

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA
PROGRAMA DE DOCTORADO: INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
EN GEOTECNOLOGÍAS. DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
CARTOGRÁFICA Y DEL TERRENO



AVANCE EN TÉCNICAS GEOFÍSICAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO MEDIANTE INNOVACIÓN Y
EL USO DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE INFORMACIÓN
ESPACIAL

TÉSIS DOCTORAL

PEDRO CARRASCO GARCÍA

Directores de Tesis:

DR. D. PABLO G. SILVA BARROSO. DR. D. ARTURO FARFÁN MARTÍN

Ávila, octubre de 2013

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por el Proyecto de Investigación CGL2012-37281-C02.01 (QTECTBETICA), Universidad de Salamanca.

Los doctores D. Pablo G. Silva Barroso y D. Arturo Farfán Martín profesores de la Universidad de Salamanca.

CERTIFICAN:

Que la tesis doctoral titulada “Avance en Técnicas Geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial” realizada por D. Pedro Carrasco García para optar al grado de Doctor por la Universidad de Salamanca, cumple todos los requisitos necesarios para su presentación y defensa ante el Tribunal que legalmente proceda.

Y para que conste, expedimos el presente certificado en Salamanca a 31 de Octubre de 2013.

Fdo. Dr. D. Pablo G. Silva Barroso

Fdo. Dr. D. Arturo Farfán Martín



INDICE GENERAL



INDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.- INTRODUCCION | 3 |
| 1.1.- La Geofísica aplicada. | 3 |
| 1.2.- Contexto de la Tesis. | 5 |
| 1.3.- Objetivos de la tesis. | 6 |
| 1.4.- Contenido de la tesis. | 6 |
| | |
| CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 8 |
| 1.- MÉTODOS ELÉCTRICOS | 13 |
| 1.1.- Relación entre Geología, Anomalía y la Resistividad. | 13 |
| 1.1.1. - Resistividad Aparente: Definición. | 16 |
| 1.2.- Dispositivos de registro. | 17 |
| 1.2.1. - Método tradicional del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). | 17 |
| 1.2.2.- Exploraciones Eléctricas en 2D. | 19 |
| 1.2.2.1 - Introducción. | 19 |
| 1.2.2.2 - Procedimiento de medida e instrumentación empleada. | 19 |
| 1.2.2.3 - Pseudosección. | 20 |
| 1.2.2.4 - Ventajas y desventajas de los diferentes dispositivos de registro. | 20 |
| 1.2.2.5 - Profundidad de Investigación | 21 |
| 1.2.2.6 - Sensibilidad. | 21 |
| 1.2.2.7 - Cobertura. Relación Señal /Ruido. | 22 |
| 1.2.2.8 - Configuraciones / Dispositivos..... | 23 |
| 1.2.2.9 - Procesamiento, Inversión e interpretación..... | 27 |
| 1.2.3. Exploración Eléctrica Tridimensional 3D | 27 |
| 1.2.3.1 - Introducción a las mediciones Tridimensionales..... | 27 |
| 1.2.3.2 - Tipos de Configuraciones para Mediciones Tridimensionales | 27 |
| 1.3.- Adquisición de datos en 3D (Mediciones Continuas en 3D) | 29 |
| 1.3.1.- Técnica de Inversión de Datos | 30 |
| 1.4.- Tomografía eléctrica marina (Sysmar Software) | 30 |
| 1.5.- Ejemplos de Aplicación | 32 |
| 1.5.1.-Determinación Estructural y geométrica de materiales permeables para la elaboración de un modelo numérico de flujo en León capital. | 32 |
| 1.5.2.- Determinación estructural y geométrica de materiales permeables para su empleo como depósito subterráneo mediante recarga artificial en la Luisiana (Sevilla) | 33 |
| 1.5.3.- Tomografía eléctrica 2D/3D para la determinación de zonas de karstificación (fracturas y huecos) en el embalse de Santolea (Teruel). | 34 |



| | |
|--|-----------|
| 1.5.4.- Tomografía eléctrica 3D para la determinación de zonas de huecos en Mallorca capital. | 36 |
| 1.5.5.-Tomografía eléctrica 3D para la localización de galerías mineras que afectan a la traza de un túnel (Detección de huecos) en Valencia..... | 37 |
| 1.5.6.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para evaluar el estado de un dique en el Puerto de Barcelona | 38 |
| 1.5.7.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica en el río Guadiana (Mérida) | 40 |
| 1.5.8.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica marina en Valencia | 41 |
| 1.6.- Equipo empleado | 42 |
| 2.- POLARIZACIÓN INDUCIDA (PI) | 43 |
| 2.1. - Origen del efecto de la polarización inducida. Generalidades. | 43 |
| 2.2. - Polarización de membrana. | 43 |
| 2.3. - Polarización de electrodos. | 44 |
| 2.4. - Técnica de medida de la polarización inducida en el dominio del tiempo. | 47 |
| 2.5. - Interpretación de los datos. | 51 |
| 2.6. - Valoración de método. Consideraciones finales | 52 |
| 2.7.- Ejemplos de aplicación | 53 |
| 2.7.1.- Realización de una prospección geofísica mediante tomografía eléctrica y polarización inducida en un vertedero en Sudáfrica..... | 53 |
| 2.7.2.- Realización de una prospección geofísica mediante tomografía eléctrica y polarización inducida para el análisis del estado del núcleo impermeable del embalse de Beninar (Almería). | 54 |
| 2.8. – Equipos empleados..... | 54 |
| 3.- MISE A LA MASSE (PUESTA A MASA) O POTENCIAL INDUCIDO | 56 |
| 3.1.-Principio del método..... | 56 |
| 3.2.- Parámetros de los Levantamientos..... | 57 |
| 3.3.- Aplicaciones en Exploración Minera..... | 57 |
| 3.4.- Aplicaciones en embalses y vertederos..... | 57 |
| 4.- MÉTODO DEL CAMPO ELÉCTRICO NATURAL (POTENCIAL ESPONTANEO)..... | 60 |
| 4.1- Introducción | 60 |
| 4.2. - Equipo para el levantamiento del campo natural. | 65 |
| 4.3.- Metodología y técnica de los trabajos de campo | 67 |
| 4.4. -Representación de los resultados de las observaciones..... | 69 |
| 4.5. - Bases de la Interpretación | 71 |
| 4.6. - Aplicación del Método | 71 |
| 4.7.- Medidas de potencial como indicadores de deformación | 73 |
| 4.8.- Ejemplos de Aplicación | 75 |
| 4.8.1.- Detección de zonas de filtración en el lecho del embalse de Beninar | 75 |
| 4.8.2.- Detección de zonas de filtración en el Canal de Monegros (Torralba de Aragón, Huesca) | 77 |
| 5.- SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SED T) | 79 |
| 5.1.- Introducción | 79 |
| 5.2.- Principios Físicos del SED T | 79 |
| 5.3.- Fundamento físico..... | 82 |



| | |
|--|------------|
| 5.4.- Equipos y configuraciones..... | 86 |
| 5.5.- Procesado de datos SEDT | 88 |
| 5.6.- Ejemplos de aplicación | 90 |
| 5.6.1.- Localización de materiales permeables para la ejecución de sondeos en una finca de La Herrera (Albacete)..... | 90 |
| 5.6.2.- Estudio estructural de materiales permeables en Las Cabezas de San Juan (Sevilla). | 90 |
| 5.6.3.- Localización de zonas favorables para la captación de aguas subterráneas en Ecija (Sevilla) | 91 |
| 5.6.4.- Estudios estructurales. Localización de zonas de fractura en Gerena (Sevilla) | 92 |
| 5.6.5.- Estudios estructurales. Estudio Geofísico realizado en Pozanco (Ávila). | 93 |
| 5.6.6.- Determinación de la posición de materiales salinos dentro de un permiso de investigación (Estudio estructural) en Mequinenza (Zaragoza). | 94 |
| 5.7.- Equipos empleados | 96 |
| 6.- SISTEMA VLF (VERY LOW FREQUENCY)..... | 99 |
| 6.1.- Introducción | 99 |
| 6.2.- Principios | 99 |
| 6.3.- Profundidad de penetración | 101 |
| 6.4.- Secciones de densidad de corriente..... | 102 |
| 6.5.- Toma de datos | 102 |
| 6.6.- Limitaciones del método..... | 103 |
| 6.7.- Aplicaciones..... | 103 |
| 6.8.- Ejemplos de aplicación | 103 |
| 6.8.1.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico en el T.M de Piedrahita (Ávila). | 103 |
| 6.8.2.- Detección de cavidades en el embalse de Santolea (Teruel). | 104 |
| 6.8.3.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico en el T.M de Santa María del Cubillo (Ávila). | 105 |
| 6.8.4.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico mediante la utilización de la tomografía eléctrica, el potencial espontáneo y el VLF en materiales graníticos en el T.M de Narrillos de San Leonardo (Ávila). | 105 |
| 6.9.- Equipo empleado | 106 |
| 7.- MÉTODO DE EMISIÓN DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO (ECE)..... | 108 |
| 7.1.- Principios teóricos..... | 108 |
| 7.2 - Resolución del problema inverso | 110 |
| 7.3 - Registro de Sondeos | 111 |
| 8.- SOFTWARE | 113 |
| 8.1.- Rockworks..... | 113 |
| 8.2.- Surfer | 114 |
| 8.3.- Voxler | 114 |
| 8.4.- SketchUp..... | 116 |
| 8.5.- Google earth | 117 |
| 8.6.- ArcGIS | 119 |
| 8.7.- Autocad..... | 120 |
| 8.8.- Excell..... | 121 |



CAPÍTULO 3: INNOVACIÓN EN PROSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS HIDROGEOLÓGICAS PROFUNDAS Y CARACTERIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE ALMACENES GEOLÓGICOS DE CO₂ MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PROFUNDA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO. ... 122

| | |
|--|------------|
| 1.- INTRODUCCIÓN | 125 |
| 1.1.- Prospección de estructuras hidrogeológicas profundas..... | 125 |
| 1.2.- Caracterización de almacenes geológicos de CO₂ | 125 |
| 1.2.1.- Almacenamiento Geológico de CO ₂ | 126 |
| 1.2.2.- Selección de un almacenamiento en un acuífero salino | 126 |
| 1.2.3.- Caracterización de un almacenamiento de CO ₂ | 130 |
| 1.2.4.- Monitorización del CO ₂ | 130 |
| 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 133 |
| 2.1.- Fundamento teórico de la tomografía eléctrica..... | 133 |
| 2.1.1.- Resistividad Aparente | 134 |
| 2.1.2.- Dispositivos | 134 |
| 2.1.3.- Resolución y profundidad de investigación..... | 135 |
| 2.1.4.- Técnica de campo, procedimiento de medidas | 135 |
| 2.1.5.- Pseudosección, procesado e inversión..... | 135 |
| 2.1.6.- Equipo, dispositivo y material necesario | 137 |
| 2.2.- Fundamento teórico del método electromagnético en el dominio del tiempo..... | 138 |
| 2.2.1.- Método de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo | 139 |
| 2.2.2.- Fundamento básico del método SEDT | 142 |
| 2.2.3.- Procesado de datos | 144 |
| 2.2.4.- Equipo, dispositivo y material necesario | 145 |
| 3.- REFLEXIONES FINALES | 148 |
| 4.- EJEMPLOS DE PROSPECCIONES GEOFÍSICAS PROFUNDAD MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO. | 149 |
| 4.1.- Ejemplo nº 1 (Cuenca del Duero, Los Arenales (Segovia))..... | 149 |
| 4.2.- Ejemplo nº 2 (Área de Albacete)..... | 150 |
| 4.3.- Ejemplo nº 3 (Borde de la Cuenca del Duero)..... | 151 |
| 4.4.- Ejemplo nº 4 Guadix (Granada)..... | 152 |
| 4.5.- Ejemplo nº 5 Cuenca del Duero (Ávila) | 153 |
| 4.6.- Ejemplo nº 6 Elaboración de un Modelo 3 D. Borde Sur de la Cuenca del Duero: Comarca de La Moraña (Ávila) | 154 |
| 4.7.- Ejemplo nº 7 Prospección para optimizar la zona y profundidad de sondeos..... | 155 |
| 4.8.- Ejemplo nº 8 Estudios estructurales mediante tomografía eléctrica profunda | 156 |
| 4.9.- Ejemplo nº 9 Determinación de la estructura, extensión lateral y potencia de los materiales salinos de interés de un complejo olistostrómico | 157 |
| 4.10.- Ejemplo nº 10 Estudio de la estructura y salinidad de la formación Utrillas mediante SEDT para la caracterización de un almacenamiento de CO ₂ | 158 |



4.11.- Ejemplo nº11 Determinación de la posición de materiales salinos dentro de un permiso de investigación (Estudio estructural) 159

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA..... 161

1.- INTRODUCCION 163

2.- INFORMACIÓN SOBRE LA ZONA DE TRABAJO 164

3.- SELECCIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO 165

4.- CAMPAÑA DE ADQUICISIÓN DE DATOS..... 165

5.- PROCESADO DE LOS DATOS 166

6.- INTEGRACIÓN DE TODA LA INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 167

7.- REDACCIÓN DEL INFORME FINAL 167

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANALISISDE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS 168

1.- INTRODUCCIÓN 174

2.- REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL)..... 175

2.1.- Introducción 175

2.2.- Objetivos..... 176

2.3.- Justificación de los trabajos realizados 177

2.4.- Resultados obtenidos 177

2.4.1.- Bloque 3D 178

2.4.2.- Los perfiles 1,2,3, y 4 184

2.4.3.- Perfiles complementarios 186

2.5.- Análisis de la investigación..... 189

3.- CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENINAR. T,M. BERJA (ALMERÍA). 191

3.1.- Introducción 191

3.2.- Potencial Espontáneo (P.E.)..... 191

3.2.1.- Interpretación..... 193

3.3.- Tomografía Eléctrica (T.E.)..... 195

3.3.1.- Interpretación..... 196



| | |
|---|------------|
| 3.4.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT) | 201 |
| 3.5.- Emisión de campo Electromagnético (ECE) | 204 |
| 3.5.1.- Trabajos en superficie | 204 |
| 3.5.2.- Interpretación de los resultados | 204 |
| 3.6.- Trabajos en sondeos..... | 207 |
| 3.6.1.- Resultados. | 208 |
| 3.6.2.- Sondeo S2 – Inclínómetro I11..... | 208 |
| 3.6.3.- Sondeo S9 – Inclínómetro I18..... | 209 |
| 3.6.4.- Sondeo S11 – Inclínómetro I20..... | 210 |
| 3.7.- Análisis conjunto de resultados | 211 |
| 3.7.1.- Estudio tridimensional de la masa deslizada | 211 |
| 4.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES (SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO. | 215 |
| 4.1.- Antecedentes..... | 215 |
| 4.2.- Geología e hidrogeología | 217 |
| 4.2.1.- Encuadre Geológico | 217 |
| 4.2.2.- Hidrogeología..... | 218 |
| 4.3.- Trabajos realizados..... | 220 |
| 4.3.1.- Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) | 221 |
| 4.3.2.- Tomografía Eléctrica | 221 |
| 4.4.- Método electromagnético V.L.F | 222 |
| 4.5.- Creación de Modelo 3D mediante el programa SketchUP | 223 |
| 4.6.- Resultados..... | 224 |
| 5.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)..... | 227 |
| 5.1.- Introducción y objetivos | 227 |
| 5.2.- Marco geológico | 227 |
| 5.3.- Investigaciones geofísicas | 227 |
| 5.3.1.- Justificación de los trabajos..... | 227 |
| 5.3.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)..... | 228 |
| 5.4.- Análisis de la investigación..... | 238 |



| | |
|---|------------|
| 6.- PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN | 239 |
| 6.1.- Introducción y objetivos | 239 |
| 6.2.- Marco geológico e hidrogeológico..... | 239 |
| 6.3.- Reconocimiento geológico de detalle | 245 |
| 6.4.- Análisis de las filtraciones | 255 |
| 6.5.- Investigaciones geofísicas | 258 |
| 6.5.1.- Justificación de los trabajos..... | 259 |
| 6.5.2.- Potencial Espontáneo (PE) | 259 |
| 6.5.3.- Tomografía Eléctrica (TE)..... | 262 |
| 6.5.4.- Puesta Masa (PM) | 263 |
| 6.5.5.- Interpretación conjunto de los perfiles de TE y medias de PM..... | 265 |
| 6.6.- Análisis de la investigación..... | 290 |
| 6.7.- Recomendaciones y propuestas de actuación | 291 |
| 6.8.- Actuaciones realizadas..... | 295 |
| 7.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN | 299 |
| 7.1.- Introducción y objetivos..... | 299 |
| 7.2.- Marco geológico | 300 |
| 7.3.- Antecedentes históricos..... | 307 |
| 7.4.- Reconocimiento geológico de detalle | 318 |
| 7.5.- Ensayos con trazador salino..... | 329 |
| 7.6.- Investigaciones geofísicas | 334 |
| 7.6.1.- Potencial espontáneo | 336 |
| 7.6.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)..... | 339 |
| 7.6.3.- Potencial Inducido (P.I.) | 342 |
| 7.6.4.- Interpretación 2D conjunta de los perfiles de investigación de TE y PI..... | 343 |
| 7.6.5.- Interpretación bidimensional de los resultados de PI..... | 355 |
| 7.7.- Análisis de la investigación..... | 359 |
| 8.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)..... | 361 |
| 8.1.- Introducción | 361 |



