesor  $t$  y una resistividad  $\rho_1$  estando limitada en la parte superior por un semi-espacio infinito de resistividad  $\rho_0$ , este semi-espacio infinito en la práctica es el aire siendo su resistividad infinita; y limitada en la parte inferior por un semi-espacio infinito de resistividad  $\rho_2$ . Por debajo del



contacto superior se situará una fuente puntual de corriente A y a la misma profundidad,  $h$ , pero separado una distancia  $a$ , se situará un electrodo de medida de potencial M.

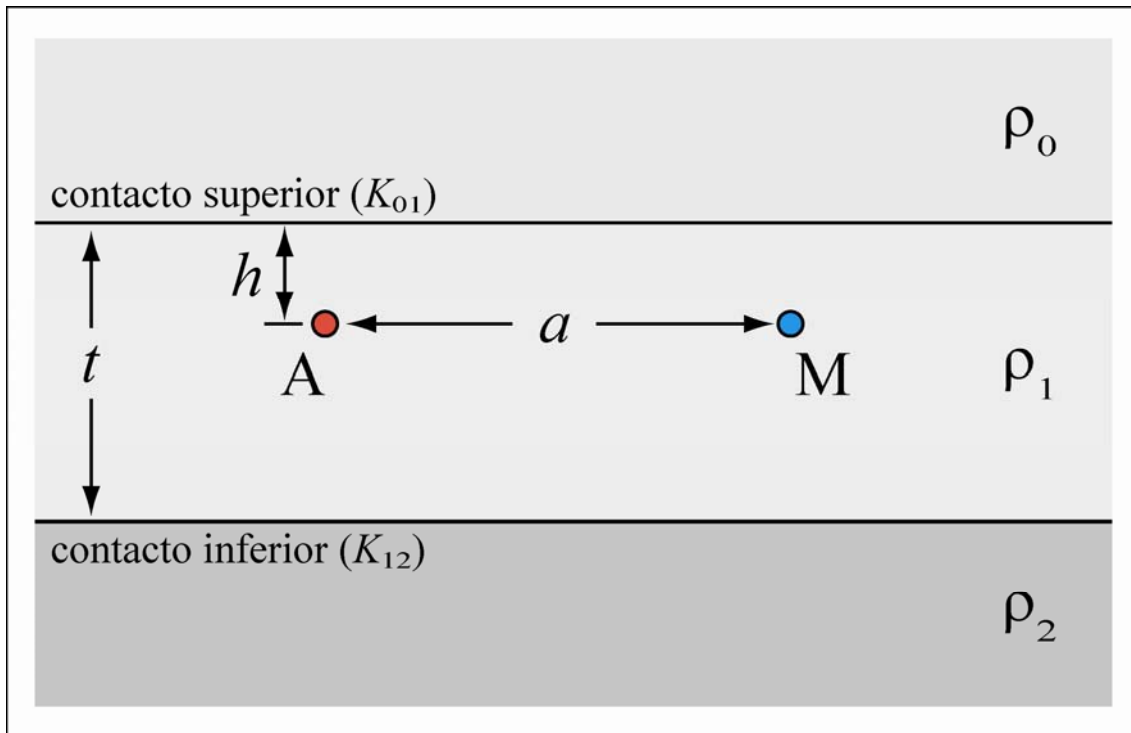


Figura B. 1. Modelo de dos capas con un semi-espacio superior de resistividad  $\rho_0$ .

Los diferentes tipos de caminos o trayectorias que seguirá la corriente eléctrica para ir desde la fuente puntual A al electrodo de medida M, y sus respectivos potenciales,  $V_i$ , serán (Keller y Frischknecht, 1966):

Trayectoria directa:

$$V_0 = \frac{\rho_1 I}{4\pi a} \quad (\text{B.3})$$

Siendo  $I$  la intensidad de corriente introducida a través de la fuente puntual A.

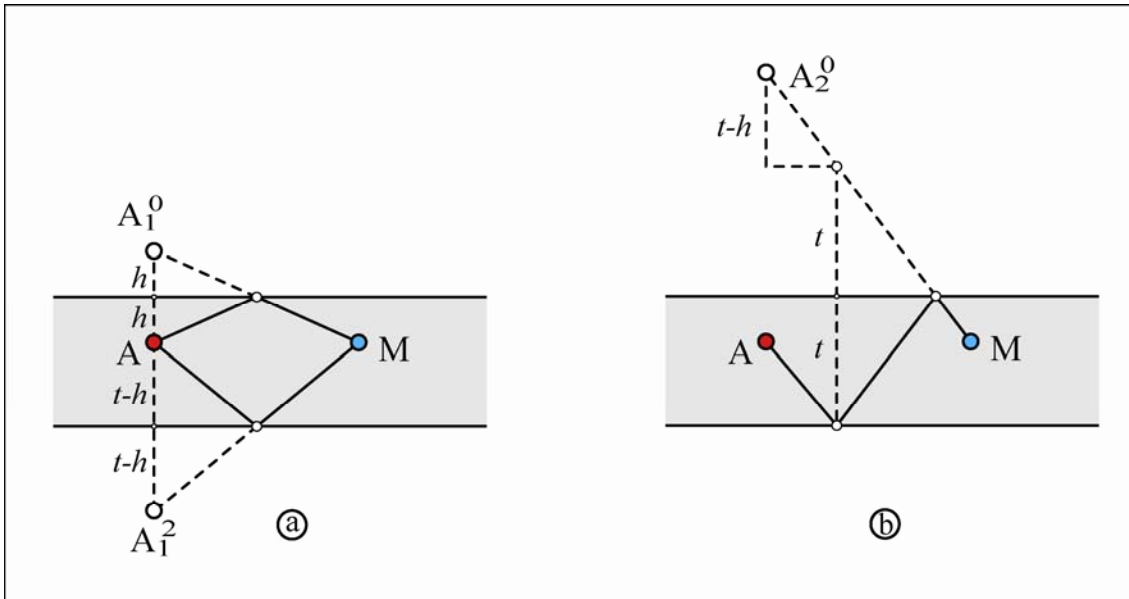


Figura B. 2. Trayectoria con un rebote en el contacto.

Trayectoria con un rebote en el contacto superior (Figura B.2.a):

$$V_1^0 = \frac{\rho_1 K_{10}}{4\pi\sqrt{a^2 + 4h^2}} \quad (\text{B.4})$$

Siendo:

$$K_{10} = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1 + \rho_0} \quad (\text{B.5})$$

Trayectoria con un rebote en el contacto inferior (Figura B.2.b):

$$V_1^2 = \frac{\rho_1 K_{12}}{4\pi\sqrt{a^2 + 4(t-h)^2}} \quad (\text{B.6})$$

Donde:

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{B.7})$$

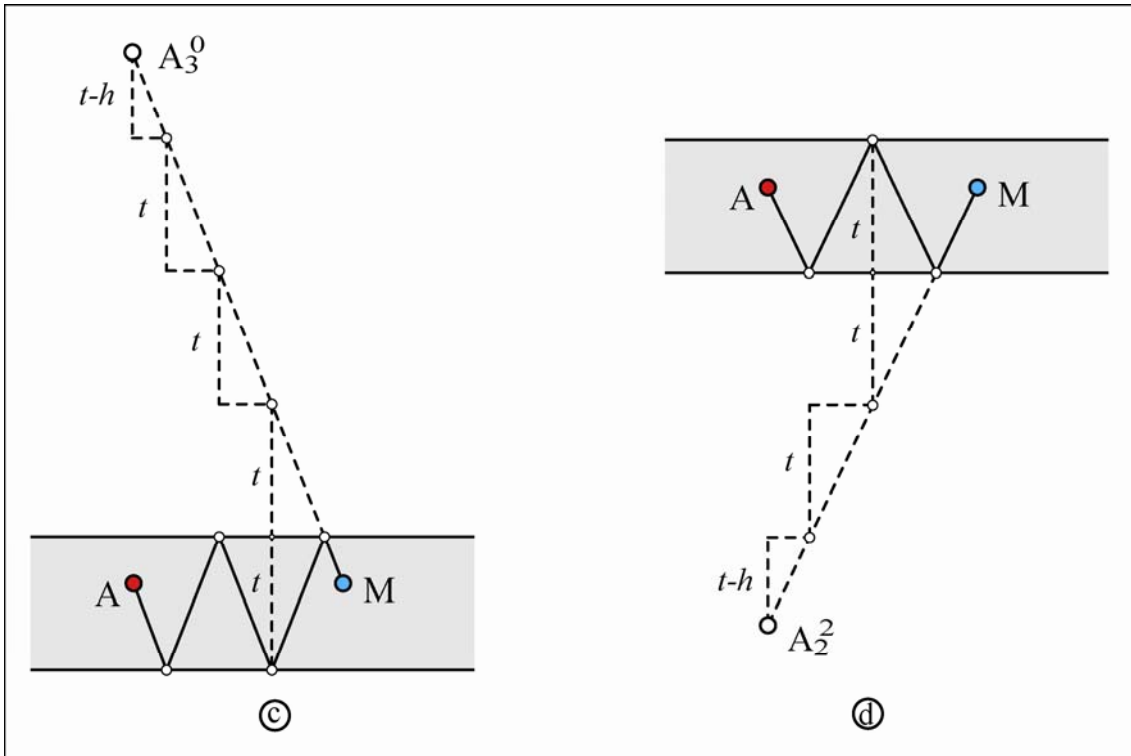


Figura B. 3. Trayectorias con inicio en el contacto inferior y un número par de rebotes.

Trayectorias con inicio de reflexión en el contacto inferior y un número par de rebotes (Figura B.3.c):

$$V_I = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 K_{12}^n K_{10}^n}{4\pi \sqrt{a^2 + (2nt)^2}} \quad (\text{B.8})$$

Trayectorias con inicio de reflexión en el contacto inferior y un número impar de rebotes (Figura B.3.d):

$$V_{II} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 K_{12}^{(n+1)} K_{10}^n}{4\pi \sqrt{a^2 + (2nt + 2[t-h])^2}} \quad (\text{B.9})$$

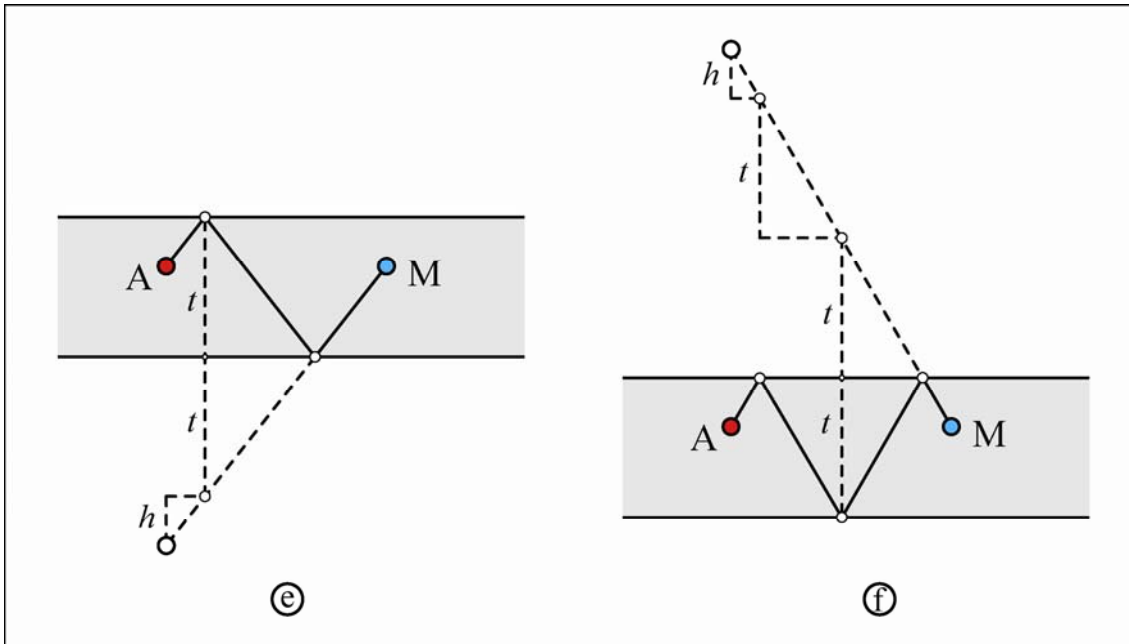


Figura B. 4. Trayectorias con inicio en el contacto superior y un número par de rebotes.

Trayectorias con inicio de reflexión en el contacto superior y un número par de rebotes (Figura B.4.e):

$$V_{III} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I K_{10}^n K_{12}^n}{4\pi \sqrt{a^2 + (2nt)^2}} \quad (\text{B.10})$$

Trayectorias con inicio de reflexión en el contacto superior y un número impar de rebotes (Figura B.4.f):

$$V_{IV} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I K_{10}^{(n+1)} K_{12}^n}{4\pi \sqrt{a^2 + (2nt + 2h)^2}} \quad (\text{B.11})$$

Por lo tanto el potencial medido en el electrodo M será suma de las expresiones comprendidas entre (B.3) y (B.11), es decir:

$$V_M = V_0 + V_1^0 + V_1^2 + V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV} \quad (\text{B.12})$$

Para el caso en el que la fuente puntual A y el punto de medida M se encuentren en el contacto superior ( $h = 0$ ) y el semi-espacio infinito superior sea aire con resistividad infinita la expresión (B.12) puede simplificarse quedando (Keller y Frischknecht, 1966):

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{4\pi a} \left\{ \begin{aligned} &1 + 1 + \frac{K_{12}}{\sqrt{1+(2t/a)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^{(n+1)}}{\sqrt{1+(2(n+1)t/a)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (B.13)$$

En donde realizando algunas operaciones con las diferentes series, el potencial en M llega a quedar simplemente como:

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} \right] \quad (B.14)$$

Expresión similar a la expresión (A.58) donde también aquí el primer término representa el potencial normal debido a un semi-espacio infinito homogéneo e isótropo de resistividad  $\rho_1$  y el segundo término representa al potencial de perturbación.

Para el dispositivo Wenner el valor de la resistividad aparente viene dado por:

$$\rho_{a,w} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} = \rho_1 \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(nt/a)^2}} \right] \quad (B.15)$$

Y para el dispositivo Schlumberger viene dado por:

$$\rho_{a,s} = -\frac{2\pi a^2}{I} \frac{\partial V}{\partial a} = \rho_1 \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n}{\sqrt{1+(2nt/a)^2}} \right] \quad (B.16)$$

Sin embargo para el caso especial donde  $K = \pm 1$ , las series no son convergentes y se necesita, por lo tanto, realizar otras aproximaciones que nos darán nuevas expresiones para el valor de la resistividad aparente medida con ambos dispositivos (Wenner y Schlumberger):

$$\rho_{a,w} = \frac{2a\rho_1}{t} \ln 2 = 1.38 \cdot \frac{a}{S_1} \quad (\text{B.17})$$

$$\rho_{a,s} = \rho_1 \frac{a}{t} = \frac{a}{S_1}$$

Donde  $S_1$  es la conductancia longitudinal y el resto de parámetros son los ya establecidos.

Con las expresiones (B.15), (B.16) y (B.17) pueden obtenerse las curvas teóricas de resistividades aparentes para un terreno estratificado de dos capas con dispositivo de medida Schlumberger o dispositivo Wenner. Estas curvas teóricas proporcionan la respuesta resistiva que teóricamente se mediría en superficie (problema directo) para diferentes modelos de dos capas permitiendo así, su comparación con los valores de resistividad aparente medidos sobre el terreno (Kalenov, 1987; Iakubovskii y Liajov, 1980).

### ***Terreno con cambio lateral***

Los cambios laterales de facies, ciertas zonas del subsuelo contaminadas con límites laterales bien definidos, formaciones verticales de material, etc. pueden ser resueltos geoelectricamente por el modelo que se plantea aquí a través, también, de la teoría óptica de las imágenes (Mares, 1984).