| | |
|---|------------|
| 8.2.- Método del Potencial Espontáneo (PE) | 361 |
| 8.2.1.- Trabajos relacionados con la zona inundada del embalse | 362 |
| 8.2.2.- Trabajos relacionados con la zona no inundada del embalse | 367 |
| 8.2.- Método del Potencial Inducido (PI) | 374 |
| 8.3.- Método de Tomografía Eléctrica (TE) | 375 |
| 8.4.- Análisis conjunto de resultados (TE) | 379 |
| 8.5.- Análisis de la investigación | 390 |
| 9.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS DE MAMÍFEROS MIOCENOS DEL CERRO DE LOS BATALLONES. T.M DE TORREJÓN DE VELASCO (MADRID). | 392 |
| 9.1.- Introducción | 392 |
| 9.2.- Aspectos Geológicos del Cerro Batallones | 393 |
| 9.2.1.- Unidades Litoestratigráficas | 394 |
| 9.2.1.1 - <i>Unidad I. Facies bentonítica</i> | 394 |
| 9.2.1.2 - <i>Unidad II. Facies sepiolíticas</i> | 395 |
| 9.2.1.3 - <i>Unidad III. Facies detríticas y calcáreas</i> | 396 |
| 9.2.2.- Las trampas de vertebrados y sus rellenos | 398 |
| 9.3.- Prospección Geofísica en el cerro Batallones | 401 |
| 9.3.1.- Perfiles realizados de tomografía eléctrica 2D durante las campañas de campo del 2002 al 2013 | 410 |
| 9.3.1.1 – <i>Campaña 2002: perfiles de reconocimiento de los yacimientos BAT-1 y BAT-2 en sus estados iniciales de excavación.</i> | 410 |
| 9.3.1.3 – <i>Campaña 2004: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-8(perfil BAT8-3).</i> .. | 412 |
| 9.3.1.4 – <i>Campaña 2006: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-9 (perfil BAT9-4).</i> .. | 416 |
| 9.3.1.5 – <i>Campaña 2007: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-10 (perfil BAT10-1)</i> | 418 |
| 9.3.1.6 – <i>Campaña 2010: perfiles de caracterización geológica del Cerro de los Batallones en transecto N-S (perfiles 1/10 y 3/10) y caracterización del yacimiento en excavación BAT-3 (perfil 2/10)</i> | 423 |
| 9.3.1.7 – <i>Campaña 2013 perfiles de Caracterización 2D y 3D del yacimiento en excavación BAT-3.</i> | 424 |
| 9.3.2.- Tomografía Eléctrica 3D | 426 |
| 9.3.3.- Creación de un Modelo 3D mediante el programa SketchUP | 427 |
| 9.4.- Análisis de la investigación y mejoras | 430 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES | 432 |
| 1.- CONCLUSIONES | 434 |



| | |
|--|------------|
| 1.1.- Aportaciones originales. | 434 |
| 1.2.- Conclusiones metodológicas. | 435 |
| 1.3.- Consideraciones finales. | 438 |
| | |
| 2.- FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN | 439 |
| | |
| CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA | 441 |
| | |
| 1.- BIBLIOGRAFÍA | 443 |
| | |
| ANEJOS..... | 465 |
| | |
| REPORTAJE FOTOGRÁFICO | 466 |



INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Variación en la resistividad de una disolución de NaCl en función de su concentración | 14 |
| Figura 2. Dispositivo Electrónico convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (http://technologymechatronic.wordpress.com/category/electronica/page/2/)..... | 16 |
| Figura 3. Dispositivo Electrónico convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (http://www.geofisica.cl/GMPE/Software_GeoMod.htm) | 17 |
| Figura 4. Dispositivo electrónico tetrapolar convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (Loke, M.H., 2002) | 17 |
| Figura 5. Diferentes Dispositivos usadas en Sondeos Eléctricos de Resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes Factores geométricos (Loke, 2002)..... | 18 |
| Figura 6. Dispositivo Wenner-Schlumberger para un perfil eléctrico 2-D y 3D y secuencia de medidas empleadas para construir la pseudosección (Loke, 2002) | 19 |
| Figura 7. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner y Wenner –Schlumberger obtenidas para una distancia interelectrónica de 5 metros y distintos niveles (Loke, 2002)..... | 21 |
| Figura 8. Comparación de la Cobertura para los dispositivos de electrodos y pseudosección de datos para las configuraciones Wenner-Schlumberger (Izda) y Polo-Dipolo (Dcha)..... | 22 |
| Figura 9. Sensibilidad para la configuración Wenner (Loke, 2002) | 23 |
| Figura 10. Sensibilidad para la Configuración Dipolo-Dipolo (Loke, 2002) | 24 |
| Figura 11. Sensibilidad para la configuración Wenner-Schlumberger (Loke, 2002) | 25 |
| Figura 12. Sensibilidad para la configuración Polo-Polo (Loke, 2002)..... | 25 |
| Figura 13. Dispositivo a) Polo-Dipolo Directo, b)Polo-Dipolo Inverso (Loke, 2002) | 26 |
| Figura 14. Sensibilidad para la configuración Polo-Dipolo (Loke, 2002)..... | 26 |
| Figura 15. Localización de los electrodos de potencial correspondientes a un electrodo de corriente usado para mediciones para un conjunto de datos completo (Loke, 2002) | 28 |
| Figura 16. Malla de 10 por 10 electrodos (Técnica de análisis Continuo en 3D) (Loke, 2002). | 29 |



Figura 17. Dispositivo de medidas (http://www.irisinstruments.com/Pdf%20file/SyscalPro_Gb.pdf)31

Figura 18. Placa galvánica impregnada de solución salina.....32

Figura 19. Perfil 1 con los sondeos paramétricos e interpretación realizada. Procesado mediante programa Res2Dinv32

Figura 20. Imagen 3D montada mediante el software Sketchup de los perfiles realizados33

Figura 21. Comparación entre la columna litológica obtenida en un sondeo de investigación y los valores de resistividad obtenidos por el perfil de TE. Empleo del sondeo con carácter paramétrico33

Figura 22. Imagen 3D montada mediante el software Sketchup de los 8 perfiles realizados en la zona de estudio.....34

Figura 23. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D34

Figura 24. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D montado con el software Sketchup35

Figura 25. Modelo 3D realizado mediante el programa Voxler. Delimitación de las zonas de cavidades y vista frontal de las mismas35

Figura 26. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D. Software Voxler.....36

Figura 27. Delimitación de la isosuperficie de resistividad que refleja el límite de extensión de la cavidad. Software Voxler.....36

Figura 28. Perfil de TE 2D mostrando el emplazamiento de las posibles galerías mineras y del túnel a ejecutar. Procesado mediante programa Res2Dinv37

Figura 29. Imagen 3D montada con programa Sketchup de los perfiles 2D realizados mostrando la situación de las galerías mineras y la posible correlación entre las mismas.....38

Figura 30. Ejemplo de perfil de TE 2D mostrando el emplazamiento de los diferentes tipos de sección del dique y las zonas de alteración. Procesado mediante programa Res2Dinv.....38

Figura 31. Imagen 3D montada con programa Sketchup de los perfiles 2D realizados39

Figura 32. Perfil 1 con los sondeos paramétricos e interpretación realizada. Procesado mediante programa Res2Dinv.40

Figura 33. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica marina 2D realizado mediante programa sysmar. Procesado mediante programa Res2Dinv.41



| | |
|---|----|
| Figura 34. Creación de la polarización de membrana. Posición de los iones antes de la aplicación de un potencial eléctrico a) y después de la aplicación de una corriente eléctrica b) (Kearey y Brooks, 1991)..... | 44 |
| Figura 35. Membrane and electrode polarization effects. Electrolytic flow in upper pore, electrode polarization in lower pore.) (Kearey y Brooks, 1991)..... | 45 |
| Figura 36. Campo primario + Campo de Polarización | 45 |
| Figura 37. Interrupción de la corriente. Distribución de los iones volviendo a su estado original | 46 |
| Figura 38. Gráfica de Intensidad y Potencial | 48 |
| Figura 39. Onda que emite el aparato receptor | 48 |
| Figura 40. Momento en el que se realiza la medida..... | 50 |
| Figura 41. Curva de descarga durante un intervalo..... | 50 |
| Figura 42. Ejemplo de Tomografía eléctrica - Polarización Inducida en un vertedero para la detección de filtraciones (Rosquist et al, 2003) | 53 |
| Figura 43. Perfil de Tomografía Eléctrica y Polarización Inducida realizados para la detección de zonas de alteración en el núcleo de la presa. Procesado con programa Res2dinv. | 54 |
| Figura 44. Ubicación de cuerpos secundarios mineralizados (Parasnis, 1973) | 57 |
| Figura 45. Tipos de dispositivos electródicos empleados en embalses y vertederos (Martínez-Pagán, 2004) | 58 |
| Figura 46. Ejemplo de perfil realizado en el Embalse de Beninar (Almería) con la técnica misse a la mase | 58 |
| Figura 47. Ejemplo de planta realizada con la técnica misse a la mase y programa Surfer. Presa de Cervera (Palencia) | 59 |
| Figura 48. Esquema del nacimiento de un campo natural sobre un depósito mineral (Iakubovskii y Liajov, 1980)..... | 61 |
| Figura 49. Capa eléctrica binaria en un capilar. Direcciones: 1) marcha del líquido; 2) de la corriente eléctrica (Iakubovskii y Liajov, 1980) | 63 |
| Figura 50. Corrientes de filtración en una capa acuífera. 1) arenas arcillosas; 2) arenas; 3) arcillas; 4) dirección de la filtración; 5) líneas de corriente (Iakubovskii y Liajov, 1980)..... | 64 |
| Figura 51. Esquema básico del dispositivo de medición pan el levantamiento del campo | |



- (Iakubovskii y Liajov, 1980).....65
- Figura 52. Electrodo impolarizables. a) en corte (1) cuerpo. 2) tapón de plástico. 3) varilla de cobre), b) aspecto exterior. Electrodo de pozo en corte: c) electrodo de vaso cerámico poroso (1) vaso. 2) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 3) solución de CuSO₄, o KCl en gelatina. 4) masilla o resina epoxi. 5) tubo de vidrio. 6) tubo de vinilo. 7) tapón de plástico, 8) goma virgen. 9) cable. 10) conductor del cable; d) electrodo de canal 11) vaso. 12) canal. 13) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 14) solución de CuSO₄, o KCl en gelatina. 15) tapón de plástico. 16) goma virgen. 17) conductor del cable. 18) cable (Iakubovskii y Liajov, 1980)66
- Figura 53. Esquema de montaje del dispositivo para la investigación del campo natural. Métodos: I) de potenciales, con carrete Kt, fijo. II) de potenciales, con carrete Km móvil. III) de gradientes; IM) instrumento de medición (Iakubovskii y Liajov, 1980)68
- Figura 54. Mapa de líneas equipotenciales del campo natural en un yacimiento sulfurado. 1) Isolíneas de campo natural; 2) Curvas de nivel; I a XX curvas de nivel (Iakubovskii y Liajov, 1980)69
- Figura 55. Gráfica del potencial del campo natural sobre un filón polimetálico. 1) calizas; 2) esquistos 3) filón potimetálico; gráficas: 4) de las observaciones principales; 5) de las observaciones repetidas (Iakubovskii y Liajov, 1980).....70
- Figura 56. Mapa de gráficas de potencial en un yacimiento de calcopirita 1) sedimentos cuaternarios y corteza de erosión: 2) porfiritas; 3) jaspes; 4) esquistos cuarzosericíticos y cloriciticos; 5) menas de calcopirita a) ricas, b) pobres; gráficas de potencial: 6) en sondeos, 7) a lo largo de la línea de investigación (datos del levantamiento superficial) (Iakubovskii y Liajov, 1980)70
- Figura 57. Gráfica del potencial del campo natural sobre el afloramiento de un manantial cubierto por aluviones (según N. Severianov). 1) aluviones; 2) aluviones antiguos; 3) calizas; 4) tobas de rocas eruptivas; 5) cavidad cárstica (Iakubovskii y Liajov, 1980).....73
- Figura 58. Esquema de la configuración de los electrodos de registro del Potencial Espontáneo en ensayos triaxiales. (J. R. Moore, 2005).....73
- Figura 59. Ensayos de deformación triaxiales. A) Relación entre la presión aplicada y el potencial registrado en cada electrodo en función del tiempo. B) Variación del Potencial registrado a lo largo de la prueba. Nótese el descenso en los valores de potencial registrados tras la fracturación del material. (J. R. Moore, 2005)74
- Figura 60. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los cambios en el signo del potencial. Tratamiento de datos con Software Surfer.....75
- Figura 61. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica. Superior derecha. Variación del PE y PI. Inferior: perfil de Tomografía Eléctrica. Superior Izquierda. Interpretación geológica del tramo del perfil de Tomografía Eléctrica que discurre bajo la lámina de embalse (esquina superior derecha).....76



Figura 62. Plano de anomalías de PE e interpretación de las mismas en relación con las surgencias de la zona. Tratamiento de datos con Software Surfer..... 78

Figura 63. Plano de Anomalías de PE sobre ortofoto y MDT 78

Figura 64. Dispositivo general de un sondeo electromagnético (Navarro Luna, 2006)..... 79

Figura 65. Campo magnético primario (Navarro Luna, 2006). 80

Figura 66. Fuerza electromotriz (Navarro Luna, 2006) 80

Figura 67. Campo magnético secundario (Navarro Luna, 2006)..... 80

Figura 68. Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor (Navarro Luna, 2006) 81

Figura 69. Distribución de corrientes tras el corte de la corriente en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006). 81

Figura 70. Distribución de corrientes transcurrido un tiempo desde el corte de la en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006)..... 82

Figura 71. Densidad de corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos (Navarro Luna, 2006) 82

Figura 72. Profundidad de penetración en función de la resistividad del medio 84

Figura 73. Comparación de un punto de investigación SEDT con 10 stacks (línea azul) en el que se ve la afección del mismo por el ruido ambiente que impide analizar la parte final de la curva. Se representa también el mismo punto pero aumentando el stacking hasta 1000 medidas obteniéndose una curva clara que permite su interpretación 85

Figura 74. Densidad de corriente recogida para un pulso de corriente en diferentes tiempos para un medio estratificado con diferentes resistividades. Como podemos ver, la corriente tiende a concentrarse en las capas más conductoras disminuyendo la penetración para un mismo tiempo (Kirsch, 2006) 86

Figura 75. Configuraciones del sistema SEDT (Fuente: Manual de operaciones del Equipo TerraTem) 87

Figura 76. Configuración DOWN-HOLE del sistema SEDT (Fuente: Manual de operaciones del Equipo TerraTem)..... 88

Figura 77. Tomografía electromagnética. Tratamiento de datos mediante Software Surfer ... 90

Figura 78. Modelo 3D de resistividades creado mediante el software Voxler y obtenido a partir de los SEDT realizados en campo 91



Figura 79. Planta de amplitudes obtenida en el estudio mostrando las zonas favorables para la ejecución de sondeos de extracción. Planta georeferenciada en Google Earth.....92

Figura 80. Tomografía electromagnética mostrando la presencia de una falla entre los SEDT 8 y 992

Figura 81. Posición e interpretación geológica de los SEDT realizados. Software Rockworks93

Figura 82. Modelo geológico 3D obtenido a partir de la interpretación geológica de los SEDT. Software Rockworks.93

Figura 83. Perfiles geológicos realizados a partir del modelo 3D94

Figura 84. SEDT paramétrico y modelo geológico.....95

Figura 85. Techo (Izda) y muro (Izda) de la capa de interés obtenido a partir de los SEDT ejecutados en la zona de estudio. Software Surfer.....95

Figura 86. Potencia de los materiales de interés (Izda) y bloque 3D (Dcha) mostrando el techo y muro de los materiales de interés así como los resultados de los SEDT del estudio. Software Rockworks96

Figura 87. Esquema de funcionamiento del sistema VLF (Ogilvy y Lee, 1991). 100

Figura 88. Izda. Componentes del campo EM de una emisora remota de VLF y corrientes eléctricas en la superficie. Derecha. Componentes del campo eléctrica a lo largo del perfil que cruza perpendicularmente la fractura (Ogilvy y Lee, 1991)..... 101

Figura 89. Sección de densidad de corriente de un perfil VLF..... 102

Figura 90. Sección VLF de investigación mediante el sistema MG..... 104

Figura 91. Perfil VLF (superior) y de Tomografía Eléctrica (inferior) para la detección de cavidades..... 104

Figura 92. Perfil VLF con el filtro para 20 m de profundidad (superior) y sección de densidad de corriente (inferior)..... 105

Figura 93. Perfiles de tomografía eléctrica, potencial espontáneo y VLF para determinación de una fractura en materiales graníticos para aprovechamiento hidrogeológico 106

Figura 94. Fenómeno de polarización generado por fenómenos de deformación y rotura masiva de la estructura cristalina y partículas dieléctricas. 109

Figura 95. Testificación de sondeos. Distribución de impulsos electromagnéticos 112



Figura 96. Visualización 3D de datos geológicos obtenidos mediante geofísica con Rockworks 113

Figura 97. Mapa de contorno de PE creado con Surfer 114

Figura 98. Bloque 3D creado a partir de datos de Tomografía eléctrica con Voxler para la localización de fugas 115

Figura 99. Bloque 3D creado a partir de datos de Tomografía eléctrica con Voxler para la detección de restos arqueológicos 115

Figura 100. Modelo creado en SketchUp para la localización de un colector mediante tomografía eléctrica 116

Figura 101. Modelo creado en SketchUp para la caracterización de un nivel con presencia de caolín 117

Figura 102. Visualización de capa geológica incluida en Google Earth 118

Figura 103. Planta de amplitudes superpuesta en Google Earth mostrando las zonas favorables para la ejecución de sondeos de extracción. 118

Figura 104. Visualización de los puntos de medidas reanalizados de Potencial espontáneo mediante programa ArcGis en una determinada zona de investigación. 119

Figura 105. Georeferenciación de datos geofísicos mediante el programa Autocad 120

Figura 106. Creación de un perfil de la técnica misse a la msse (voltaje) mediante excell.. 121

Figura 107. Calculo de las resistividades de la formación Utrillas para diferentes salinidades del acuífero a una temperatura de 74°C. 128

Figura 108. Gráfica que nos relaciona la Resistividad de la formación con su temperatura y su salinidad (<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro05/Introduction/TermProjects/fortson.htm>) 128

Figura 109. Grafica que representa el cálculo del factor de formación (Utrillas)..... 129

Figura 110. Grafica Salinidad vs Resistividad e la formación (Utrillas) 129

Figura 111. Variación en la resistividad de la roca almacén ($\Omega \cdot m$) en función de la variación en la saturación en gas (S_g) (F.Utrillas) 131

Figura 112. Variación en la resistividad de la roca almacén ($\Omega \cdot m$) en función de la variación en la saturación en gas (S_g) (F.Boñar)..... 132

Figura 113. Diferentes dispositivos usados en Tomografía Eléctrica (Loke, 2002). 134



Figura 114. Dispositivo para prospecciones eléctricas 2-D y secuencia de medidas (Loke, 2002).
..... 135

Figura 115. Modelo de bloques y datos de la resistividad aparente (Loke, 2002)..... 136

Figura 116. Dispositivo general de un sondeo electromagnético (Navarro Luna, 2006)..... 139

Figura 117. Campo magnético primario (Navarro Luna, 2006). 140

Figura 118. Fuerza electromotriz (Navarro Luna, 2006). 140

Figura 119. Campo magnético secundario (Navarro Luna, 2006). 140

Figura 121. Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor (Navarro Luna, 2006). 141

Figura 121. Distribución de corrientes tras el corte de la corriente en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006). 141

Figura 122. Distribución de corrientes transcurrido un tiempo desde el corte de la en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006). 142

Figura 123. Densidad de la corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos (Navarro Luna, 2006). 142

Figura 124. Profundidades de penetración para diferentes conductividades (Navarro Luna, 2006).
..... 144

Figura 125. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en la Cuenca del Duero (Segovia)..... 149

Figura 126. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en el área de Albacete..... 150

Figura 127. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en la Cuenca del Duero (Zamora) 151

Figura 128. Perfil electromagnético realizado en Guadix (Granada)..... 152

Figura 129. Perfil de Tomografía electromagnética realizado en la Cuenca del Duero (Ávila)
..... 153

Figura 130. Modelo 3D realizado mediante programa Rockworks partiendo de datos de SEDTen Pozanco (Ávila). 154

Figura 131. Pseudosección (resistividades aparentes) de una finca en la Herrera (Albacete).
..... 155

Figura 132. Sección procesada (resistividades reales) de una finca en la Herrera (Albacete).
..... 155



Figura 133. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Baza (Granada). 156

Figura 134. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Baza (Granada). 156

Figura 135. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Guadix (Granada). 156

Figura 136. Bloque 3D generado a partir de datos de SEDT de una zona del T.M de Las Cabezas de San Juan (Sevilla). Visualización con Software Voxler. 157

Figura 137. SEDT paramétrico para la determinación de la resistividad en la formación Utrillas realizado 158

Figura 138. SEDT paramétrico para la determinación de la resistividad en la formación Utrillas realizado en el sondeo Villameriel..... 158

Figura 139. SEDT profundo realizado sobre el Sondeo Monzón. 159

Figura 140. Techo (Izda) y muro (Izda) de la capa de interés obtenido a partir de los SEDT ejecutados en la zona de estudio. 160

Figura 141. Potencia de los materiales de interés (Izda) y bloque 3D (Dcha) mostrando el techo y muro de los materiales de interés así como los resultados de los SEDT del estudio..... 160

Figura 142. Corte geológico esquemático del emplazamiento del mismo..... 175

Figura 143. Plano de situación de los perfiles de investigación realizados en la zona de estudio. 177

Figura 144. Modelo topográfico de la zona de estudio empleado en la modelización 3D (Software Voxler). 179

Figura 145. Bloque 3D de resistividades (Software Voxler). 179

Figura 146. Bloque 3D de resistividades (Software Voxler). 180

Figura 147. Modelo de isosuperficies para la delimitación espacial de posibles cavidades (izquierda) y zonas de fracturación (derecha). Visualización mediante Voxler. 181

Figura 148. Detalle del modelo de isosuperficies delimitando posibles cavidades (rojo) y zonas de fracturación (amarillo). .Visualización mediante Voxler..... 181

Figura 149. Plantas de resistividad a diferentes profundidades (Software Autocad)..... 182

Figura 150. Plantas de resistividad a diferentes profundidades (Software Autocad)..... 182



Figura 151. Vista frontal del bloque 3D correspondiente al perfil TE 5 mostrando la posible conexión entre las anomalías superficiales y la profunda (Software Voxler)..... 183

Figura 152. Imagen cenital de las isosuperficies generadas para delimitar la zona de posibles cavidades y de fracturación (Software Voxler)..... 183

Figura 153. Imagen 3D de los perfiles TE 1, 2, 3 y 4 (Software SketchUp). 184

Figura 154. Sección geoelectrica de los perfiles 3 (arriba) y 4 (abajo)..... 185

Figura 155. Sección geoelectrica de los perfiles 1 (arriba) y 2 (abajo)..... 185

Figura 156. Sección geoelectrica del perfil P12..... 186

Figura 157. Esquema mostrando la alineación existente entre la anomalía resistiva del perfil P12 y las del bloque 3D (Software Autocad) 187

Figura 158. Sección geoelectrica del perfil P13..... 187

Figura 159. Montaje 3D conjunto de los perfiles realizados y bloque 3D (Software SketchUp) 188

Figura 160. Plano que une las anomalías correspondientes a zonas de fracturación y posibles cavidades. (Software Voxler)..... 189

Figura 161. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizado en la margen derecha para el estudio del deslizamiento (Representación mediante Software ArcGIS) 192

Figura 162. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de las principales grietas observables en superficie (Software Surfer)..... 192

Figura 163. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los límites geofísicos de la zona deslizada. (Software Surfer)..... 193

Figura 164. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los bloques geofísicos detectados y la zona de ruptura entre los mismos (Software Surfer)..... 194

Figura 165. Potencial Espontáneo en la zona sur de estudio mostrando los efectos de Oxidación-Reducción (Software Surfer) 195

Figura 166. Planta con la posición de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados (Software ArcGIS)..... 195



| | |
|--|-----|
| Figura 167. Perfil Longitudinal-1 de Tomografía Eléctrica..... | 197 |
| Figura 168. Perfil Longitudinal-2 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica..... | 198 |
| Figura 170. Perfil Transversal de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica..... | 200 |
| Figura 170. Perfil P-5 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica..... | 200 |
| Figura 171. Plano de grietas existentes en la zona de afección del deslizamiento de la margen derecha del embalse de Benínar (Software ArcGIS) | 201 |
| Figura 172. Plano con indicación de la posición de los SEDT realizados en la zona de la margen derecha (Software ArcGIS)..... | 202 |
| Figura 173. Punto de investigación SEDT N°2..... | 203 |
| Figura 174. Plano de Intensidad ECE en la zona de barranco al norte del poblado (Software Surfer) | 205 |
| Figura 175. Plano de zonación de anomalías ECE relacionadas con los posibles límites del deslizamiento (Software Surfer) | 206 |
| Figura 176. Comparación entre las anomalías ECE y los resultados del sistema de Potencial Espontáneo (Software Surfer)..... | 207 |
| Figura 177. Resultados de la testificación ECE del sondeo S2 (Inclinómetro I11)..... | 209 |
| Figura 178. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclinómetro I11)..... | 209 |
| Figura 179. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclinómetro I11)..... | 210 |
| Figura 180. Potencia de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos. (Software Surfer) | 211 |
| Figura 181. Plano de isopacas de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos e investigaciones geofísicas T.E. y SEDT (Software Surfer). | 212 |
| Figura 182. Isobatas del muro de los materiales carbonatados (coluvión) establecidas a partir de todas las fuentes de información disponibles (sondeos y geofísica) teniendo en cuenta el efecto de las fracturas (Isolíneas cada 5 m). 3D realizado mediante Software Surfer..... | 212 |
| Figura 183. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada. | 213 |



Figura 184. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada (Software Surfer).214

Figura 185. Fotografías del Pueblo de Linares y charca de la fuente mineral antes de quedar bajo el Embalse.....215

Figura 186. Localización en U.T.M de la charca de la fuente de los Aguachines mediante la superposición de un plano del año 1931 y uno actual.....216

Figura 187. Mapa Geológico de la Zona (Software Google Earth)218

Figura 188. Ejemplo de SEDT realizado221

Figura 189. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica realizado.....222

Figura 190. Ejemplo de perfil de VLF.....223

Figura 191. Modelo 3D (Software SketchUp)224

Figura 192. Imagen mediante Tomografía Eléctrica de la estructura geológica y propuesta de sondeo225

Figura 193. Posición de los perfiles de investigación TE realizados.....229

Figura 194. Perfil de Investigación PG-1 con dispositivo Polo-Dipolo.....231

Figura 195. Perfil de Investigación PG-1 con dispositivo Wenner-Schlumberger.....232

Figura 196. Perfil de Investigación PG-2 con dispositivo Polo-Dipolo.....233

Figura 197. Perfil de Investigación PG-2 con dispositivo Wenner-Schlumberger.....234

Figura 198. Registro inclinométrico del sondeo S-2 (Geobruigg).....235

Figura 199. Perfil de Investigación PG-3 con dispositivo Polo-Dipolo.....236

Figura 200. Perfil de Investigación PG-3 con dispositivo Wenner-Schlumberger.....237

Figura 201. Registro inclinométrico del sondeo S-5 (Geobruigg).....237

Figura 202. Modelo 3D de la zona de estudio (Software Sketchup)238

Figura 203. Unidad Surpirenaica Central (tomado de R. Soto y A.M. Casas, 2001)240

Figura 204. Geología de la cuenca de Aínsa (Fuente: Mapa geológico de los Pirineos, IGME)240

Figura 205. Estructuras de orientación N-S en la cuenca de Aínsa (tomado de R. Soto y A.M.



| | |
|---|-----|
| Casas, 2001)..... | 241 |
| Figura 206. Geología del entorno de la presa de Mediano (modificado de A. Teixell y A. Barnolas, 1995)..... | 242 |
| Figura 207. Cortes geológicos (modificado de A. Teixell y A. Barnolas, 1995)..... | 243 |
| Figura 208. Dominio del Sinclinal de Tremp (CHE)..... | 243 |
| Figura 209. UUHH Litera Alta (CHE)..... | 244 |
| Figura 210. MAS Litera Alta (090.041)..... | 245 |
| Figura 211. Principales contactos y orientaciones de formaciones en el entorno de la presa de Mediano | 246 |
| Figura 212. Orientaciones de los principales sistemas de diaclasas (D) y fracturas (F), así como de capas (en naranja)..... | 250 |
| Figura 213. Relación entre filtraciones y cota de lámina de embalse. | 256 |
| Figura 214. Plano de resultados del Sistema PE (Software surfer)..... | 260 |
| Figura 215. Plano de interpretación de resultados del Sistema PE (Software Surfer)..... | 261 |
| Figura 216. Posición de los perfiles de investigación TE realizados y PM en la zona de estudio | 263 |
| Figura 217. Perfil de Investigación TE-1 | 265 |
| Figura 218. Perfil de Investigación TE-1 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 266 |
| Figura 219. Perfil de Investigación TE-1 y P.M con origen en “Puesta masa 2” | 267 |
| Figura 220. Perfil de Investigación TE-2 | 268 |
| Figura 221. Perfil de Investigación TE-2 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 269 |
| Figura 222. Perfil de Investigación TE-2 y P.M con origen en “Puesta masa 2” | 270 |
| Figura 223. Perfil de Investigación TE-3 | 271 |
| Figura 224. Perfil de Investigación TE-3 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 272 |
| Figura 225. Perfil de Investigación TE-3 y P.M con origen en “Puesta masa 2” | 273 |
| Figura 226. Perfil de Investigación TE-4 | 274 |



| | |
|---|-----|
| Figura 227. Perfil de Investigación TE-4 y P.M con origen en “Puesta masa 2” | 275 |
| Figura 228. Perfil de Investigación TE-4 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 276 |
| Figura 229. Perfil de Investigación TE-5 | 277 |
| Figura 230. Perfil de Investigación TE-5 y P.M con origen en “Puesta masa 2” | 278 |
| Figura 231. Perfil de Investigación TE-5 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 279 |
| Figura 232. Perfil de Investigación TE-6..... | 280 |
| Figura 233. Perfil de Investigación TE-6 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 281 |
| Figura 234. Perfil de Investigación TE-6 y P.M con origen en “Puesta masa 2”. | 282 |
| Figura 235. Perfil de Investigación TE-7 | 283 |
| Figura 236. Correlación del perfil de tomografía n°7. | 284 |
| Figura 237. Perfil de Investigación TE-7 y P.M con origen en “Puesta masa 2”. | 285 |
| Figura 238. Perfil de Investigación TE-7 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 286 |
| Figura 239. Perfil de Investigación TE-8..... | 287 |
| Figura 240. Perfil de Investigación TE-8 y P.M con origen en “Puesta masa” | 288 |
| Figura 241. Perfil de Investigación TE-8 y P.M con origen en “Puesta masa 1” | 289 |
| Figura 242. Zonas de filtración en las inmediaciones de la presa del Embalse de Mediano. | 291 |
| Figura 243. Plano de situación del perfil de inyecciones..... | 292 |
| Figura 244. Plano de situación del perfil de sondeos de reconocimiento | 293 |
| Figura 245. Perfil de investigación TE-2 y sondeos de reconocimiento S-2 y S-3..... | 293 |
| Figura 246. Perfil de investigación TE-6 y sondeos de reconocimiento S-1 y S-2..... | 294 |
| Figura 247. Sondeo n°1. Parte 1..... | 295 |
| Figura 248. Sondeo n°1. Parte 2..... | 296 |
| Figura 249. Sondeo n°2. Parte 1..... | 297 |
| Figura 250. Sondeo n°2. Parte 2..... | 298 |



| | |
|--|-----|
| Figura 251. Regiones de la Zona Cantábrica (Julivert, 1967) modificado de Pérez-Estaún et al.(1988)..... | 301 |
| Figura 252. Unidad de la Sierra del Brezo (fuente. MAGNA) | 302 |
| Figura 253. Geología y corte orientativo mostrando las escamas de la Unidad de la Sierra del Brezo | 304 |
| Figura 254. Detalle estructural en el entorno del embalse (MAGNA). | 306 |
| Figura 255. Foto de satélite con interpretación estructural de visu..... | 307 |
| Figura 256. Esquema de proyecto de impermeabilización y mejora de la presa e instalaciones del embalse de Cervera (Ingeniero Don Manuel M ^a Jiménez Espuelas) | 308 |
| Figura 257. Corte (S-N) de la presa y galerías de drenaje | 310 |
| Figura 258. Detalles de las futuras obras de impermeabilización de la presa..... | 310 |
| Figura 259. Ubicación de taladros, filtraciones y acotaciones | 312 |
| Figura 260. Ubicación de filtraciones y acotaciones..... | 314 |
| Figura 261. Evolución de filtraciones con la lámina de embalse..... | 315 |
| Figura 262. Esquema de profundidades de taladros (no a escala) | 317 |
| Figura 263. Principales observaciones recopiladas de bibliografía | 319 |
| Figura 264. Observaciones en el estribo izquierdo de la presa | 320 |
| Figura 265. Observaciones en el estribo derecho de la presa y en el cerro..... | 321 |
| Figura 266 . Observaciones en el sector Suroeste del cerro..... | 325 |
| Figura 267. Situación del perfil geológico de interpretación..... | 328 |
| Figura 268. Perfil geológico de interpretación realizado en las inmediaciones de la cerrada de la presa de Cervera de dirección NE – SW en el que se muestran los principales aspectos estructurales y tectónicos de la zona. | 328 |
| Figura 269. Ubicación de inyecciones y cotas aproximadas..... | 330 |
| Figura 270. Registro de conductividad en la surgencia durante la inyección n°1 | 331 |
| Figura 271. Registro de conductividad en la surgencia durante las inyecciones 2, 3 y 4 | 331 |



| | |
|---|-----|
| Figura 272. Registros de conductividad con origen común (con suavizado) | 332 |
| Figura 273. Registros de conductividad y temperatura durante la inyección n°1 | 333 |
| Figura 274. Registros de conductividad y temperatura durante las inyecciones n°1, 2 y 3.... | 334 |
| Figura 275. Puntos de Investigación de PE..... | 336 |
| Figura 276. Plano de resultados del sistema PE..... | 338 |
| Figura 277. Plano de interpretación de resultados del sistema PE..... | 339 |
| Figura 278. Posición de los perfiles de investigación TE realizados en la zona de estudio. . | 341 |
| Figura 279. Puntos de Investigación de PI..... | 342 |
| Figura 280. Perfil de investigación TE – 1 (superior) y PI – 1 (inferior)..... | 344 |
| Figura 281. Perfil de investigación TE – 2 (superior) y PI – 2 (inferior)..... | 345 |
| Figura 282. Ortofoto mostrando las zonas con mayor vegetacion..... | 346 |
| Figura 283. Perfil de investigación TE – 3 (superior), interpretación geológico-estructural (centro) y Potencial Inducido (inferior) | 348 |
| Figura 284. Perfil de investigación TE – 4 (superior) y PI – 4 (inferior)..... | 348 |
| Figura 285. Perfil de investigación TE – 5 (superior) y PI – 5 (inferior)..... | 349 |
| Figura 286. Perfil de investigación TE – 6 (superior) y PI – 6 (inferior)..... | 349 |
| Figura 287. Perfil de investigación TE – 7 (superior) y PI – 7 (inferior)..... | 351 |
| Figura 288. Perfil de investigación TE – 10 (superior) y PI – 10 (inferior)..... | 351 |
| Figura 289. Perfil de investigación TE – 11 (superior) y PI – 11 (inferior)..... | 353 |
| Figura 290. Perfil de investigación TE – 8 (superior) y PI – 8 (inferior)..... | 353 |
| Figura 291. Perfil de investigación TE – 9 (superior) e interpretación geológica (inferior).. | 354 |
| Figura 292. Plano de resultados de PI | 356 |
| Figura 293. Múltiples puntos de descarga hacia el aliviadero de filtraciones generadas en el embalse las cuales circulan a través de la esquina noroeste de la zona de estudio hasta su descarga..... | 357 |