En este caso la geometría del modelo estará compuesta por una lámina vertical limitada por dos planos paralelos dentro de los cuales el material tiene una resistividad  $\rho_2$ , para simplicidad del problema propuesto se tomará que a ambos lados de la lámina el material tendrá igual resistividad, es decir  $\rho_1 = \rho_3$  (Figura B.5). Se calculará el potencial que se obtendría en un electrodo de medida M que se encuentra en superficie al igual que el electrodo de corriente A y ambos situados a la izquierda de la lámina vertical y sobre el mismo eje  $x$ . En la Figura B.5, por motivos de claridad, el punto M se ha desplazado del eje  $x$  para visualizar las diferentes trayectorias de la corriente eléctrica.

Procediendo de forma similar que en el caso anterior calculamos el potencial en el electrodo M para diferentes tipos de trayectorias de la corriente eléctrica:

Trayectoria directa (trayectoria a en la Figura B.5):

$$V_0 = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} \quad (\text{B.18})$$

Siendo  $I$  la intensidad de corriente introducida a través de la fuente puntual A,  $x$  la distancia desde el electrodo de corriente A al electrodo de medida M.

Trayectoria con un rebote en el primer contacto (trayectoria b en la Figura B.5):

$$V_1 = \frac{\rho_1 I K_{12}}{2\pi(2d - x)} \quad (\text{B.19})$$

Donde  $d$  es la distancia desde el electrodo de corriente A al primer contacto.

Trayectoria con un rebote en el segundo contacto (trayectoria c en la Figura B.5):

$$V_2 = -\frac{\rho_1 I (1 - K_{12}^2) K_{12}}{2\pi(2d - x + 2m)} \quad (\text{B.20})$$

Sabiendo que:

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{B.21})$$

$$K_{21} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = -K_{12}$$

Trayectoria con dos rebotes en el segundo contacto (trayectoria e en la Figura B.5):

$$V_3 = \frac{\rho_1 I (1 - K_{12}^2) K_{12}^3}{2\pi(2d - x + 4m)} \quad (\text{B.22})$$

Trayectoria con  $n$ -rebotes en el segundo contacto:

$$V_n = \frac{\rho_1 I (1 - K_{12}^2) K_{12} (-K_{12})^n}{2\pi(2d - x + 2nm)} \quad (\text{B.23})$$

Por lo tanto el potencial total que se mediría en M tendría como expresión:

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[ \frac{1}{x} + \frac{K_{12}}{2d - x} + K_{12} (1 - K_{12}^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-K_{12})^n}{2d - x + 2nm} \right] \quad (\text{B.24})$$

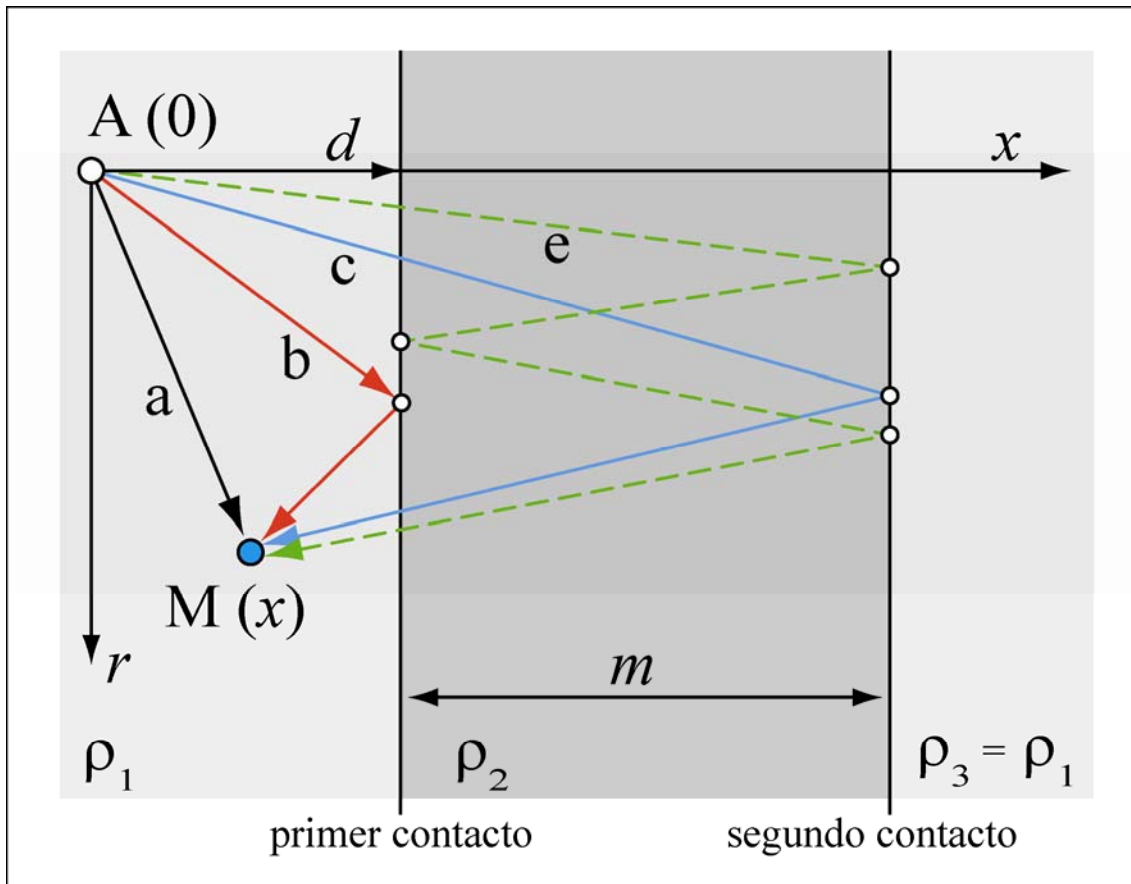


Figura B. 5. Potencial producido por una fuente puntual  $A$  cerca de una capa vertical de espesor  $m$ .



## Anexo C: Problema directo y problema inverso

Este Anexo C describe brevemente los conceptos de *problema directo* (en inglés, “*forward method*”) y de *problema inverso* (en inglés, “*inverse method*”). Ambos son muy importantes para el tratamiento y análisis de los datos geofísicos y se basan en el empleo de técnicas matemáticas y estadísticas (cálculo, álgebra matricial, estimación estadística, etc.) para obtener información útil de un sistema físico, como la Tierra, a partir de observaciones controladas llevadas a cabo sobre él.

Existen numerosos trabajos que desarrollan matemáticamente estos conceptos: Meju (2003), Dimri (1992), Marcuello (2005), Patra y Nath (1999), Tarantola (1987), Tarantola (2005), Menke (1984), Lines y Treitel (1984), Zhdanov (2002), etc., entre otros.

### **Conceptos básicos del problema directo**

Las diferentes teorías físicas permiten hacer predicciones, es decir dada la descripción de un sistema físico, se pueden predecir los resultados de ciertas medidas realizadas sobre él. Este problema de predecir el resultado de las medidas se le conoce como problema directo (en inglés, “*modelization problem*”, “*simulation problem*” o también como “*forward problem*”). El problema directo se caracteriza por tener solución única (desde el punto de vista de la física determinística).

Tradicionalmente, la interpretación de algunos datos geofísicos, por ejemplo los datos medidos de resistividad de los sondeos eléctricos verticales (SEV), se ha realizado por comparación de estos datos con curvas teóricas o curvas patrón (en inglés, “*Master curves*”) (Keller y Frischknecht, 1966); estas curvas son calculadas empleando algunas relaciones matemáticas que asumen una particular distribución de la propiedad física en el subsuelo y son la respuesta teórica para estructuras idealizadas del subsuelo. El procedimiento es simple:

Dada alguna información sobre los valores de un conjunto de parámetros (p.e.: número de capas, sus resistividades y espesores), que representan un modelo hipotético del terreno, se empleará una relación matemática (modelo matemático) para derivar los valores de algunas cantidades medibles (p.e.: la resistividad aparente). Este

procedimiento constituye lo que se conoce en inglés como “*forward approach*” y resuelve el problema directo.

Destacar aquí que lo que se conoce en interpretación geofísica como “*forward modelling by interactive computing*”, no es otra cosa que una extensión más versátil de la técnica original de ajuste por medio de curvas patrón.

Existen cinco procedimientos de resolver el problema directo (Patra y Nath, 1999):

- Métodos analíticos.
- Métodos de integración de contorno o de volumen.
- Método de Fourier.
- Métodos de elementos finitos o métodos de diferencias finitas.
- Métodos híbridos.

Tanto el método de Fourier, como los métodos de elementos finitos o los métodos de diferencias finitas pueden resolver modelos más complejos que los primeros, y para ellos, manejan grandes sistemas de ecuaciones. Actualmente, con el desarrollo de la potencia de cálculo de los ordenadores, el modelado 3D de estructuras geológicas a través de elementos finitos o diferencias finitas ya es una realidad (Patra y Nath, 1999).

En esta Tesis Doctoral se ha empleado el programa libre RES2DMOD, de Geotomo Software (ver Capítulo 4), para ayudar a definir el dispositivo de medida más adecuado para el estudio de suelos contaminados y para adoptar el espaciamiento entre electrodos que ofrezca una buena resolución final.

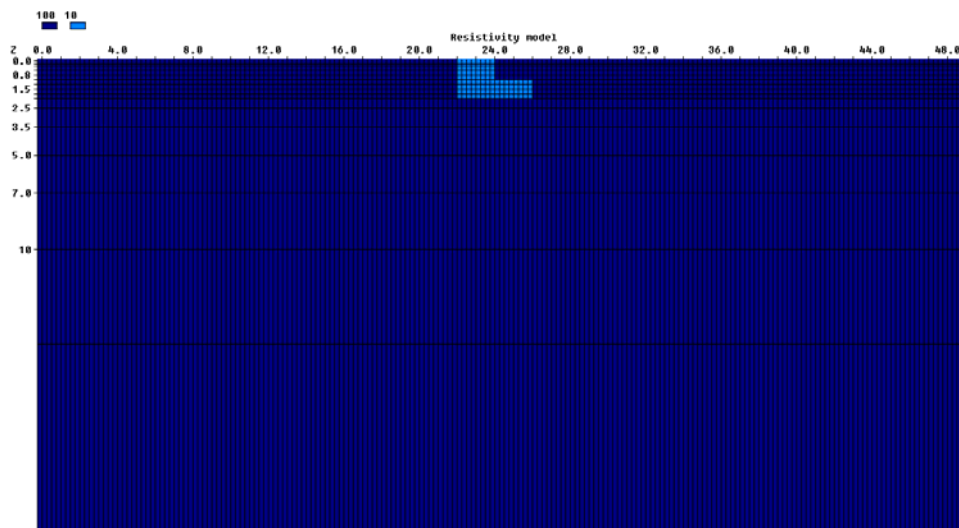


Figura C. 1. Modelo del subsuelo creado con Res2dmod en el que se ha introducido un penacho contaminantes con forma de “L”, de resistividad eléctrica 10 ohm.m.

Con este programa el modelo 2D creado por el método de diferencias finitas o el método de elementos finitos divide el subsuelo en un número de bloques empleando una malla rectangular (Figura C.1). Dey y Morrison (1979) llevaron a cabo algunas mejoras sobre la formulación de las diferencias finitas para mejorar la calidad de los valores calculados de resistividad aparente. El método de diferencias finitas básicamente determina el potencial en los nodos de la malla rectangular y para ello se necesita previamente asignar valores de resistividad a los bloques de la malla (Loke, 2001).

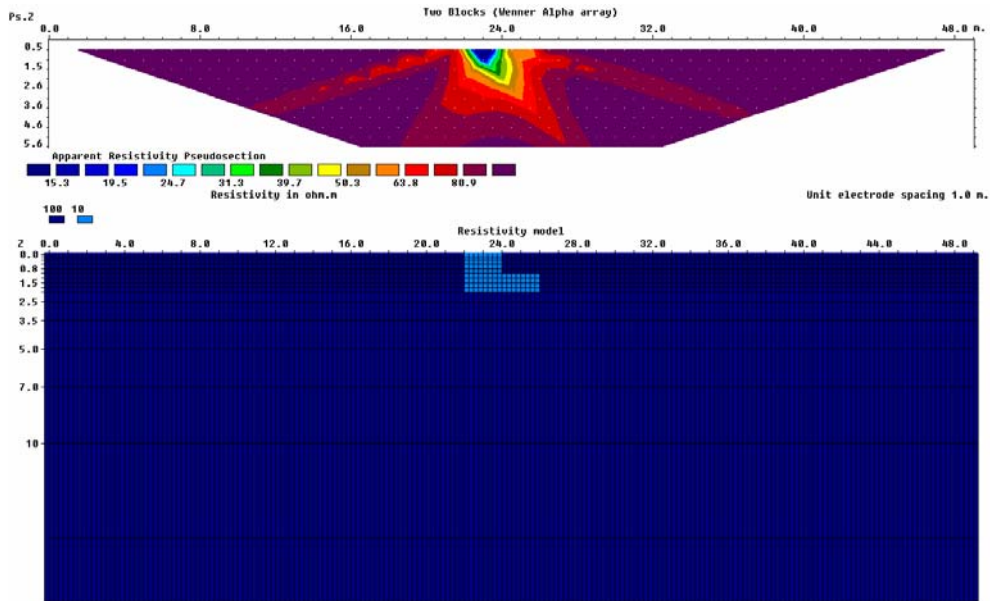


Figura C. 2. Seudosección de resistividad aparente obtenida para el dispositivo Wenner con una separación entre electrodos de 1 metro (problema directo).

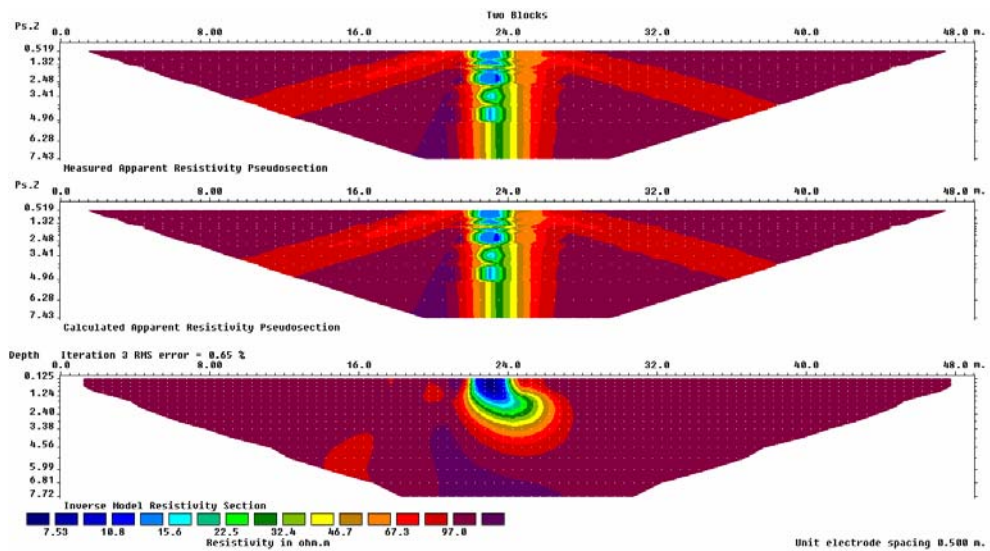


Figura C. 3. Seudosección de resistividad, que intenta aproximarse al modelo creado con el Res2dmod, obtenida a partir de un proceso de inversión para un dispositivo Schlumberger-Wenner con una separación entre electrodos de 0,5 metros.