Figura 294. Plano de interpretación de los resultados del sistema PI (Software Surfer)358

Figura 295. Plano con indicación de la zona de estrechamiento y concentración de los flujos de filtración causantes de la descarga de la margen derecha y por tanto, de de interés de cara a la realización de posibles actuaciones de remediación (Software Surfer).359

Figura 296. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los cambios en el signo del potencial.....361

Figura 297. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los descensos en los valores de potencial.....362

Figura 298. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en el vaso del embalse bajo la lámina de agua para localizar zonas de filtración. El nivel del embalse de la ortofoto no refleja el nivel real del mismo durante las medidas (Software ArcGIS).363

Figura 299. Potencial Espontáneo de la zona inundada del Embalse de Benínar (Software Surfer).364

Figura 300. Detalle del Potencial Espontáneo del sector norte del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).365

Figura 301. Detalle del Potencial Espontáneo del sector central del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).366

Figura 302. Detalle del Potencial Espontáneo del sector del Pueblo del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).366

Figura 303. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en las márgenes del embalse de Benínar (Software ArcGIS).367

Figura 304. Visualización conjunta del Potencial Espontáneo obtenido para la zona inundada y no inundada del Embalse de Benínar (Software Surfer).368

Figura 305. Anomalías de potencial espontáneo en la zona de contacto entre el análisis de la zona inundada y no inundada del embalse de Benínar. Los círculos trazados con línea rosa discontinua reflejan la posición de las principales anomalías detectadas (Software Surfer).369

Figura 306 Perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica a realizar en el vaso del pantano (líneas verdes) como resultado del análisis de los datos de Potencial Espontáneo (Software Surfer).370

Figura 307. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en las márgenes del embalse de Benínar.....371

Figura 308. Perfil Tomografía Eléctrica en la zona de la Peña de la Jaca372



Figura 309. Perfil de Potencial Espontáneo realizado en la zona de la Peña de la Jaca373

Figura 310. Comparación entre los valores de Potencial Espontáneo y Perfil de Potencial Espontáneo realizado en la zona de la Peña de la Jaca373

Figura 311. Perfiles de P.I. realizados para la investigación de fenómenos de filtración en la zona inundada del embalse374

Figura 312. Perfiles de T.E. realizados para la investigación de fenómenos de filtración en la zona inundada del embalse376

Figura 313. Perfil P-2 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica377

Figura 314. Perfil P-4 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica377

Figura 315. Perfil P-7 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica378

Figura 316. Perfil P-5 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica378

Figura 317. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-1. Interpretación geológica del tramo del perfil que discurre bajo la lámina de embalse (esquina superior derecha).....381

Figura 318. Anomalía de potencial espontáneo coincidente con la posición de una alineación de sondeos de reconocimiento del vaso del Embalse de Benínar (Software Surfer).....382

Figura 319. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-2.....383

Figura 320. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-3.....385

Figura 321. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-4.....386

Figura 322. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-5.....387

Figura 323. Perfil de T.E. nº7 y planta de situación de sondeos con las cotas del techo de los materiales (principalmente carbonatos) situados bajo los rellenos aluviales situados bajo la presa.388

Figura 324. Perfil de T.E. N°7 y planta de las Isopacas de los rellenos aluviales existentes bajo la



presa (por debajo de la cota 280 m.s.n.m.). Nótese la gran potencia de rellenos al final del perfil de investigación (más de 18 m de potencia).389

Figura 325. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-6.....389

Figura 326. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-7.....390

Figura 327. Situación geográfica y esquema geológico del Cerro de los Batallones Batallones (modificada de Silva et al., 2004).392

Figura 328. Ortofoto del Cerro de los Batallones.393

Figura 329. Corte Geológico del Cerro de los Batallones (Silva et al., 2004).....397

Figura 330. (arriba) Modelo interpretativo del relleno de Batallones- 1. En él se indican la influencia de los vertisuelos en la generación de las cavidades y el efecto de disolución en profundidad (Morales et al., 2008). (abajo) Fotografía mostrando el aspecto de la cavidad y relleno del yacimiento BAT-2, se observa el reborde del nivel de silex resistente que delimitaba el techo de la cavidad antes de su relleno399

Figura 331. Esquema topográfico del Cerro de los Batallones mostrando los perfiles realizados por tomografía eléctrica de resistividades (ERT) durante las campañas de campo desde el 2002 al 2013.....402

Figura 332. Ortofoto del Cerro de los Batallones mostrando los yacimientos y perfiles realizados de Tomografía Eléctrica.....403

Figura 333. A) Modelo inverso 2D del perfil eléctrico (ERT) realizado en la pared norte del yacimiento de Batallones-1. B) Interpretación geológica de la muralla norte del yacimiento de Batallones-1.405

Figura 334. Modelo inverso 2D del perfil eléctrico (ERT) realizado en el yacimiento de Batallones- 5, Bloque diagrama de la estratigrafía in situ de las paredes del yacimiento de Batallones-5 e interpretación sobre fotografía del yacimiento de Batallones-5.....407

Figura 335. Modelos inversos 2D obtenidos durante la campaña de prospecciones geofísicas de 2003. El perfil 1/03 se sitúa a 10 m de la muralla de la trinchera ilustrada en el esquema de la parte inferior de la figura. La escala vertical del esquema está exagerada con respecto a los modelos 2D. Tanto el perfil 1/03 como el 2/03 muestran claramente el colapso de los estratos, la formación de depresiones superficiales y de túneles (piping) en profundidad. Las zonas de resistividad elíptica indican la presencia de nódulos de ópalo de diferente tamaño.....408

Figura 336. Modelos inversos 2D obtenidos en los yacimientos de Batallones-5, Batallones 7 y Batallones- 10. Estos dos últimos yacimientos fueron detectados mediante estas prospecciones geofísicas previamente a la explotación minera del área en el que se situaban.409



| | |
|--|-----|
| Figura 337. Perfil BAT1-1 | 410 |
| Figura 338. Perfil BAT5-1 | 410 |
| Figura 339. Perfil BAT7-1 | 411 |
| Figura 340. Perfil BAT7-2 | 411 |
| Figura 341. Perfil BAT7-3 | 411 |
| Figura 342. Perfil BAT7-4 | 412 |
| Figura 343. Perfil BAT8-1. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo. | 412 |
| Figura 344. Perfil BAT8-2. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo. | 413 |
| Figura 345. Perfil BAT8-3. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo. | 414 |
| Figura 346. Perfil BAT8-4. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo. | 415 |
| Figura 347. Perfil BAT8-5. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo. | 416 |
| Figura 348. Perfil BAT9-1 | 416 |
| Figura 349. Perfil BAT9-2 | 417 |
| Figura 350. Perfil BAT9-3 | 417 |
| Figura 351. Perfil BAT9-4 | 417 |
| Figura 352. Perfil BAT9-5 | 418 |
| Figura 353. Perfil BAT10-1 | 418 |
| Figura 354. Perfil BAT10-2 | 418 |
| Figura 355. Perfil BAT10-3 | 419 |
| Figura 356. Perfil BAT10-4 | 419 |
| Figura 357. Perfil BAT10-5 | 419 |



| | |
|--|-----|
| Figura 358. Perfil BAT10-6 | 420 |
| Figura 359. Perfil BAT10-7 | 420 |
| Figura 360. Perfil BAT10-8 | 420 |
| Figura 361. Perfil BAT10-10 | 421 |
| Figura 362. Perfil BAT10-11 | 421 |
| Figura 363. Perfil BAT10-12 | 421 |
| Figura 364. Perfil BAT10-13 | 422 |
| Figura 365. Perfil BAT10-14 | 422 |
| Figura 366. Perfil BAT10-15 | 422 |
| Figura 367. Perfil BAT10-16 | 423 |
| Figura 368. Perfil BAT10-17 | 423 |
| Figura 369. Perfil 1/10 | 423 |
| Figura 370. Perfil 2/10 | 424 |
| Figura 371. Perfil 3/10 | 424 |
| Figura 372. Perfil BAT3-1 | 424 |
| Figura 373. Perfil BAT3-2 | 425 |
| Figura 374. Perfil BAT3-3 | 425 |
| Figura 375. Modelo 3D realizado para la caracterización del BAT-3. | 426 |
| Figura 376. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones | 427 |
| Figura 377. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones | 428 |
| Figura 378. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones | 428 |
| Figura 379. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones | 429 |



Figura 380. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones429



INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Resistividades de las Rocas, minerales y sustancias químicas más comunes (Loke, 2002) | 15 |
| Tabla 2. Esquema de funcionamiento del sistema VLF..... | 100 |
| Tabla 3. Tabla de resultados (F.Utrillas)..... | 132 |
| Tabla 4. Tabla de resultados (F.Boñar)..... | 133 |
| Tabla 5. Características principales de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados en la zona del deslizamiento. | 196 |
| Tabla 6. SEDT ejecutados en la zona del deslizamiento de la margen del embalse de Benínar | 202 |
| Tabla 7. Sondeos de la margen derecha investigados con el Sistema ECE | 208 |
| Tabla 8. Coordenadas UTM de los perfiles de TE (Huso 30)..... | 228 |
| Tabla 9. Coordenadas UTM de los perfiles de TE y PM | 262 |
| Tabla 10. Características de los perfiles de TE y PI realizados. El perfil 9 solo se ha realizado con TE..... | 340 |
| Tabla 11. Perfiles de P.I. realizados en la zona inundada del embalse | 375 |
| Tabla 12. Trabajos restantes de T.E. y localización de los mismos..... | 376 |



INDICE DE IMÁGENES

| | |
|--|-----|
| Imagen 1. Detalle de los equipos | 31 |
| Imagen 2. Toma de datos mediante TE en el Puerto de Barcelona..... | 39 |
| Imagen 3. Toma de datos en el Río Guadiana (Mérida) | 40 |
| Imagen 4. Toma de datos | 41 |
| Imagen 5. Equipo Syscal-Pro desarrollado por la empresa Iris Instruments..... | 42 |
| Imagen 6. Equipo Syscal-Pro diseñado por la empresa Iris Instrumets | 54 |
| Imagen 7. 1200 W AC DC converter diseñado por la empresa Iris Instruments | 55 |
| Imagen 8. Panorámica de la zona de estudio situada en la margen izquierda del Canal de Monegros. Se pueden visualizar el canal (izda), la carretera de servicio que se hundió y donde aparecieron grietas y el hundimiento aparecido en las inmediaciones de la carretera, así como la zona de cultivos que se vieron anegados | 77 |
| Imagen 9. Equipo SEDT Terra-Tem (Monex Geoscope) | 86 |
| Imagen 9. Equipo TerraTem diseñado por Monex Geoscope..... | 96 |
| Imagen 11. Equipo TerraTx-50 diseñado por Monex Geoscope | 97 |
| Imagen 12. Equipo VLF diseñado por la empresa Abem Wadi..... | 103 |
| Imagen 13. Equipo VLF diseñado por Abem Wadi..... | 106 |
| Imagen 14. Equipo 1200 W AC DC converter diseñado por Iris Instruments..... | 137 |
| Imagen 15. Toma de datos de campo con tomografía eléctrica profunda en Baza (Granada). | 138 |
| Imagen 16. Equipo TerraTx-50 diseñado por Monex Geoscope | 146 |
| Imagen 17. Dispositivo de protección externa del equipo TerraTem diseñado por Monex Geoscope..... | 148 |
| Imagen 18. Fotografía del frente de desprendimiento en las inmediaciones del Perfil de investigación 5 | 199 |
| Imagen 19. Curva del SEDT 2-S21-I19 | 201 |
| Imagen 20. Fotografía que capta el momento en que se alcanza la falla (a 48m de profundidad) y | |



| | |
|---|-----|
| se recupera la fuente de los Aguachines. | 226 |
| Imagen 21. Detalles del apoyo del estribo izquierdo de la Presa de Mediano | 247 |
| Imagen 22. Detalles del apoyo del estribo derecho de la Presa de Mediano | 247 |
| Imagen 23. Fenómenos de karstificación en la caliza de alveolinas | 248 |
| Imagen 24. Detalle de la textura de la caliza de alveolinas del estribo izquierdo de la presa | 248 |
| Imagen 25. Intercalaciones en la caliza de alveolinas..... | 249 |
| Imagen 26. Plano de falla y brecha en la cantera | 251 |
| Imagen 27. Fracturas en la cantera | 251 |
| Imagen 28. Planos de falla aguas abajo del aliviadero, en a margen derecha de la presa..... | 252 |
| Imagen 29. Fractura de desplazamiento mínimo aguas abajo del estribo izquierdo de la presa | 252 |
| Imagen 30. Familias de diaclasas y buzamiento en el estribo derecho de la presa | 253 |
| Imagen 31. Contacto entre calizas de alveolinas y margas de Yeba..... | 254 |
| Imagen 32. Contacto entre calizas de alveolinas, margas de Yeba y calizas de Boltaña en la margen izquierda del embalse..... | 254 |
| Imagen 33. Precipitados en las galerías interiores de la presa | 255 |
| Imagen 34. Filtración a través del revestimiento | 255 |
| Imagen 35. Encauzamiento de filtraciones. | 256 |
| Imagen 36. Salida final de filtraciones y aforo. | 257 |
| Imagen 37. Losa impermeabilizante (izda) y cavidad objeto de hormigonado (dcha) en la margen derecha | 299 |
| Imagen 38. Azud de recogida de las filtraciones del estribo derecho (izda) y surgencia de las filtraciones (dcha) | 299 |
| Imagen 39. Población de Ruesga y Pico del Roblillo, en la escama de Ramadores | 303 |
| Imagen 40. Escamas en el SW del vaso del embalse..... | 305 |
| Imagen 41. Pliegues en las areniscas de la formación westfaliense..... | 322 |



| | |
|--|-----|
| Imagen 42. Detalle del contacto caliza de montaña-pizarras westfalienses..... | 323 |
| Imagen 43. Paquete de caliza de montaña con un pequeño afloramiento lutítico a techo (y debajo) | 324 |
| Imagen 44. Lineaciones plegadas en la ladera de la montaña..... | 326 |
| Imagen 45. Buzamientos hacia el Norte en la orilla del embalse (15°N/50°) | 326 |
| Imagen 46. Trabajos de investigación del Potencial Espontáneo en el embalse de Benínar. 363 | |
| Imagen 47. Dolinas aparecidas en las inmediaciones del pueblo de Benínar en Diciembre de 1982 (Archivo fotográfico de la Presa de Benínar). | 385 |
| Imagen 48. Vista general de la zona de estudio (deslizamiento de Formigal) con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Enero de 2.012..... | 467 |
| Imagen 49. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica acuática. Río Guadiana (Mérida). Enero de 2.012. | 467 |
| Imagen 50. Detalle del Equipo Syscal-Pro y disposición de las conexiones para la realización de tomografía eléctrica acuática. Río Guadiana (Mérida). Enero de 2.012. | 468 |
| Imagen 51. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT. Cigales (Valladolid). Marzo de 2.010. | 468 |
| Imagen 52. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Guadix (Granada). Julio de 2.010..... | 469 |
| Imagen 53. Vista general del embalse de Beninar y el material necesario para la realización de Potencial espontáneo. Septiembre de 2.008..... | 469 |
| Imagen 54. Vista general del embalse de Beninar y emplazamiento de dispositivo de tomografía eléctrica acuática. Julio de 2.008. | 470 |
| Imagen 55. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Polariación inducida. Embalse de Beninar (Granada). Octubre de 2.008..... | 470 |
| Imagen 56. Vista general de la zona de estudio en el Puerto de Barcelona con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Agosto de 2.009..... | 471 |
| Imagen 57. Vista general de la zona de estudio en el Puerto de Barcelona con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Agosto de 2.009..... | 471 |
| Imagen 58. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica 3D. Embalse de Santolea (Teruel). Octubre de 2010..... | 472 |
| Imagen 59. Realización de la tomo de datos con equipo Abem Wadi (VLF). Embalse de Santolea | |



| | |
|---|-----|
| (Teruel). | 472 |
| Imagen 60. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Baza (Granada). Enero de 2.011. Baza..... | 473 |
| Imagen 61. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Baza (Granada). Enero de 2.011..... | 473 |
| Imagen 62. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT profundo. Baza (Granada). Marzo de 2.011..... | 474 |
| Imagen 63. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Embalse de Linares (Segovia). Febrero de 2.011..... | 474 |
| Imagen 64. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT. Higuieruelas (Valencia). Mayo de 2.009..... | 475 |
| Imagen 65. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica marina. Valencia. Enero de 2.012. | 475 |
| Imagen 66. Iniciación en el campo de la prospección geofísica del doctorando. Ávila. Septiembre de 1.989..... | 476 |



ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

| | |
|------|--|
| SRM | Resonancia magnética de protones |
| SEV | Sondeo Eléctrico Vertical |
| TDEM | Time Domain Electromagnetics |
| SEDT | Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo |
| TE | Tomografía Eléctrica |
| ERT | Electrical Resistivity tomography |
| PI | Polarización Inducida |
| PI | Potencial inducido |
| PM | Puesta a masa |
| PE | Potencial Espontáneo |
| ECE | Emisión de Campo Electromagnético |
| VLF | Very Low Frequency |
| 1D | Una dimensión |
| 2D | Dos dimensiones |
| 3D | Tres dimensiones |
| emf | Fuerza electromotriz |
| fem | Fuerza electromotriz |
| Tx | Bucle transmisor |



Rx Bucle receptor

CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

IGME Instituto Geológico y Minero de España



AGRADECIMIENTOS

Terminar una tesis de doctorado es la culminación de un largo tiempo de trabajo, estudio y esfuerzo. Sería muy difícil lograrlo sin el apoyo de muchas personas a las que quiero mostrar mi más profundo agradecimiento:

A mi padre, D. Pedro Carrasco Morillo, el mejor técnico que conozco. Él me ha enseñado todo lo que se. Sin duda alguna esta tesis doctoral no hubiera sido posible sin sus conocimientos adquiridos durante más de 40 años de experiencia. Gracias por ser un ejemplo, tanto de ingeniero como de honestidad, para mí.