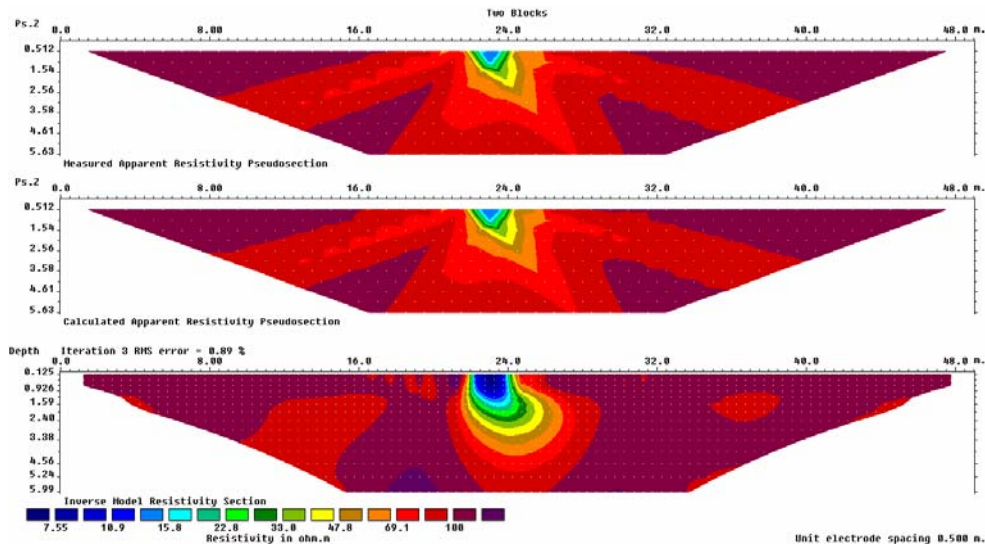


Figura C. 4. Seudosección de resistividad real, que intenta aproximarse al modelo creado con el Res2dmod, obtenida a partir de un proceso de inversión para un dispositivo Wenner con una separación entre electrodos de 0,5 metros.

Analizando las figuras C.3 y C.4 se puede afirmar que el dispositivo de medida que obtiene una seudosección geoelectrica invertida más próxima al modelo, que ha generado la seudosección de resistividad aparente, es el dispositivo Schlumberger-Wenner, puesto que la forma del penacho contaminante la delimita con más precisión que con el dispositivo Wenner.

Puesto que en esta Tesis Doctoral se aborda el estudio de suelos contaminados por la actividad de balsas de purines, el dispositivo de medida empleado en las diferentes campañas realizadas ha sido el Schlumberger-Wenner (ver Capítulo 4).

### **Conceptos básicos del problema inverso**

Los programas RES2DINV y RES3DINV, de Geotomo Software, empleados en esta Tesis Doctoral, se basan en la aplicación del problema inverso (Geotomo software, 2004 y Geotomo software, 2001).

Conceptualmente, el problema inverso se puede describir como: “Dada alguna información sobre los valores de algunas cantidades medidas (definidos como datos experimentales o medidas de campo), se empleará una relación matemática para obtener los valores de los de parámetros que definen el modelo (variables que definen el subsuelo) y que reproducirán o explicarán las observaciones de campo”.

En el caso esta Tesis Doctoral, el objetivo del problema inverso es obtener un modelo que sea capaz de dar respuesta a los valores de resistividad aparente medidos en campo por medio de los valores de resistividad aparente calculados del modelo (Figura C.3 y Figura C.4). El problema inverso, a través de una serie de cálculos iterativos, va ajustando el modelo de partida hasta conseguir que la diferencia, entre los datos calculados del modelo y los datos medidos en campo, sea mínima, en función del criterio de error asignado al algoritmo. A este proceso matemático iterativo se le denomina Inversión y el modelo resultante de este proceso es la seudosección

geoeléctrica de valores de resistividad y que representa, o modeliza, las características resistivas del subsuelo.

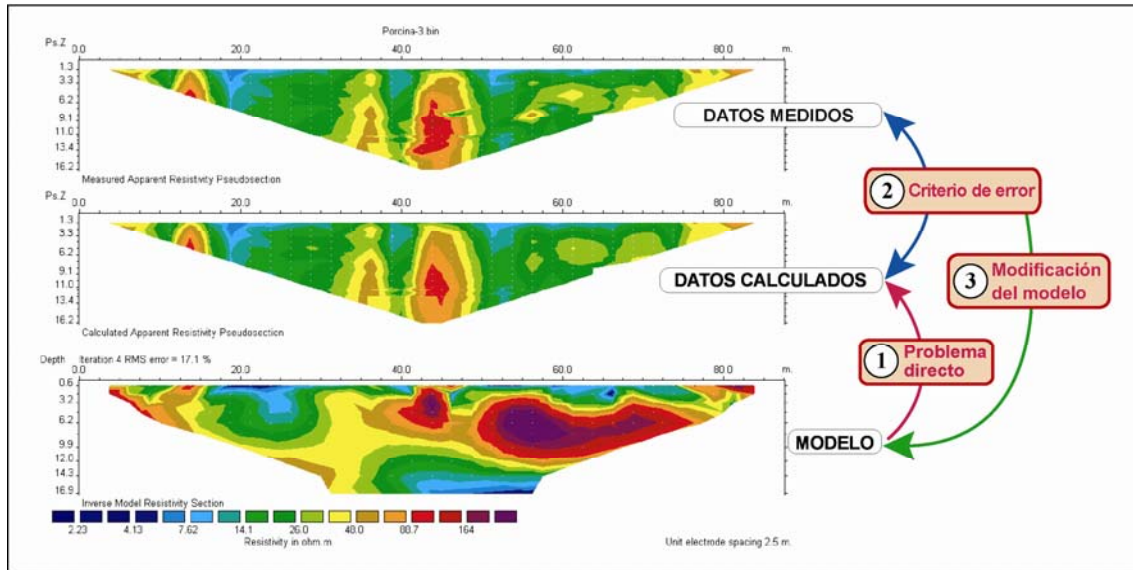


Figura C. 5. Etapas seguidas en el proceso de inversión de datos geoeléctricos.

La rutina de inversión, empleada por los dos programas anteriores, está basada en el método de mínimos cuadrados con restricciones suaves (deGroot-Hedlin y Constable, 1990). El método de mínimos cuadrados con restricciones suaves está basado en la siguiente ecuación:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u\mathbf{F})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (\text{C.1})$$

Donde:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T \quad (\text{C.2})$$

Siendo,  $\mathbf{f}_x$  un filtro de suavizado horizontal,  $\mathbf{f}_z$  un filtro de suavizado vertical,  $\mathbf{J}$  es la matriz jacobiana de derivadas parciales,  $u$  es el “*damping factor*”,  $\mathbf{d}$  es el vector sobre la perturbación del modelo y  $\mathbf{g}$  es el vector de discrepancia.

## Anexo D: Índice DOI (“*Depth of Investigation*”)

Los resultados de los perfiles de tomografía eléctrica 2D llevados a cabo sobre los depósitos mineros y sobre las balsas de purines fueron procesados para obtener el índice DOI (del inglés, “*Depth of Investigation*”) que nos proporciona la profundidad a partir de la cual los datos ya no son sensibles a las propiedades físicas del subsuelo (Oldenburg and Li, 1999). Este algoritmo está aún en fase de ensayo y ha sido desarrollado en el Instituto de Geofísica de Lausanne (Suiza). Es una herramienta que ayuda en la interpretación de seudosecciones obtenidas con tomografía eléctrica o con polarización inducida (Marescot y Martínez-Pagán, 2004).

### Cálculo del índice DOI

La formulación de inversión empleada está basada sobre la ecuación de mínimos cuadrados con restricciones suaves de Gauss-Newton ( $L_2$  norm) con la modificación de Marquardt-Levenberg. Esta formulación también se ha modificado algo más para incorporar las matrices de ponderación (“*weighting matrices*”) y ajustarse a la formulación de Farquharson y Oldenburg (1998), siendo ésta:

$$\left( \mathbf{J}_k^T \mathbf{R}_d \mathbf{J}_k + \lambda_k \mathbf{F}_R \right) \Delta \mathbf{q}_k = \mathbf{J}_k^T \mathbf{R}_d \mathbf{g}_k - \lambda_k \mathbf{F}_R (\mathbf{q}_{k-1} - \mathbf{q}_0) \quad (\text{D.1})$$

Con

$$\mathbf{F}_R = \alpha_s \mathbf{R}_s + \alpha_x \mathbf{C}_x^T \mathbf{R}_x \mathbf{C}_x + \alpha_z \mathbf{C}_z^T \mathbf{R}_z \mathbf{C}_z \quad (\text{D.2})$$