A mi madre, D^a Ana María García Luengo, ejemplo de integridad y resolución. Un agradecimiento muy especial a quien ha fomentado en sus dos hijos el interés por aprender. Gracias Mama.

A mi hermano, D. Javier Carrasco García, por todos esos días de sol a sol realizando mediciones en el campo. Son muchas las batallas en las que hemos estado, pero muchas más las que nos quedan.

A mi amigo y compañero de profesión, D. Daniel Porras Sanchiz, parte fundamental de esta tesis doctoral y cuyo empuje me ha hecho ser mejor técnico. Gracias por todo lo que tú ya sabes.

A mis directores de tesis D. Pablo G. Silva Barroso, y D. Arturo Farfán Martín, por sus sabias direcciones y apoyos. Espero que podamos seguir trabajando juntos.

A mis compañeros de trabajo, especialmente a D. José Luis Herrero Pacheco.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional y cariño.

Finalmente, pues están en mi corazón y son mi vida, quiero agradecer profundamente a mi esposa, Patricia, y a mi hijito Pedro, su apoyo, comprensión e infinita paciencia para que “Papá” pudiera terminar esta tesis. A ellos, mi eterno amor y gratitud.



RESUMEN

La Geofísica aplicada, pieza fundamental de esta tesis doctoral, es una tecnología que permite efectuar un diagnóstico de la constitución y estructura del subsuelo mediante la interpretación de una serie de parámetros físicos del terreno obtenidos a partir de una serie de mediciones y de su posterior procesamiento. La Geofísica, en este aspecto es una técnica que en la actualidad se está haciendo un hueco en el análisis geológico, geotécnico, arqueológico, etc., del subsuelo, abandonando el tradicional campo de la hidrogeología del que proceden los métodos eléctricos y electromagnéticos en los que se basan fundamentalmente esta tesis. Esperamos demostrar que la combinación de las técnicas de prospección geoeléctricas, bases de datos geoespaciales, y herramientas de gestión de información espacial de datos constituyen una potente herramienta para el análisis del subsuelo y su aplicación a los diferentes problemas geológicos y geotécnicos que se abordan. En particular el tratamiento de imágenes mediante herramientas geomáticas de las salidas de procesamiento de datos ofrece la oportunidad de inspeccionar el subsuelo de una manera gráfica y accesible tanto en 2D como en 3D.

En cualquier caso, sería deseable no olvidar que la Geofísica no es ni una ciencia exacta, ni una religión en la que creer o no creer; es la única herramienta al servicio de la Geología que permite investigar de forma científica la constitución del subsuelo. Otros métodos geológicos permiten establecer hipótesis, pero sólo con métodos geofísicos pueden éstas ser confirmadas.

En la presente tesis doctoral se ha planteado un avance en prospección geofísica aplicada y en particular de los métodos geoeléctricos. En concreto se ha trabajado y analizado el potencial de las siguientes técnicas de prospección: Tomografía eléctrica de resistividades (ERT), Tomografía eléctrica marina (SYSMAR), polarización inducida (PI), Potencial inducido (MM), Potencial espontáneo (PE), sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT), Prospección electromagnética en el dominio de las bajas frecuencias (VLF) y emisión de campo magnético (ECM). El avance que se plantea esta basado en la innovación y mejora de las técnicas utilizadas y el uso de herramientas de gestión de información espacial.

Innovación porque se han mejorado y obtenido el mayor rendimiento de algunas técnicas geofísicas con el objeto de aumentar su profundidad de investigación. Esto ha permitido aplicarlas al estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ y para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

Innovación porque se han buscado nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología y la geotécnica, más concretamente para la caracterización de deslizamientos y la localización de filtraciones en presas. Además de las anteriormente citadas para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

Uso de herramientas de gestión de información espacial porque su aplicación permite recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática, esto permite acceder eficientemente y de manera organizada a datos geofísicos con la finalidad de poder hacer interpretaciones integradas con mayor facilidad y versatilidad.



Para la consecución de estos avances, se ha requerido la utilización de sofisticados equipos geofísicos y de la investigación de un gran número de lugares de la geografía española donde existía un problema minero, geológico, hidrogeológico, geotécnico, geotérmico, arqueológico o medioambiental conocido. Algunas de estas campañas geofísicas han sido expuestas en esta tesis doctoral a modo de ejemplo o desarrollando la campaña de prospección geofísica completa. Las mencionadas campañas, mostradas a continuación, abarcan más de ocho años de experiencia profesional e investigadora, a veces enfrentándose a la resolución de complejos problemas geológicos.

1º REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).

2º CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENÍNAR. T.M. BERJA (ALMERÍA)

3º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRANEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES /SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO

4º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)

5º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

6º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

7º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)

8º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS FÓSILES MIOCENOS DE BATALLONES (TORREJÓN DE VELASCO, MADRID).

En definitiva la presente tesis se plantea, no como un reconocimiento geofísico de una zona o zonas concretas, sino como la aplicación de las diferentes técnicas geoelectricas a la resolución de problemas con el objetivo de mejorar su rendimiento mediante el ensayo de diferentes dispositivos, combinación de parámetros, aplicación de filtros y su implementación en herramientas de gestión de información geoespacial.



SUMMARY

Applied Geophysics, a key part of this thesis, is a technology that allows for a diagnosis of the constitution and subsurface structure by interpreting a series of physical parameters of the soil, obtained from a series of measurements and further processing. Geophysics, in this respect is a technique that is currently making a hole in the geological, geotechnical, archaeological... analysis of the subsoil, abandoning the traditional field of hydrogeology from which come the electrical and electromagnetic methods, in which this thesis is based primarily. We hope to demonstrate that the combination of geoelectric prospecting techniques, geospatial databases, and tools for spatial information management data provide a powerful tool for the subsoil analysis and its application to different geological and geotechnical problems addressed. In particular, the image processing using geomatics tools of the outputs of the data processing provides an opportunity to inspect the subsoil in a graphical and accessible way, including both 2D and 3D.

In any case, it is desirable not to forget that geophysics is neither an exact science nor a religion in which you believe or not. It is the only tool in the service of geology that allows a scientific investigation of the subsurface formation. Other geological methods allow establishing hypotheses, but they only can be confirmed if they are established with geophysical methods.

In this Doctoral Thesis it has been raised a step forward in applied geophysical prospecting and particularly in geoelectric methods. Specifically, it has been worked and analyzed the potential of the following survey techniques: electrical resistivity tomography (ERT), marine electrical tomography (SYSMAR), induced polarization (IP) induced potential (MM), spontaneous potential (SP) surveys electromagnetic time domain (SEDT) domain electromagnetic prospecting low frequency (VLF) and magnetic field emissions (ECM). The progress which arises is based on innovation and improvement of the techniques used and the use of space information management tools.

Innovation because they have improved and obtained the most out of some geophysical techniques in order to increase their depth of investigation. This has allowed to apply them to the geological formations study for storage and the monitoring of CO₂ and the prospect of deep hydrogeological structures.

Innovation because they have looked for new applications of geophysical techniques in the fields of hydrogeology and geotechnical, specifically for the characterization of landslides and location of leaks in dams. In addition to those mentioned above for the characterization and monitoring of geological storage of CO₂ and the prospect of deep hydrogeological structures.

Use of management spatial information tools due to it's application let you gather, organize and conveniently study systematically geophysical data, this allows an efficient access, in an organized manner, to geophysical data in order to be able to do integrated interpretations in a more easy and versatile way.

To achieve these advances, it has been required the use of sophisticated equipment and geophysical investigation of a large number of Spanish geography. Places where there was a mining, geological, hydrogeological, geotechnical, geothermal, archaeological or environmental known problem. Some of these campaigns have been exposed geophysical in this doctoral thesis



as an example, or developing the complete geophysical prospecting campaign. The aforementioned campaigns that are shown below cover more than eight years of professional experience and research, sometimes facing the complex geological problems resolution.

1° PERFORMING A GEOPHYSICAL SURVEY USING 3D ELECTRICAL TOMOGRAPHY FOR CAVITY LOCATION IN SANTOLEA RESERVOIR (TERUEL).

*2° CHARACTERIZATION OF BENÍNAR T. M. BERJA DAM (ALMERIA).
RIGHT MARGIN SLIP.*

3° GEOPHYSICAL SURVEY FOR THE DEFINITION OF UNDERGROUND FLOW OF THERMAL WATER OF THE ANCIENT AGUACHINES FOUNTAIN, WHICH WAS LEFT UNDER THE LINARES (SEGOVIA) RESERVOIR AND ITS ACHIEVEMENT PROPOSAL.

4° GEOPHYSICAL SURVEY FOR A SLIP STUDY IN FORMIGAL (HUESCA).

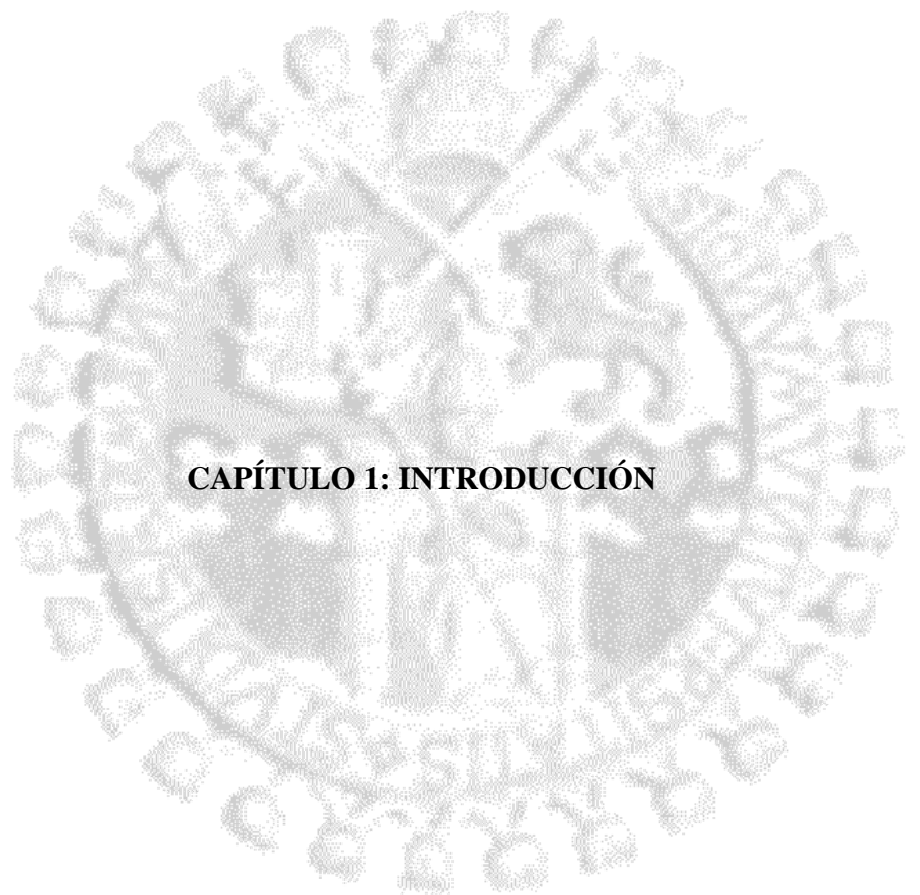
5° GEOPHYSICAL PROSPECTING FOR THE LOCATION OF THE FILTRATION AREAS OF THE MEDIANO DAM RIGHT MARGIN (HUESCA) AND ITS ACTION PROPOSALS.

6° GEOPHYSICAL SURVEY CAMPAIGN FOR THE LOCATION OF THE FILTRATION AREAS OF THE CERVERA DAM RIGHT MARGIN AND ITS ACTION PROPOSALS.

7° GEOPHYSICAL SURVEY CAMPAIGN FOR THE LOCATION OF THE FILTRATION AREAS OF BENÍNAR TM OF BERJA DAM (ALMERIA).

8° GEOPHYSICAL SURVEY OF THE MIOCENE FOSSIL DEPOSITS SYSTEM OF BATALLONES (TORREJÓN DE VELASCO, MADRID).

All in all, this thesis it is outlined not as a geophysical survey of a concrete area or areas. But as the application of different geoelectric techniques to problem resolution, in order to improve their performance by testing different devices, parameters combination, filter application and its implementation in management geospatial information tools.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCION

1.1.- La Geofísica aplicada.

1.2.- Contexto de la Tesis.

1.3.- Objetivos de la tesis.

1.4.- Contenido de la tesis.



1.- INTRODUCCION

1.1.- La Geofísica aplicada.

La Geofísica aplicada, pieza fundamental de esta tesis doctoral, es una tecnología que permite efectuar un diagnóstico de la constitución y estructura del subsuelo mediante la interpretación de una serie de parámetros físicos del terreno obtenidos a partir de una serie de mediciones y de su posterior procesamiento.

Cada técnica geofísica obedece al estudio de una determinada propiedad de las rocas o materiales geológicos, existiendo numerosas posibilidades en la manera de efectuar las mediciones sobre el terreno, de tal forma que puedan adaptarse a la escala y el objetivo requerido por cada trabajo: desde reconocimientos regionales a caracterizaciones locales y superficiales.

En principio, todas las técnicas geofísicas de superficie pueden ser utilizados en la resolución de problemas geológicos relacionados con la hidrogeología, la minería, la geotecnia, la arqueología y el medio ambiente., siendo fundamental tener en cuenta los límites tanto intrínsecos de cada técnica como los derivados de su forma de utilización. Sin embargo, la naturaleza de la mayoría de los problemas planteados exige conocer la distribución de propiedades en el subsuelo en sentido vertical y lateral, lo que unido a la versatilidad del parámetro resistividad, hace que los métodos eléctricos y electromagnéticos sean con diferencia los más utilizados para esta tesis. No obstante, no es infrecuente que la resolución de los problemas planteados demande la utilización de métodos sísmicos, gravimetría o magnetometría, así como tecnologías eléctricas no convencionales. Cada tipo de situación geológica requiere la aplicación del método adecuado, siendo conveniente en muchas ocasiones la aplicación combinada de más de un método, lo que a veces no es posible por los límites económicos que suelen imponerse a las investigaciones. En este sentido, la reutilización de la información geofísica a través de cartografía y bases de datos nacionales es una excelente alternativa.

Técnicas geofísicas disponibles

Cada técnica geofísica obedece al estudio de una determinada propiedad física de los materiales geológicos. Una clasificación primaria puede establecerse en función de la procedencia de la información que proporcionan, teniendo así:

Métodos que informan de la distribución de propiedades a nivel de la superficie del terreno, o con unos pocos centímetros de penetración; dentro de ellos se encuentran todos los que utilizan las propiedades ópticas de las rocas (reflectividad), o en bandas especiales de frecuencias (p.ej. imágenes de infrarrojos), las propiedades de radiactividad natural (espectrometría), reflectividad electromagnética (radar aéreo), fluorescencia, etc.

Los restantes métodos informan de la distribución de propiedades en el subsuelo, con rangos de penetración muy dispares, que varían desde unos pocos metros a miles de metros. Dentro de ellos pueden hacerse dos grupos:

a) Los métodos que estudian las propiedades naturales de las rocas: Densidad (gravimetría), susceptibilidad magnética (magnetometría), campos eléctricos y electromagnéticos



naturales (magnetotélurico, potencial espontáneo), conductividad térmica (termometría), etc.

b) Los métodos que estudian las propiedades que surgen en las rocas como respuesta a su previa excitación con algún tipo de energía e (Sherif, 1989) desde el exterior a las mismas: la velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico (sísmica), la resistencia al paso de la corriente eléctrica (métodos geoelectrónicos de corriente continua), la generación de campos electromagnéticos inducidos (métodos de corriente alterna, entre los que cabe incluir los métodos radiomagnetotéluricos), la reflectividad de las ondas electromagnéticas por cambio de la constante dieléctrica (radar terrestre), la cargabilidad (polarización inducida), los fenómenos electrocinéticos, la resonancia magnética de los protones (SRM), etc.