Donde  $\Delta \mathbf{q}_k$  es el cambio que se le aplica a los parámetros del modelo para la iteración  $k$ ,  $\mathbf{q}_{k-1}$  es el vector que representa el valor de los parámetros del modelo (los logaritmos de los valores de resistividad del modelo) en la iteración  $k-1$ ,  $\mathbf{q}_0$  es el modelo inicial de referencia que representa a un semi-espacio homogéneo,  $\mathbf{g}_k$  es el vector discrepancia, es decir la diferencia que hay entre el valor de los logaritmos de los valores de resistividad aparente calculados a partir del modelo correspondiente y los valores de resistividad aparente obtenidos de los datos medidos en campo.  $\mathbf{R}_d$ ,  $\mathbf{R}_x$ ,  $\mathbf{R}_z$  y  $\mathbf{R}_s$  son matrices de

ponderación,  $C_x$  y  $C_z$  son matrices de suavidad (*smoothing matrices*) en las direcciones  $x$  e  $y$  (operadores de diferencias finitas de primer orden) para permitir pasar de una zona del modelo a otra, con características diferentes, sin cambios bruscos, por ejemplo un cambio lateral de facies,  $\alpha_s$  es un factor de disipación (*damping factor*) que tiene un valor entre 0.01 y 0.0001 veces el valor de los factores  $\alpha_x$  y  $\alpha_y$ ,  $\lambda_k$  es un multiplicador de Lagrange.  $J_k$  es una matriz Jacobiana de derivadas parciales.

El método lleva a cabo dos inversiones sobre el mismo grupo de datos pero usando diferentes valores de resistividad de partida,  $q_0$ , en la ecuación (D.3). El primer valor de referencia,  $q_A$ , se calcula a partir de la media del logaritmo de los valores de resistividad aparente observados. El segundo valor de resistividad de referencia  $q_B$ , se establece normalmente asignándole un valor igual a 10 veces el valor de  $q_A$ . El valor DOI para las celdas que forman el modelo se calcula con la expresión:

$$R_{AB}(x, z) = \frac{q_A(x, z) - q_B(x, z)}{q_A - q_B} \quad (D.3)$$

El valor de  $R$  se aproximará a cero en zonas del modelo donde las dos inversiones reproducirán los mismos valores de resistividad. En dichas zonas, la resistividad de la celda será un valor bien ajustado a partir de los datos. Por el contrario en aquellas zonas del modelo en las que no se consigue llegar a los mismos valores de resistividad a partir de dos inversiones se establecerá que dichas zonas del modelo no aportan información resistiva adecuada, en estos casos el valor de  $R$  se aproximara al valor de 1 y el valor de resistividad de tales celdas habrá variado poco respecto al valor inicial de referencia. Esto último suele suceder en zonas de gran profundidad y particularmente en zonas de borde del perfil geoelectrico donde la cobertura de los datos medidos es escasa.

### **Ejemplos de aplicación del índice DOI**

A continuación presentamos dos ejemplos sobre la obtención del índice DOI, uno para el caso de los depósitos mineros y otro para caso de las balsas de purines. La Figura D.1 muestra la sección inferior obtenida con el índice DOI para el depósito de estériles "Brunita", en ella se puede observar dónde los valores son superiores a 0,2 ò 0,3, indicación de valores de resistividad poco fiables, según lo anterior en la parte central del depósito se alcanzaría una profundidad de investigación con garantías hasta los 65,6 metros, exceptuando zonas más someras donde la profundidad de investigación alcanzaría únicamente los 21,5 metros.

Aplicando el mismo criterio sobre la Figura D.2, correspondiente a la sección del índice DOI sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia), se puede observar como la profundidad de investigación es inferior que en el anterior ejemplo, llegando sólo a los 21,2 metros. Esto es lógico puesto que los perfiles son de 87,5 metros de longitud y la separación de los electrodos de 2,5 metros comparándolos con los perfiles realizados sobre los depósitos mineros que han sido de 175 metros de longitud los más cortos.

Este índice surge porque la mayor parte de las aproximaciones tradicionales que calculan esta profundidad de investigación hacen uso del cálculo de la máxima señal obtenida con la profundidad de investigación (Roy and Apparao, 1971) o de la profundidad de investigación media (Edwards, 1977) para un terreno homogéneo. Sin embargo, en subsuelos con heterogeneidades, estos métodos podrían dar una profundidad de investigación menos fiable.

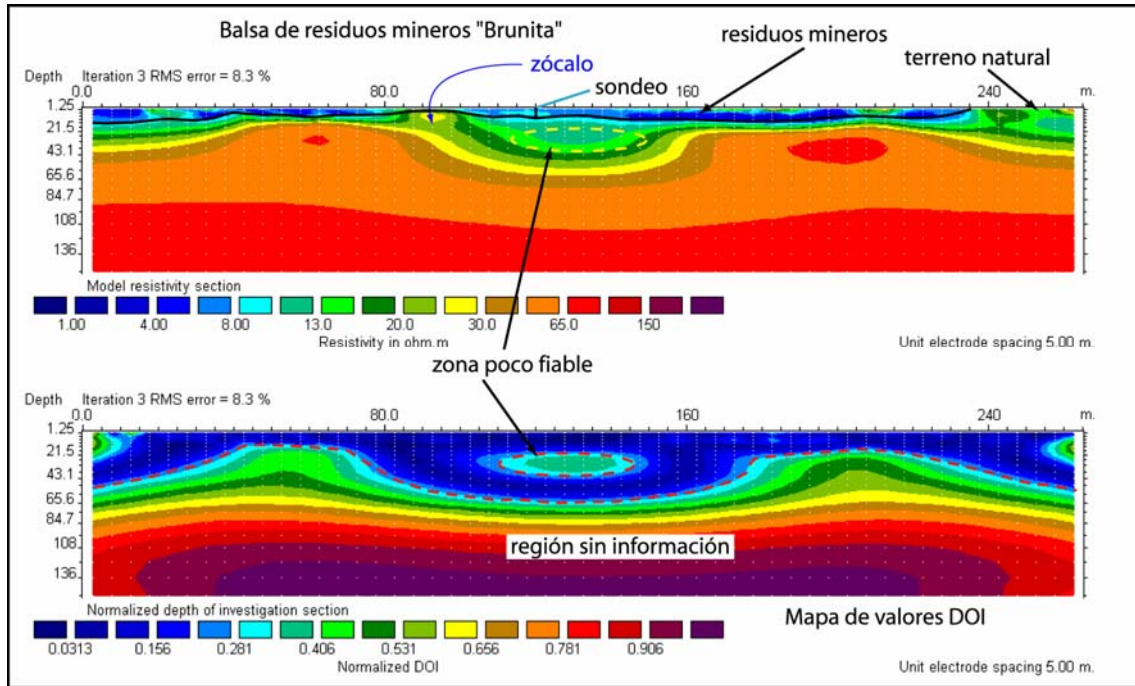


Figura D. 1. Sección de la profundidad de investigación normalizada sobre el depósito de “Brunita”.

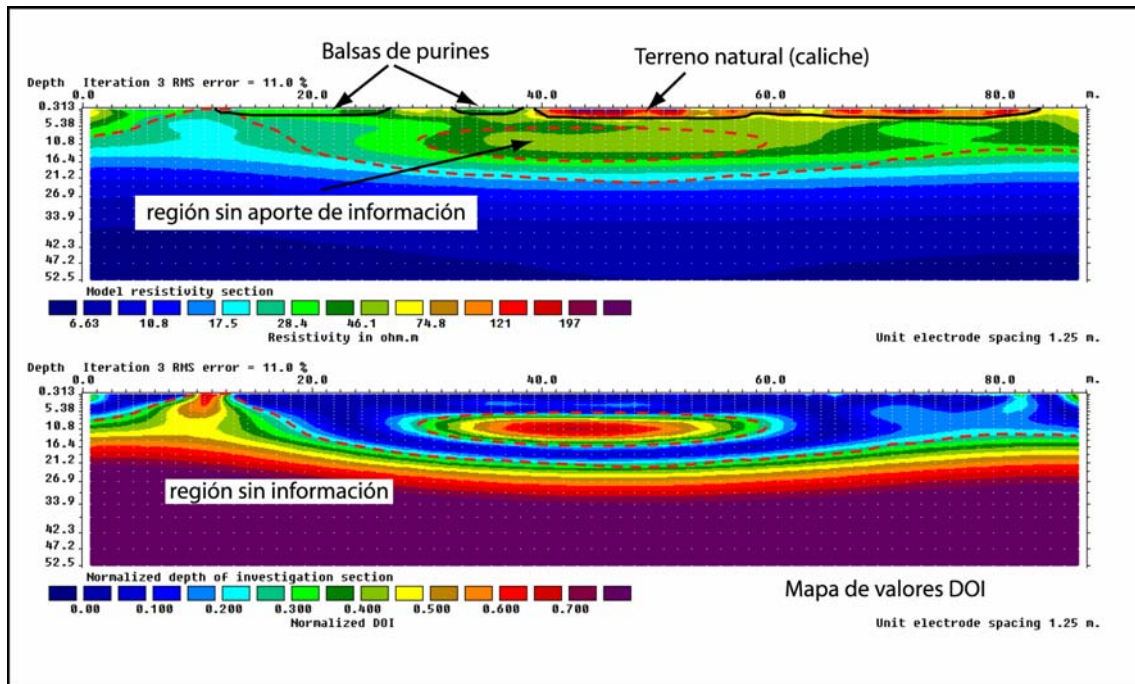


Figura D. 2. Sección de la profundidad de investigación normalizada sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia).



## **Anexo E: NSIs (*Near-Surface Inhomogeneities*)**

Las heterogeneidades someras (en inglés, “*near-surface inhomogeneities*”) pueden originar algunos problemas durante la interpretación de las seudosecciones de resistividad aparente ya que sus efectos complican el aspecto de la imagen de forma significativa (Ritz *et al.*, 1999; Abbas *et al.*, 2004).

Estos efectos son más patentes en estudios someros con tomografía eléctrica para aplicaciones medioambientales, geológicas e hidrogeológicas.

Para comprobar el grado de alteración producido por estas heterogeneidades someras sobre las seudosecciones geoelectricas llevadas a cabo en esta Tesis Doctoral, se ha aplicado un filtro de eliminación de NSIs a través del programa X2IPI (Robain y Bobachev, 2002), desarrollado por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de París en colaboración con Alexei Bobachev de la Universidad de Moscú.

A continuación se presentan algunos ejemplos de seudosecciones geoelectricas 2D sometidas al filtrado con X2IPI y las mismas seudosecciones geoelectricas 2D sin filtrado previo de NSIs.

### ***Depósitos de estériles mineros***

Las seudosecciones geoelectricas 2D de los depósitos mineros filtradas con el X2IPI (Figuras E.1 y E.3) muestran una mejora en el error y necesitando menos iteraciones de inversión en relación a las mismas seudosecciones geoelectricas 2D sin filtrado previo (Figuras E.2 y E.4).

En relación al depósito de estériles “El Lirio”, el filtrado a hecho que el material depositado en la parte central tenga un mayor espesor. Además, el contacto estéril-sustrato se presenta de una forma más irregular que en la seudosección sin filtrado. El filtrado X2IPI ha mejorado las heterogeneidades resistivas que aparecen en la parte izquierda de la seudosección sin filtrar (Figura E.2) generando los diferentes horizontes resistivos comentados en el Capítulo 6.

En el depósito “Brunita”, la seudosección geoelectrica filtrada con el X2IPI (Figura E.3) no ha modificado significativamente la forma del contacto estéril-sustrato, no obstante

ha eliminado regiones resistivas someras para dejar un material depositado más homogéneo eléctricamente.

El empleo del programa X2IPI ayuda en la etapa de interpretación al eliminar los efectos de las heterogeneidades superficiales sobre las pseudosecciones, sin embargo no se puede abusar de su empleo pues no siempre serán efectos de NSIs, sino más bien anomalías resistivas debidas a estructuras geológicas y éstas habrá que tenerlas en cuenta y no eliminarlas.

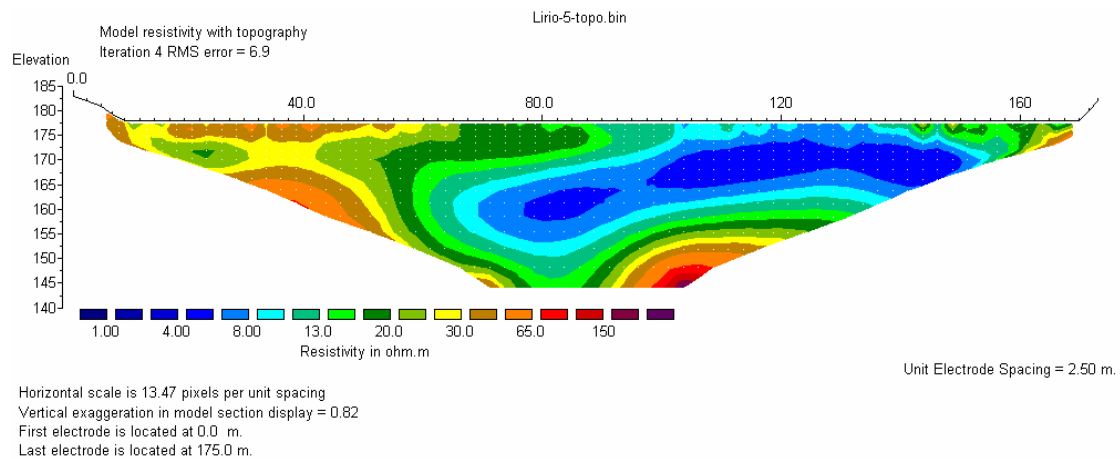


Figura E. 1. Seudosección geoelectrica 2D del perfil n° 5, realizado sobre el depósito “El Lirio”, filtrada con el programa X2IPI.

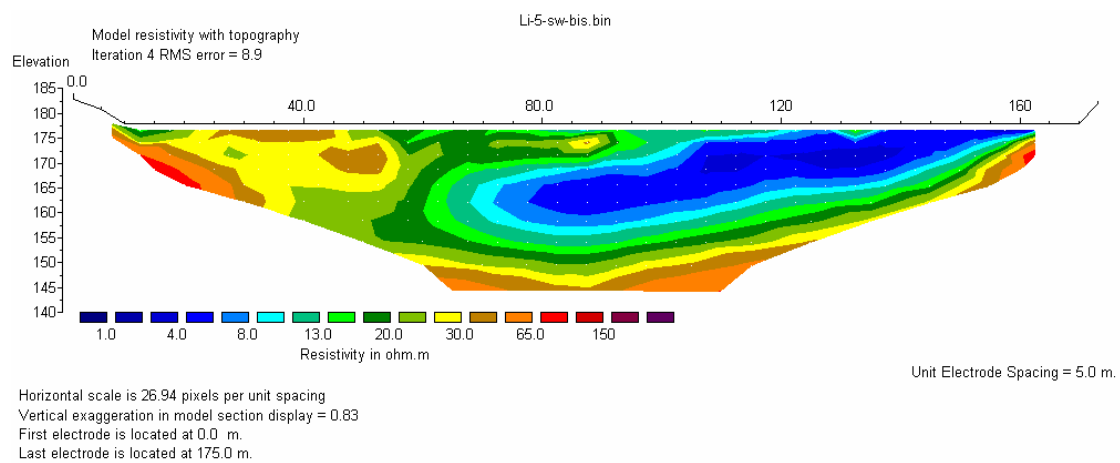


Figura E. 2. Seudosección geoelectrica 2D del perfil n° 5, realizado sobre el depósito “El Lirio”, sin filtrar.



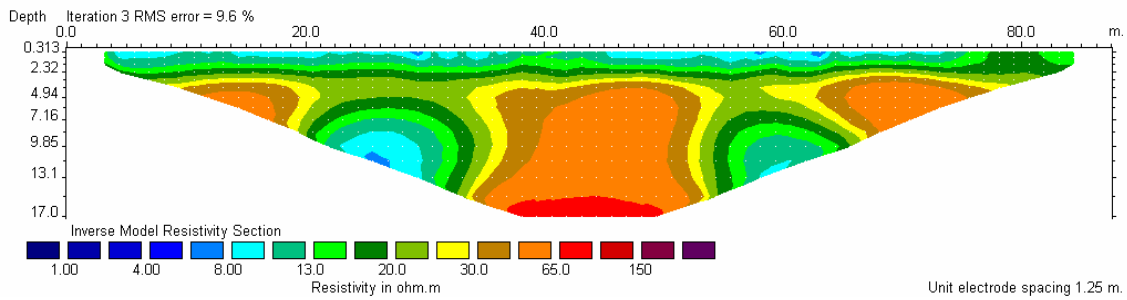


Figura E. 5. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia), filtrada con el programa X2IPI.