En este último grupo de métodos, las posibilidades que ofrece el disponer de un circuito desde donde se emite la energía y de otro donde se recibe la respuesta del subsuelo, hace que los submétodos o formas posibles de efectuar las mediciones y analizar los datos sean muy variadas. En sísmica (Dobrin y Savit, 1988), habría que diferenciar entre la utilización de las ondas reflejadas, refractadas, las ondas directas de tipo superficial, las ondas canalizadas, etc. En los métodos eléctricos (Orellana, 1972) las mediciones pueden disponerse de tal forma que se investigue la variación de la resistividad en vertical (p.ej. los SEV de corriente continua), en horizontal a un determinado nivel de profundidad (calicatas) o en ambas (tomografía eléctrica). En los métodos que utilizan corriente alterna (McNeill, 1980) las posibilidades se abren más aún al considerar que puede trabajarse tanto en el denominado dominio de las frecuencias como en el dominio del tiempo (p.ej. los SEDT). La profundidad de la información puede también ser gobernada: bien en función de la intensidad de la energía introducida en el subsuelo (p.ej. en sísmica) o de sus características (p.ej. la frecuencia en electromagnético), bien en función de la distancia entre fuente de energía y sensores (diseño de dispositivos), o bien sencillamente según el tipo de sensores (p.ej. dimensiones de las bobinas receptoras en SRM). Casi todos estos métodos pueden además utilizarse de forma tomográfica, disponiendo emisor y receptor rodeando el volumen de terreno a investigar.

En muchos métodos geofísicos las medidas pueden ser tomadas tanto desde tierra como desde el aire o en el mar, o bien introducir los instrumentos de medición en un sondeo mecánico, dando lugar a parte de los métodos geofísicos de testificación (Kearey y Brooks, 1991), en los cuales, debido a la corta distancia entre los sensores geofísicos y los materiales investigados, surgen todavía más posibilidades de medición de otras propiedades y de diseño de dispositivos. Aunque la presencia de agua modifica varios parámetros petrofísicos (conductividad, velocidad de las ondas sísmicas, constante dieléctrica), es sin embargo la resistividad eléctrica la propiedad física de las rocas que más variación presenta con la porosidad, permeabilidad y con el contenido en agua y su calidad (Orellana, 1972). Sin embargo, aunque la resistividad de unas arcillas es normalmente más de cien veces inferior a la de unas gravas, el contenido en agua de las gravas puede modificar su resistividad en esta misma proporción, pudiendo llegar a ser tan baja como la de unas arcillas, sobre todo si se tiene en cuenta la salinidad del agua.

No existe por lo tanto una posibilidad de relacionar directamente un valor de resistividad con una determinada e inequívoca litología o contenido en agua de la misma, aunque pueden establecerse relaciones entre la resistividad y la porosidad, e incluso con la conductividad hidráulica (Bear, 1972), si los valores se han podido calibrar para una zona determinada. Esta exposición de posibilidades, que no pretende ser exhaustiva, aunque incluye algunos de los



métodos últimamente desarrollados, se centra en los métodos que pueden considerarse como convencionales o suficientemente probados, que son algunos de ellos sobre los que se centra esta tesis doctoral.

1.2.- Contexto de la Tesis.

En esta tesis se aborda un avance en técnicas geofísicas tales como la Tomografía Eléctrica (TE), la Polarización Inducida (PI), la Puesta a masa (PM), los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), el Potencial Espontáneo (PE), el Método de Emisión de Campo Electromagnético (ECE) y VLF entre otras. Este avance esta basado en la innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial. Más concretamente las actuaciones han sido las siguientes:

INNOVACIÓN

- *Mejora teórica o de operatividad de algunas técnicas geofísicas:*

Se han mejorado las técnicas geofísicas de Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y Tomografía eléctrica aumentando su penetración máxima a 3 km y a un 1 km respectivamente. No existe bibliografía donde se hayan alcanzado estas profundidades de investigación con estos métodos.

La máxima profundidad conseguida con tomografía eléctrica por estudios previos fue A.Colella et al. (2004) que alcanzaron una profundidad de 400-500 m en el análisis de la cuenca del valle de Adri (Italia) y G.Tamburriello et al. (2008) que alcanzaron una profundidad de 900 m para entender el comportamiento hidrogeológico profundo en el área de Venosa (Italia). Mediante SEDT J.L Porsuani et al. (2012) alcanzaron 1 Km para la caracterización hidrogeológica de la cuenca Paraná (Brasil).

Este avance más la aplicación de herramientas de gestión de información espacial han sido básicos para la aplicación de estas dos técnicas geofísicas en el estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ y para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

- *Búsqueda de nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología y la geotecnia:*

Estas técnicas han sido desarrolladas y se siguen desarrollando principalmente para la localización y cubicación de yacimientos mineros dejando un vacío de investigación en otras aplicaciones.

Parte de las investigaciones se han centrado en la utilización de técnicas geofísicas para la caracterización de deslizamientos y la localización de filtraciones en presas. Además de



las anteriormente citadas para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas. Algunos ejemplos de publicaciones de la utilización de técnicas geofísicas para la caracterización de deslizamientos y localización de filtraciones son Moore, J.R., and Glaser, S.D., (2005), G.Colangeolo et al. (2005). Bogoslovsky et al. (1977), Gallipoli et al. (2000) y A. Revil et al. (2002).

EL USO DE HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE INFORMACIÓN ESPACIAL

- *Mejora de las técnicas mediante la utilización de Herramientas de Gestión de información espacial específicas tales como el Rockworks, Surfer, Voxler, Sketchup, Google earth y otras herramientas.*

En esta tesis se pretende demostrar que la aplicación de herramientas de gestión de información espacial a los datos obtenidos mediante técnicas geofísicas, hacen de la Geofísica una potente herramienta para la solución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos, arqueológicos y medioambientales.

1.3.- Objetivos de la tesis.

Los principales aspectos novedosos a obtener con el desarrollo de la presente tesis son:

- Confirmar que las técnicas geofísicas asociadas a programas de gestión de información espacial forman una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos y medioambientales.
- Mejorar las técnicas geofísicas de Tomografía Eléctrica y Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.
- Establecer nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas para la caracterización de deslizamientos y la localización de filtraciones en presas. Además de las anteriormente citadas para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

1.4.- Contenido de la tesis.

- En el Capítulo 2, Fundamentación teórica, se plantean los modelos, teorías, ejemplos y conceptos pertinentes de cada una de las técnicas geofísicas, equipos y software utilizados en esta tesis doctoral.
- Capítulo 3: Innovación en prospección de estructuras hidrogeológicas profundas y caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ mediante las técnicas de tomografía eléctrica profunda y sondeos electromagnéticos en el dominio



del tiempo. En este capítulo se plantean las teorías y conceptos pertinentes de las técnicas geofísicas de la tomografía eléctrica y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo. Se han realizado mejoras teóricas o de operatividad de estas técnicas, aumentando su profundidad, para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas y la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂. Al final de capítulo, se exponen algunos ejemplos.

- En el capítulo 4, metodología, se realiza una descripción y justificación del enfoque metodológico bajo el cuál se han realizado las diferentes campañas geofísicas y la interpretación de los resultados.
- En el capítulo 5, resultados y análisis de las investigaciones realizadas, se presenten los resultados obtenidos y los análisis realizados de las siguientes campañas geofísicas:
 - o *1º REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).*
 - o *2º CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENÍNAR. T.M. BERJA (ALMERÍA)*
 - o *3º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRANEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES /SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO*
 - o *4º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)*
 - o *5º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN*
 - o *6º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN*
 - o *7º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)*
 - o *8º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS FÓSILES MIOCENOS DE BATALLONES (TORREJÓN DE VELASCO, MADRID).*
- En el capítulo 6, conclusiones, se sintetizan las principales conclusiones derivadas de este trabajo y se proponen las futuras líneas de investigación.
- En el capítulo 7, bibliografía se recogen las referencias consultadas para llevar a cabo esta investigación.



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA



ÍNDICE

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.- MÉTODOS ELÉCTRICOS

1.1.- Relación entre Geología, Anomalía y la Resistividad.

1.1.1. - Resistividad Aparente: Definición.

1.2.- Dispositivos de registro.

1.2.1. - Método tradicional del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

1.2.2.- Exploraciones Eléctricas en 2D.

1.2.2.1 - Introducción.

1.2.2.2 - Procedimiento de medida e instrumentación empleada.

1.2.2.3 – Pseudosección.

1.2.2.4 - Ventajas y desventajas de los diferentes dispositivos de registro.

1.2.2.5 - Profundidad de Investigación

1.2.2.6. Sensibilidad.

1.2.2.7 - Cobertura. Relación Señal /Ruido.

1.2.2.8 - Configuraciones / Dispositivos.

1.2.2.9 - Procesamiento, Inversión e interpretación

1.2.3. Exploración Eléctrica Tridimensional 3D

1.2.3.1 - Introducción a las mediciones Tridimensionales

1.2.3.2 - Tipos de Configuraciones para Mediciones Tridimensionales

1.3.- Adquisición de datos en 3D (Mediciones Continuas en 3D)

1.3.1.- Técnica de Inversión de Datos



1.4.- Tomografía eléctrica marina (Sysmar Software)

1.5.- Ejemplos de Aplicación

1.6.- Equipo empleado

2.- POLARIZACIÓN INDUCIDA (PI)

2.1. - Origen del efecto de la polarización inducida. Generalidades.

2.2. - Polarización de membrana.

2.3. - Polarización de electrodos.

2.4. - Técnica de medida de la polarización inducida en el dominio del tiempo. Generalidades.

2.5. - Interpretación de los datos.

2.6. - Valoración de método. Consideraciones finales

2.7.- Ejemplos de aplicación

2.8. – Equipos empleados

3.- MISE A LA MASSE (PUESTA A MASA) O POTENCIAL INDUCIDO

3.1.-Principio del método

3.2.- Parámetros de los Levantamientos

3.3.- Aplicaciones en Exploración Minera

3.4.- Aplicaciones en embalses y vertederos

4.- MÉTODO DEL CAMPO ELÉCTRICO NATURAL (POTENCIAL ESPONTANEO)

4.1- Introducción

4.2. - Equipo para el levantamiento del campo natural.

4.3.- Metodología y técnica de los trabajos de campo

4.4. -Representación de los resultados de las observaciones



4.5. - Bases de la Interpretación

4.6. - Aplicación del Método

4.7.- Medidas de potencial como indicadores de deformación

4.8.- Ejemplos de Aplicación

5.- SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT)

5.1.- Introducción

5.2.- Principios Físicos del SEDT

5.3.- Fundamento físico

5.4.- Equipos y configuraciones

5.5.- Procesado de datos SEDT

5.6.- Ejemplos de aplicación

5.7.- Equipos empleados

6.- SISTEMA VLF (VERY LOW FREQUENCY)

6.1.- Introducción

6.2.- Principios

6.3.- Profundidad de penetración

6.4.- Secciones de densidad de corriente

6.5.- Toma de datos

6.6.- Limitaciones del método

6.7.- Aplicaciones

6.8.- Ejemplos de aplicación

6.9.- Equipo empleado



7.- MÉTODO DE EMISIÓN DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO (ECE)

7.1.- Principios teóricos

7.2 - Resolución del problema inverso

7.3 - Registro de Sondeos

8.- SOFTWARE

8.1.- Rockworks

8.2.- Surfer

8.3.- Voxler

8.4.- SketchUp

8.5.- Google earth

8.6.- ArcGIS

8.7.- Autocad

8.8.- Excell



1.- MÉTODOS ELÉCTRICOS

En el presente apartado se describen las Técnicas que actualmente se están utilizando dentro del campo de la exploración geofísica geoelectrica y de forma más concreta, la tomografía eléctrica en dos y tres dimensiones (2D y 3D).

Los métodos geoelectricos son quizás los métodos más versátiles a la hora de llevar a cabo investigaciones hidrogeológicas y de contaminación ambiental subterránea así como en la realización de estudios de otra tipología como la, geotecnia, arqueología, y en general, la localización de estructuras y anomalías complejas en el subsuelo, tanto geológicas como antrópicas. La versatilidad de los métodos geoelectricos se debe, en gran medida, al parámetro que se analiza, la resistividad, el cual muestra grandes variaciones en función de las características del subsuelo permitiendo por tanto la realización de determinaciones muy precisas.

La resistividad real de un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. La resolución de estos casos implica considerar en el planteamiento y resolución del problema una mayor cantidad de variables no tomadas en cuenta en los métodos históricos en 1D (Sondeos Eléctricos Verticales) los cuales la consideran constante para cada capa o estrato del subsuelo, lo cual implica una serie de metodologías y modelos matemáticos de mayor complejidad.

Para poder modelizar el subsuelo con una distribución arbitraria de resistividades y tomar en cuenta también la variación de otros parámetros que influyen en ella (como por ejemplo la topografía se emplean para métodos de elementos finitos (Silvestre y Ferrari, 1990) y de diferencias finitas (Dey y Morrison, 1979; 1979b), los cuales permiten considerar el efecto de variación de los parámetros entre puntos y en todas las direcciones en un volumen de tierra considerado.

La determinación y cálculo de resistividad real en 2D y 3D (Tomografía Eléctrica) se basa en el empleo de algoritmos de tratamiento (Loke y Barker. (1996)) que permiten la interpretación de modelos y estructuras geológicas que por su complejidad, no pueden ser solucionadas satisfactoriamente considerando modelos de distribución de resistividad en una (1D) o a veces en dos dimensiones (2D).

1.1.- Relación entre Geología, Anomalía y la Resistividad.

Los métodos geoelectricos permiten la obtención de una imagen de la distribución de resistividades del subsuelo. Para convertir esa imagen en una estructura geológica, es muy importante el conocer como varía el parámetro resistividad en los diferentes tipos de materiales que constituyen el subsuelo y estructuras geológicas. Para ello es necesario definir los valores de resistividad que presentan las rocas y materiales más comunes:

Del análisis de la tabla 1 (Keller y Frischknecht 1966), se observa como las rocas ígneas y metamórficas presentan elevados valores de resistividad en condiciones inalteradas. Como veremos más adelante, uno de los valores que influye en la resistividad es el grado de fracturación y porosidad que presenten los materiales así como el grado de saturación en agua y naturaleza química¹ de esta. Las rocas sedimentarias suelen tener una mayor porosidad (primaria)

¹ La concentración de sales disueltas en el agua genera importantes variaciones en la resistividad del material. Las sales se comportan como muy buenos conductores por lo que cuanto más salina sea el agua que satura los poros/fracturas del material, menor resistividad presentará.



pudiendo estar saturado en agua lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

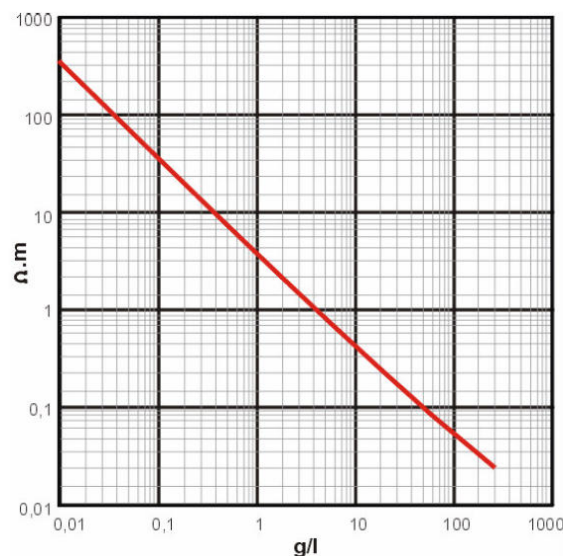


Figura 1. Variación en la resistividad de una disolución de NaCl en función de su concentración

Uno de los aspectos que muestra la tabla es la equivalencia en los valores de resistividad que presentan materiales diferentes. Este hecho se debe a que la resistividad de un material depende de múltiples factores cuya combinación puede traducirse en una misma resistividad

La Tabla 1 muestra también el valor de resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales como el hierro presentan valores sumamente bajos, los químicos como el sodio y cloruro de potasio pueden reducir mucho la resistividad del agua del terreno (<1 ohm.m con moderadas concentraciones) mientras que el efecto de electrolitos como el ácido acético es comparativamente menor. Por el contrario, algunos hidrocarburos como el Xileno presentan resistividades muy altas.

Los valores de resistividad pueden presentar grandes variaciones comparadas con otros parámetros físicos obtenidos por otros métodos geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo de una zona de estudio pueden variar en varios órdenes de magnitud mientras que las variaciones gravimétricas de la misma zona varían muy poco. Este hecho hace que los métodos resistivos (eléctricos y electromagnéticos) sean técnicas muy versátiles y precisas.



| Material | Resistividad (ohm.m) | Conductividad (Siemens) |
|------------------------------------|---------------------------------|---|
| Rocas Ígneas y Metamórficas | | |
| Granito | $5 \times 10^3 - 10^6$ | $10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$ |
| Basalto | $10^3 - 10^6$ | $10^{-6} - 10^{-3}$ |
| Pizarra | $6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$ | $2 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$ |
| Mármol | $10^2 - 2.5 \times 10^8$ | $4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$ |
| Cuarcita | $10^2 - 2 \times 10^8$ | $5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$ |
| Rocas Sedimentarias | | |
| Arenisca | $8 - 4 \times 10^3$ | $2.5 \times 10^{-4} - 0.125$ |
| Esquisto | $20 - 2 \times 10^3$ | $5 \times 10^{-4} - 0.05$ |
| Limolita | $50 - 4 \times 10^2$ | $2.5 \times 10^{-3} - 0.02$ |
| Suelos y Agua | | |
| Arcilla | 1 - 100 | 0.01 - 1 |
| Aluvión | 10 - 800 | $1.25 \times 10^{-3} - 0.1$ |
| Agua Fresca | 10 - 100 | 0.01 - 0.1 |
| Agua de Mar | 0.2 | 5 |
| Químicos | | |
| Hierro | 9.074×10^{-8} | 1.102×10^7 |
| 0.01 M Cloruro de Potasio | 0.708 | 1.413 |
| 0.01 M Cloruro de Sodio | 0.843 | 1.185 |
| 0.01 M Ácido Acético | 6.13 | 0.163 |
| Xileno | 6.998×10^{16} | 1.429×10^{-17} |

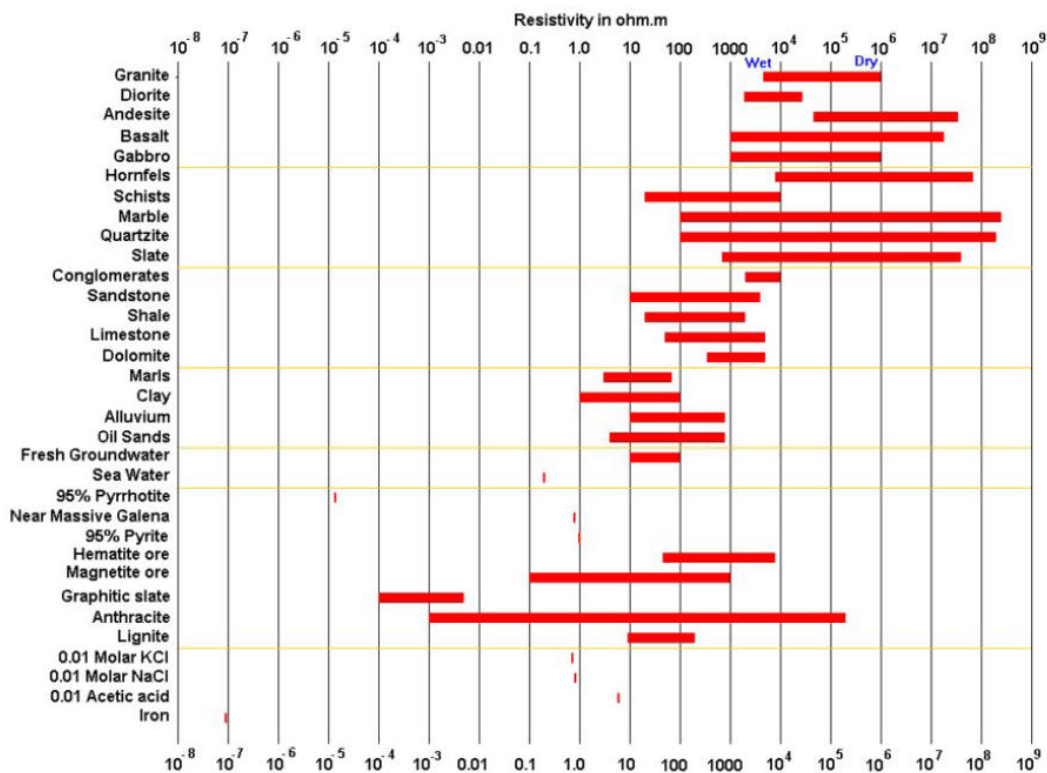


Tabla 1. Resistividades de las Rocas, minerales y sustancias químicas más comunes (Loke, 2002)



1.1.1. - Resistividad Aparente: Definición.

La conductividad eléctrica (y su inversa, la resistividad) representa la capacidad de la materia para poner en movimiento cargas libres bajo la acción de un campo eléctrico (Orellana, 1972).

La resistividad aparente es el valor de la resistividad medida sobre el terreno. Si el terreno es homogéneo, la resistividad aparente es igual a la resistividad real del material.

La Ley de Ohm establece la relación existente entre el voltaje (V), la intensidad de la corriente (I) y la resistencia del material al paso de dicha corriente (R):

$$V = I \cdot R$$

La resistencia depende de la geometría del material. Para un cilindro de sección A y longitud L, la resistencia será:

$$r = R \cdot (A/L)$$

donde r es la resistividad del material

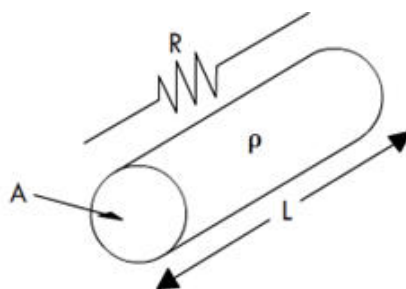


Figura 2. Dispositivo Electrónico convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (<http://technologymechatronic.wordpress.com/category/electronica/page/2/>)

La resistividad es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en Prospección Eléctrica y que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.

La resistividad de un medio homogéneo medida por un dispositivo cualquiera de registro viene definida por la ecuación:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Donde K es el Factor Geométrico sobre el terreno o constante de normalización (en metros) y depende del espaciado entre electrodos de registro, ΔV es la diferencia de potencial registrada e I la corriente inyectada en el terreno. La resistividad ρ_a se mide en Ohm·m.

La medición de la resistividad del subsuelo se realiza empleando un dispositivo tetrapolar (figura 3) formado por dos electrodos de emisión y dos para la medida de la diferencia de potencial.



La penetración depende de la separación entre los electrodos. EL 50 % del total de la corriente circula a una profundidad inferior a la separación entre los electrodos por lo que el sistema para incrementar la penetración es aumentar la separación electródica.

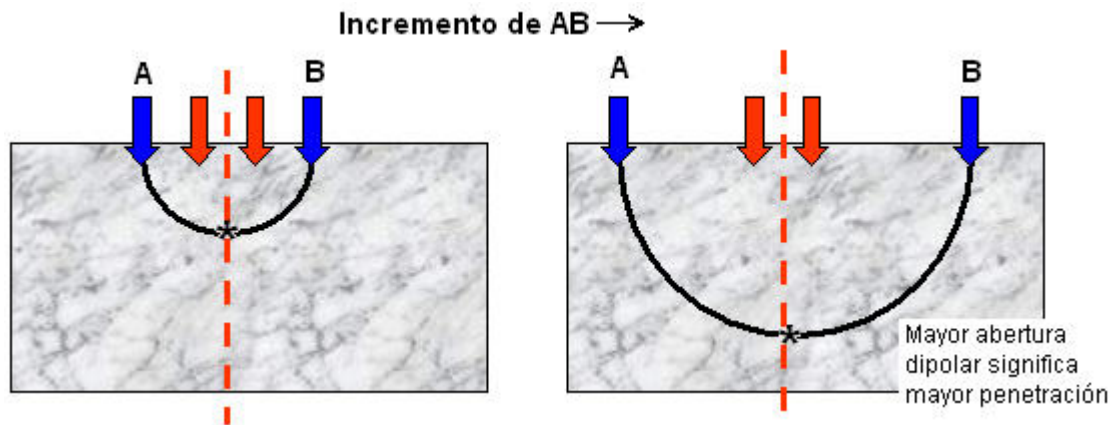


Figura 3. Dispositivo Electródico convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (http://www.geofisica.cl/GMPE/Software_GeoMod.htm)

1.2.- Dispositivos de registro.

Existen numerosos dispositivos de registro los cuales se emplean en la determinación de Resistividad en 1D, 2D y 3D con pequeñas modificaciones. La selección de un tipo de dispositivo así como el tipo de investigación se traduce en el número de medidas que se obtienen. Normalmente, en el caso de sondeos de resistividad 1D se obtienen entre 10 y 20 lecturas, en un perfil 2D se registran entre 100 y 1000 en función del tipo de dispositivo y una malla 3D puede contener varios miles de medidas.

1.2.1. - Método tradicional del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

El método de Sondeo Eléctrico Vertical tiene se empezó a utilizar en los años 1920 (Schlumberger, 1920). La metodología de registro e interpretación se basa en el empleo de los algoritmos de Koefoed (Koefoed, 1979) y ábacos publicados por investigadores como Orellana-Mooney y otros (Orellana, 1972). En el método SEV, el centro dispositivo de registro se mantiene fijo variando el espaciado entre los electrodos va aumentado con el fin de incrementar la penetración de la corriente y obtener información de capas más profundas.

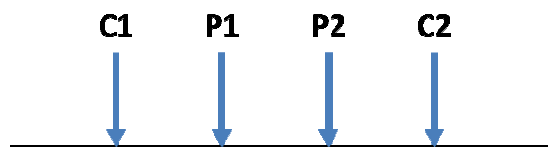


Figura 4. Dispositivo electródico tetrapolar convencional Simétrico empleado para medir la resistividad del subsuelo (Loke, M.H., 2002)

Existen diferentes dispositivos de registro en el caso del SEV cuyas variaciones se basan en la diferente configuración del espaciado e incremento de este en el proceso de medida.

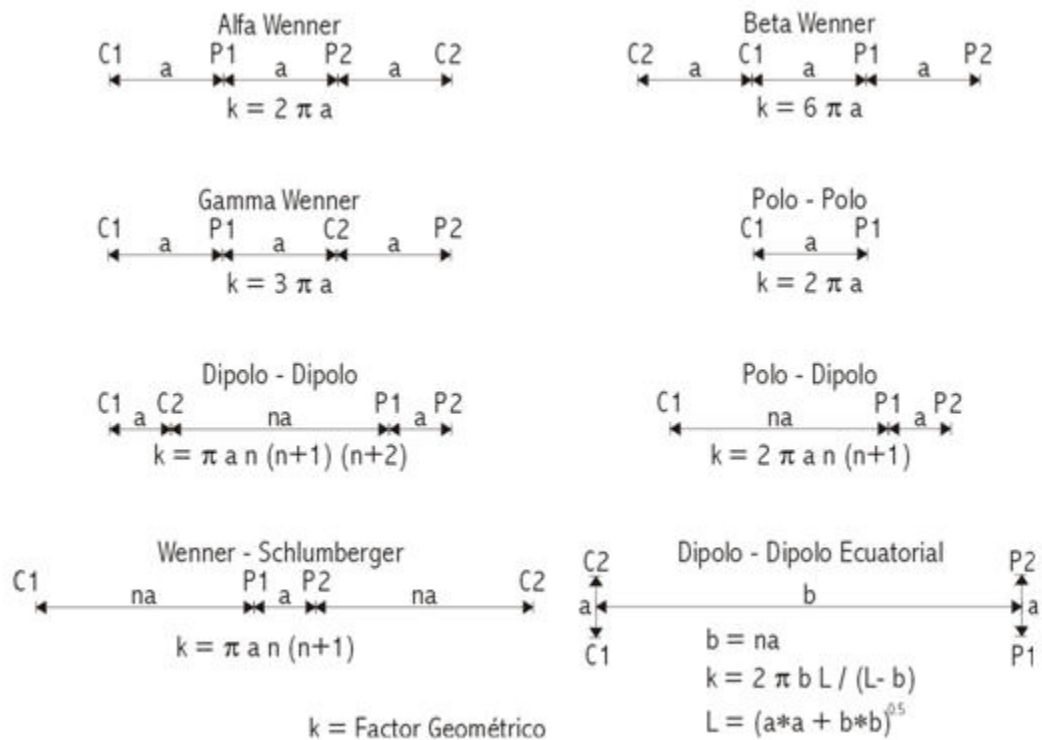


Figura 5. Diferentes Dispositivos usadas en Sondeos Eléctricos de Resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes Factores geométricos (Loke, 2002)

La interpretación de los datos de un sondeo 1D se basa en la presunción de que el subsuelo está formado por capas horizontales homogéneas e isotrópicas. En este caso, la resistividad del subsuelo cambia únicamente con la profundidad, y nunca lateralmente. Este condicionante es la principal limitación del SEV ya que normalmente el subsuelo no suele ser homogéneo (heterogeneidades y/o cambios laterales).

Los cambios laterales en la resistividad del subsuelo generan variaciones en los valores de resistividad aparente que pueden ser mal interpretados. En muchos estudios, donde la geología del subsuelo es compleja, la resistividad puede cambiar rápidamente en cortas distancias. El método de Sondeo Eléctrico Vertical no podría ser suficientemente preciso y resolutorio en tales situaciones.

A pesar de esta limitación, existen dos razones por las que el Sondeo Eléctrico Vertical 1D se ha empleado comúnmente:

- No ha existido hasta recientemente equipos que permitieran la realización de exploraciones en 2D y 3D.
- Carencia de herramientas de interpretación (software) para manejar modelos 2D y 3D.

En la actualidad, las investigaciones eléctricas en 2D y 3D son las técnicas comerciales más usadas debido al desarrollo relativamente reciente de instrumentos de registro resistividad multielectrodo (Griffiths et al. 1990) y el software de inversión necesario (Loke y Barker 1996).



1.2.2.- Exploraciones Eléctricas en 2D.

1.2.2.1 - Introducción.

La aproximación modelo más preciso del subsuelo es el modelo bidimensional (2D) donde se asume que la resistividad puede cambiar tanto en la vertical como lateralmente a lo largo de la línea de investigación. El modelo 2D asume que la resistividad en la dirección perpendicular al perfil de investigación no varía siendo esta presunción razonable en múltiples casos ².

La obtención de un perfil 2D se denomina Tomografía y en el caso de método geoelectrónico se denomina Tomografía Eléctrica (en adelante TE). La TE permite representar los datos de resistividad del subsuelo en forma de pseudosecciones y la inversión de las medidas nos proporcionan una imagen del modelo de resistividades del subsuelo.

1.2.2.2 - Procedimiento de medida e instrumentación empleada.

La TE 2D permite la obtención de resultados en áreas donde la geología, estructura y/o anomalías son moderadamente complejas (Griffiths y Barker 1993). Las mediciones se realizan empleando un número grande de electrodos (25 o más) conectados a una unidad de procesamiento portátil. La unidad selecciona de forma automática los cuatro electrodos correspondientes para cada medida (figura 6).

La figura 6 muestra la distribución típica de un perfil 2D con un gran número de electrodos a lo largo de una línea de registro. La distancia entre los electrodos es constante.

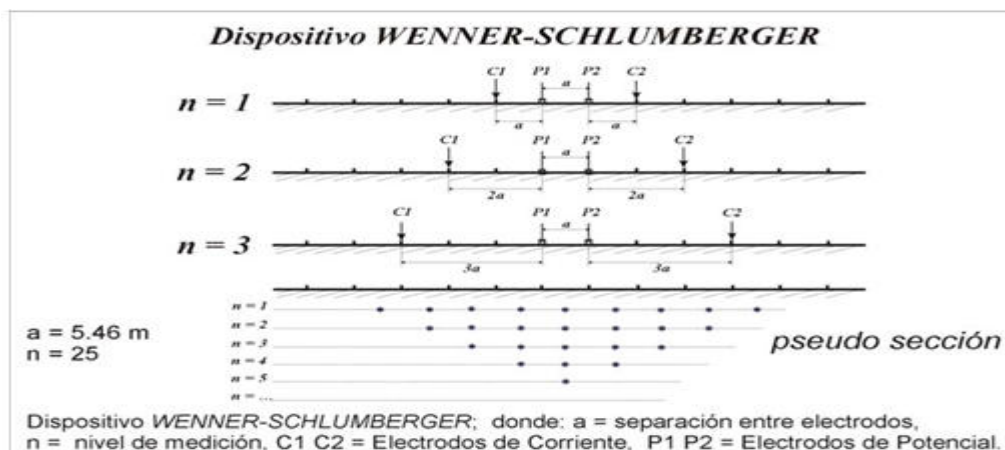


Figura 6. Dispositivo Wenner-Schlumberger para un perfil eléctrico 2-D y 3D y secuencia de medidas empleadas para construir la pseudosección (Loke, 2002)

La figura 6 muestra una sucesión posible de medidas para el dispositivo electrónico Wenner-Schlumberger para un sistema con 20 electrodos en el que el espaciamiento entre los

² Este condicionante hace necesario que la selección de la posición del perfil y del dispositivo de registro respecto al objeto de estudio haya que realizarlo perpendicularmente al mismo con el fin de evitar distorsiones en las medidas y errores en la interpretación.



mismos es "a". Para la primera medida, se usan los electrodos 1, 2, 3 y 4 empleando el electrodo 1 como electrodo de corriente C1, el electrodo 2 como el electrodo de potencial P1, el electrodo 3 como electrodo de potencial P2 y el electrodo 4 como el segundo electrodo de corriente C2. Para la segunda medida, el equipo selección de forma automática otros electrodos empleando los electrodos 2, 3, 4 y 5 para C1, P1, P2 y C2 respectivamente. Este procedimiento se repite sobre la línea de electrodos hasta que se utilizan los electrodos 17, 18, 19 y 20 para la última medida con espaciamiento "1a". Para un sistema con 20 electrodos, hay 17 (20 - 3) medidas posibles con espaciamiento "1a". La secuencia de medidas continua con un espaciamiento electródico "2a". Los primeros electrodos 1, 3, 5 y 7 se usan para la primera medida y es el equipo el que selecciona los electrodos para que el espaciamiento sea "2a". Para la segunda medida, se utilizan los electrodos 2, 4, 6 y 8. Este proceso se repite sobre la línea de medición hasta que se utilizan los electrodos 14, 16, 18 y 20 para la última medida con espaciamiento "2a". En este caso, se realizan 14 (20 - 2x3) medidas con espaciamiento "2a". Podemos ver como a medida que el aumenta el espaciado entre electrodos, disminuye el número de mediciones.