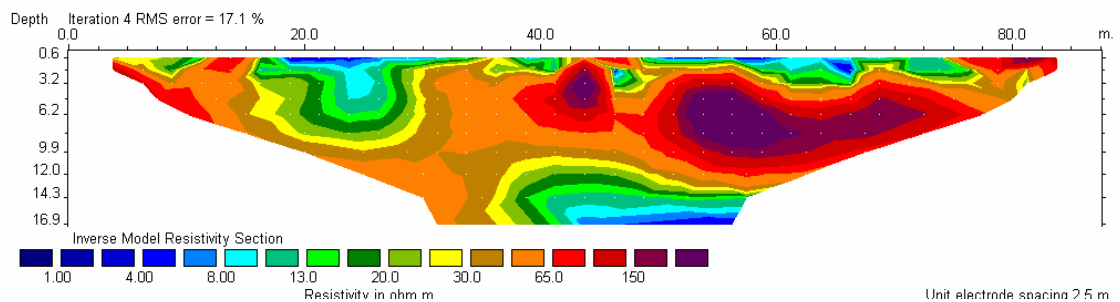


Figura E. 6. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre las balsas de purines del grupo de Fuente-Álamo (Murcia), sin filtrar.

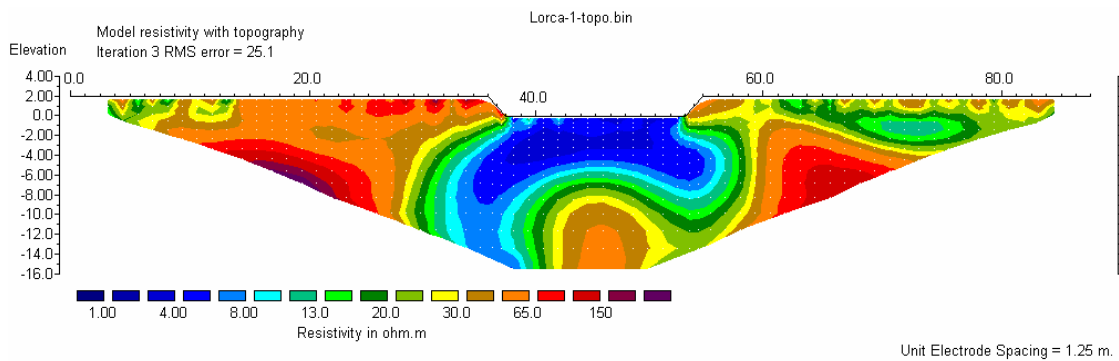


Figura E. 7. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre la balsa de purines Lorca 1, filtrada con el programa X2IPI.

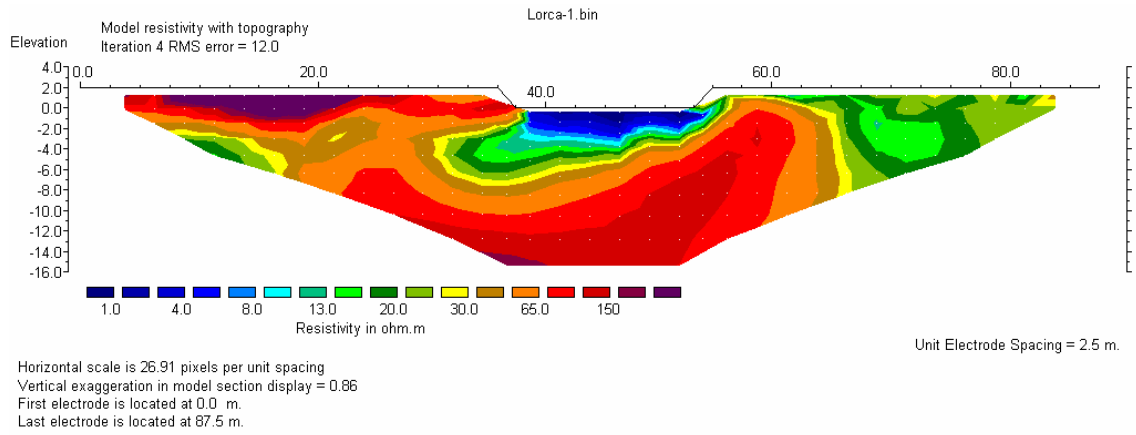


Figura E. 8. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre la balsa de purines Lorca 1, sin filtrar.

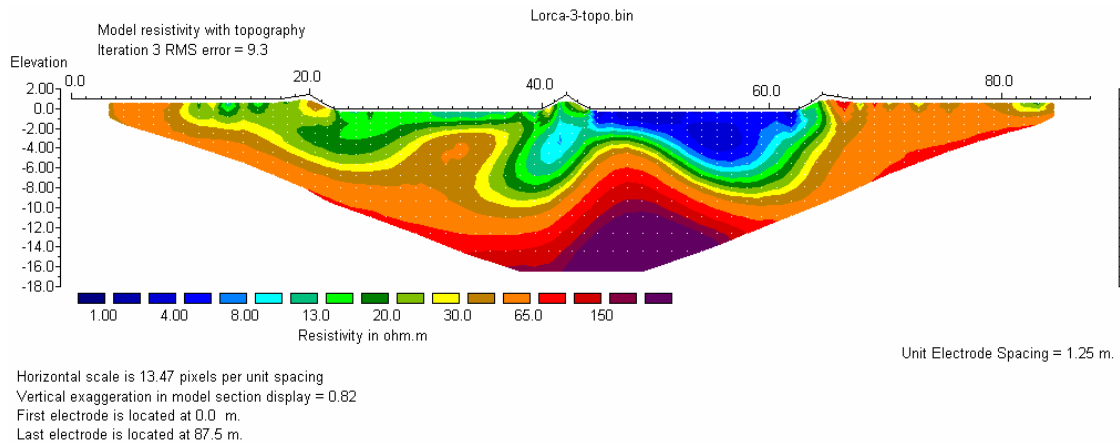


Figura E. 9. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre el grupo de balsas de purines Lorca 2, filtrada con el programa X2IPI.

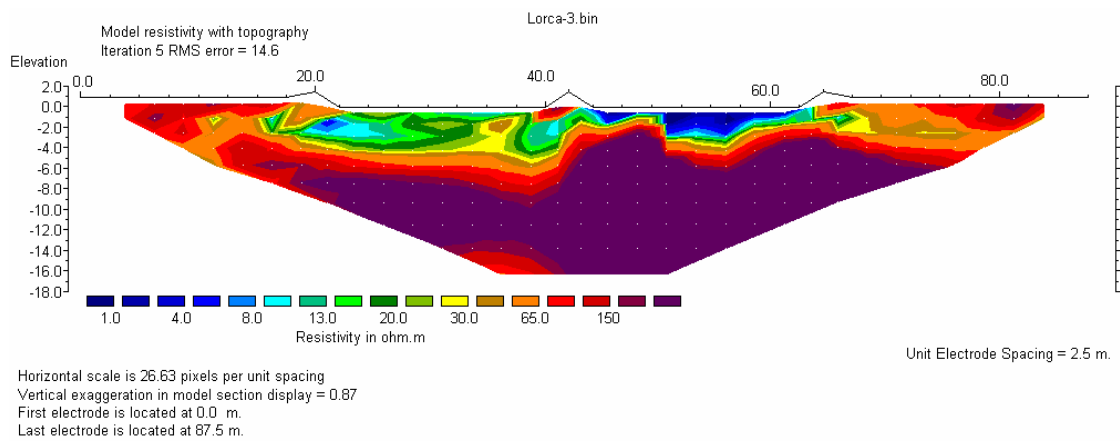


Figura E. 10. Seudosección geoelectrica 2D del perfil nº 1, realizado sobre el grupo de balsas de purines Lorca 2, sin filtrar.