El mismo proceso se repite para medidas con espaciamientos "3a", "4a", "5a" y "6a". A medida que el espaciamiento entre electrodos aumenta, disminuye el número de mediciones.

La cantidad de datos que pueden obtenerse para cada espaciado entre electrodos para un determinado número de electrodos a lo largo de una línea de sondeo depende del tipo de dispositivo electródica que se utiliza. Como ejemplo el dispositivo Wenner es el que menos datos registra y el mayor es el dispositivo Polo-Polo para una cantidad determinada de electrodos y un mismo nivel de medidas.

1.2.2.3 – Pseudosección.

La representación de un perfil 2D se realiza a partir del método de contorneado o pseudosección. La ubicación horizontal del punto de medida se pone entre los electrodos del dispositivo utilizado mientras que la vertical se dispone a una distancia proporcional a la separación entre los electrodos.

La pseudosección es una aproximación a la distribución de la resistividad del subsuelo. Sin embargo, la pseudosección ofrece una visión deformada del subsuelo debido a que la forma de los contornos depende del tipo de dispositivo y de la resistividad del subsuelo.

1.2.2.4 - Ventajas y desventajas de los diferentes dispositivos de registro.

La elección del dispositivo de registro depende de varios factores como son:

- profundidad de investigación
- sensibilidad del dispositivo a los cambios verticales y horizontales de resistividad
- cobertura horizontal de datos
- relación señal /ruido.

Existen múltiples dispositivos de registro si bien, en la práctica, se suelen emplear cinco de ellos:

- A. Dipolo-Dipolo
- B. Wenner-Schlumberger



- C. Wenner
- D. Polo-Polo
- E. Polo-Dipolo.

1.2.2.5 - Profundidad de Investigación

El gráfico inferior (figura 7) muestra la profundidad media de investigación para los diferentes dispositivos. La profundidad se determina integrando la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977). Las profundidades son válidas para un modelo homogéneo de tierra por lo que la existencia de fuertes heterogeneidades en la resistividad de los materiales del subsuelo podría generar distorsiones en la profundidad real de investigación³.

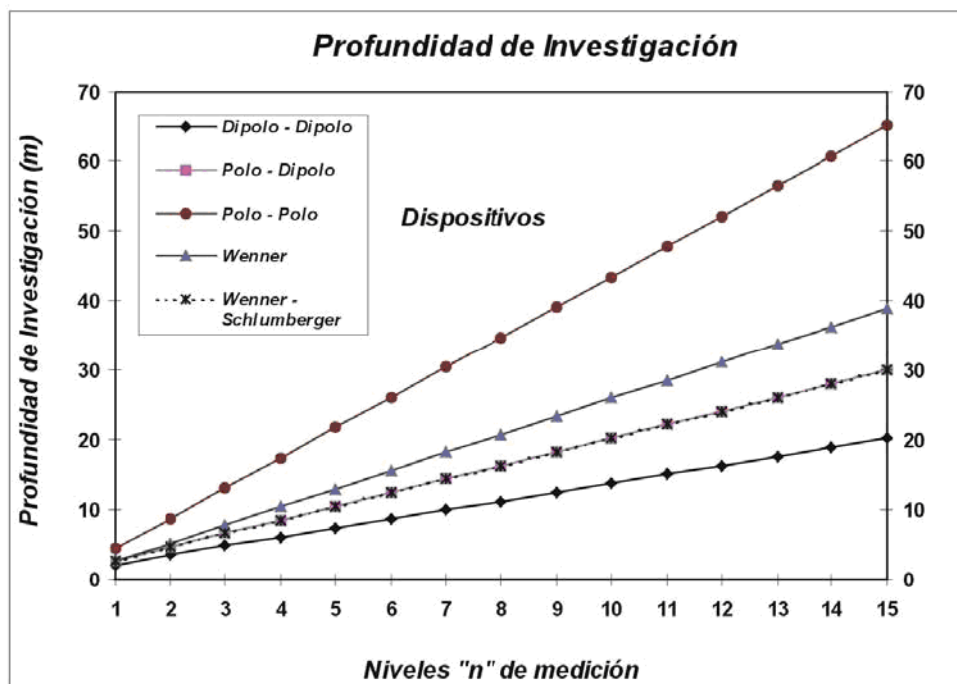


Figura 7. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner y Wenner –Schlumberger obtenidas para una distancia interelectródica de 5 metros y distintos niveles (Loke, 2002)

1.2.2.6. Sensibilidad.

Las figuras 9, 10, 11, 12 y 14 muestran el contorno para la función de sensibilidad de los dispositivos Wenner, Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger, Polo-Polo y Polo-Dipolo para un modelo de resistividad homogéneo. La sensibilidad es una función que muestra el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influye en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (McGillivray y Oldenburg, 1990).

Nótese que para todos los dispositivos, los valores más altos de sensibilidad se encuentran

³ Punto de investigación o perfil que se realiza en las inmediaciones de una zona en la que se conocen con precisión las características del terreno como puede ser el caso de un sondeo, el cual, aporta datos precisos sobre los cambios litológicos en profundidad e incluso informa sobre las propiedades físicas de los materiales del subsuelo (testificación geofísica). La información aportada por los puntos paramétricos en el caso de la TE permiten la mejorar en la interpretación ya que permiten determinar errores en el establecimiento de profundidades de emplazamiento así como en la correlación litología resistividad.



cerca de los electrodos. Los contornos de sensibilidad varían en cada dispositivo a medida que nos alejamos de los electrodos mostrando la respuesta de los dispositivos ante diferentes tipos de estructura. El rango de sensibilidades es único para un modelo de subsuelo determinado y para todos los dispositivos.

1.2.2.7 - Cobertura. Relación Señal /Ruido.

Cada dispositivo de registro presenta una cobertura diferenciada. La figura inferior (figura 8) muestra el modelo de datos en las pseudosecciones para los dispositivos wenner-schlumberger y polo-dipolo.

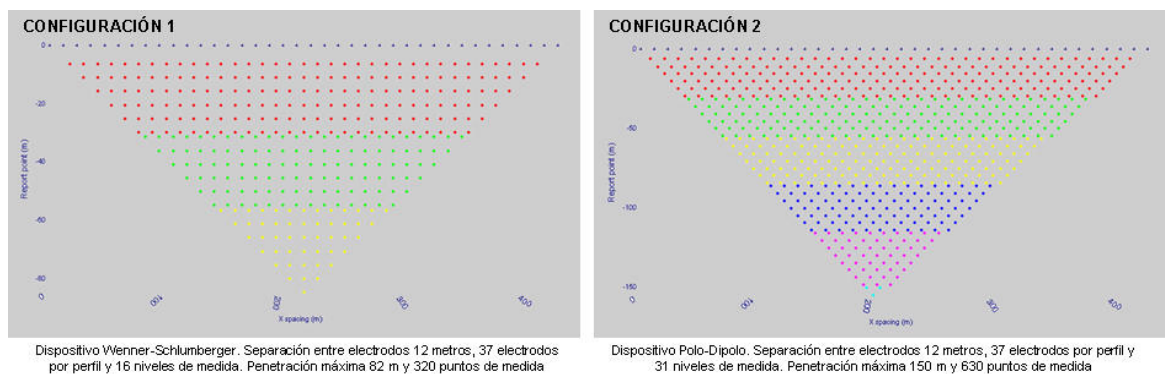


Figura 8. Comparación de la Cobertura para los dispositivos de electrodos y pseudosección de datos para las configuraciones Wenner-Schlumberger (Izda) y Polo-Dipolo (Dcha)

Podemos ver como el dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una mejor cobertura horizontal mejor comparada con el dispositivo Polo-Dipolo si bien la profundidad de investigación y puntos de registro es mucho mayor en el caso del dispositivo Polo-Dispositivo.

La relación señal /ruido está estrechamente relacionada con el valor de la constante k de cada dispositivo para un mismo modelo de subsuelo, la señal registrada es inversamente proporcional al factor geométrico K empleado para calcular el valor de la resistividad aparente (a mayor k , menor será la señal de potencial medido).



1.2.2.8 - Configuraciones / Dispositivos.

A continuación se describen los dispositivos más empleados en Tomografía Eléctrica 2D:

- Dipolo-Dipolo
- Wenner-Schlumberger
- Wenner
- Polo-Polo
- Polo-Dipolo

Configuración Wenner.

Dispositivo indicado para la determinación de cambios de resistividad en la vertical en detrimento de los horizontales, por lo que el dispositivo se encuentra indicado para el estudio de medios horizontalmente estratificados. La figura inferior (figura 9) muestra como los contornos de Sensibilidad son pseudohorizontales abajo del centro del conjunto.

La profundidad media de investigación es dentro de los dispositivos, moderada siendo aproximadamente 0.5 del espaciado "a" empleado. Para el dispositivo Wenner, el factor geométrico k es $2\pi a$ siendo menor que en otros dispositivos por lo que se ve afectado en menor medida por el ruido registrando una buena señal lo que lo hace especialmente indicado para estudios en emplazamientos con un ruido elevado.

EL sistema presenta una baja cobertura horizontal en cuanto se aumenta el espaciamiento entre electrodos.

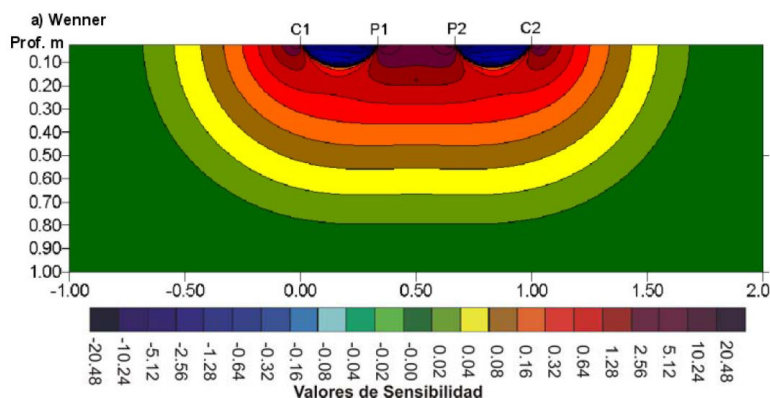


Figura 9. Sensibilidad para la configuración Wenner (Loke, 2002)

Configuración Dipolo-Dipolo.

Dispositivo ha sido y continúa siendo empleado con frecuencia en estudios de resistividad y PI (Polarización Inducida) debido al bajo acoplamiento entre la corriente y los circuitos potenciales. Este efecto se debe a que los efectos de cargabilidad son afectados notablemente por la señal de acoplamiento inductivo. El espaciado "a" entre los electrodos C1-C2 es igual al existente entre los electrodos de potencia P1-P2. El dispositivo tiene otro factor denominado "n" que depende de la distancia entre los electrodos C1 y P1 y la separación del dipolo "a" C2-C1 (o P2-P1).



Las investigaciones mediante mantienen el fijo inicialmente el espaciado “a” aumentando el factor “n” 1, 2, 3 hasta 15 veces con el fin de incrementar la profundidad de investigación.

El análisis de los contornos de sensibilidad (figura 10) muestra que las mayores sensibilidades se ubican entre los electrodos C2-C1 y el par P1-P2 de manera que el dispositivo se muestra muy sensible frente a cambios de resistividad entre los electrodos en cada par de dipolos o lo que es lo mismo, en la vertical.

Por lo tanto, el dispositivo Dipolo-Dipolo es muy sensible a cambios de resistividad horizontales, pero relativamente poco sensible a cambios verticales por lo que se encuentra indicado para el estudio de estructuras verticales.

La profundidad de investigación depende de “a” y del factor “n”, así como también de “a”. En general el dispositivo presenta una profundidad de investigación más pobre más somera que el dispositivo Wenner si bien, para perfiles 2D el dispositivo presenta una mejor cobertura lateral de datos.

Como desventaja hemos de citar que el dispositivo registra una baja señal para valores grandes del factor “n” debido a que el voltaje es inversamente proporcional al cubo del factor de “n”, lo que significa que para la misma corriente, el voltaje medido por el resistivímetro disminuye en más de 200 veces cuando “n” aumenta desde 1 a 6. Por este motivo se recomienda emplear este dispositivo en zonas sin ruido además de asegurar en todo momento un buen contacto entre electrodo y terreno.

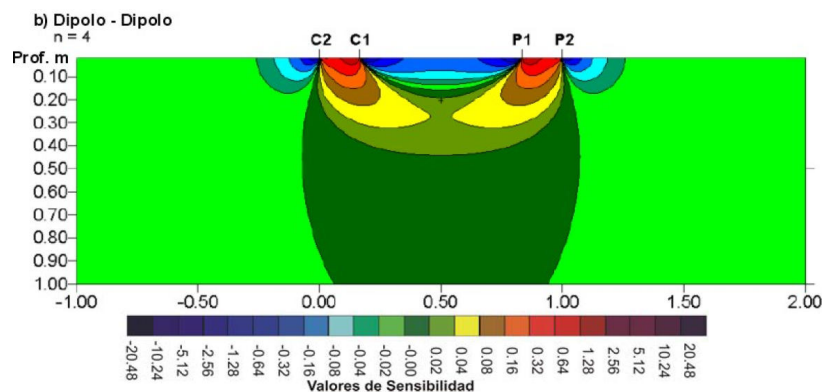


Figura 10. Sensibilidad para la Configuración Dipolo-Dipolo (Loke, 2002)

Configuración Wenner-Schlumberger

Dispositivo híbrido entre los dispositivos Wenner y Schlumberger (Pazdirek y Blaha 1996). Se trata de una forma modificada del dispositivo Schlumberger con un espaciado constante. En este caso el factor "n" es la relación entre la distancia de los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y el par potencial P1 – P2. La sensibilidad del dispositivo (figura 11) varía ligeramente frente al Wenner con una curvatura vertical delgada más adelante del centro del conjunto y la sensibilidad ligeramente más inferior en las regiones entre el C1 y P1 (y también C2 y P2) incrementándose la sensibilidad en el entorno de los electrodos P1-P2.

Por este motivo, el dispositivo es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales por lo que el dispositivo se puede mostrar adecuado para zonas geológicas complejas con cambios en las estructuras en ambas direcciones.



La modificación en el dispositivo hace que se puedan alcanzar profundidades de investigación un 10% superior que para el dispositivo Wenner para una misma distancia interelectrodos (C1 y C2).

La señal para este dispositivo es menor que para en el caso del Wenner, pero más alta que para el Dipolo-Dipolo.

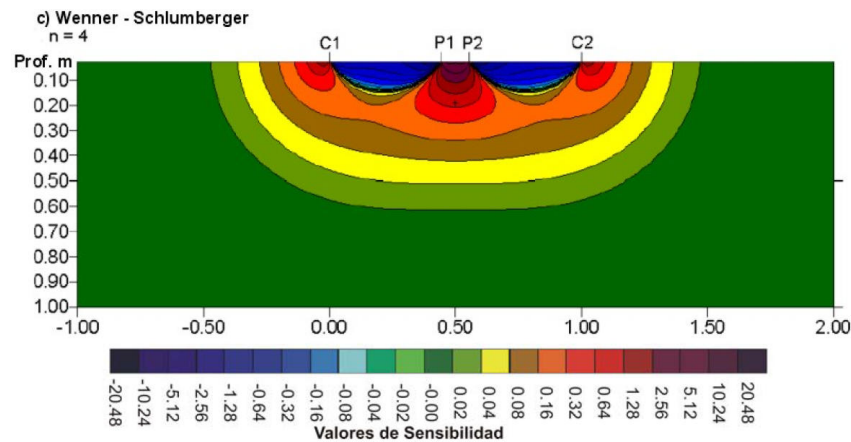


Figura 11. Sensibilidad para la configuración Wenner-Schlumberger (Loke, 2002)

Configuración Polo - Polo

Dispositivo con un único electrodo de corriente y un electrodo de potencial en el perfil. El segundo electrodo de corriente y de potencial (C2 y P2) debe situarse a una distancia superior a 10 veces la separación máxima entre C1 y P1 empleados.

Una desventaja de este dispositivo es que a causa de la gran distancia existente entre los electrodos P1 y P2, se puede generar un importante nivel de ruido telúrico que puede degradar en gran medida la calidad de las medidas. Por este motivo, el dispositivo Polo – Polo se aplica en estudios donde el espaciado entre electrodos es relativamente pequeño. Se trata de un dispositivo frecuentemente empleado en investigaciones arqueológicas en donde los espaciamientos entre electrodos es pequeño así como en mediciones 3D (Li y Oldenburg 1992).

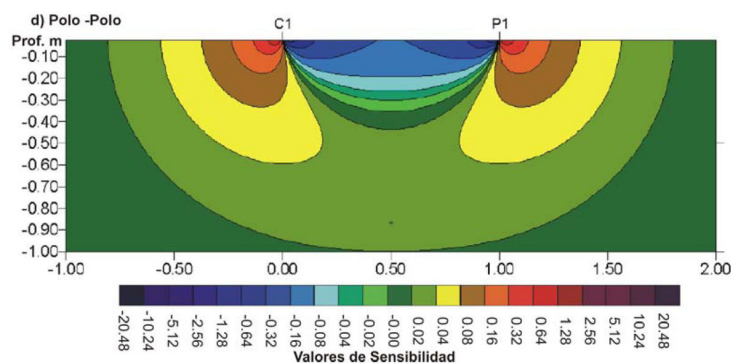


Figura 12. Sensibilidad para la configuración Polo-Polo (Loke, 2002)

El dispositivo presenta una gran cobertura horizontal muy amplia y la mayor profundidad de investigación si bien presenta una resolución relativamente pobre.



Configuración Polo – Dipolo

El dispositivo Polo–Dipolo posee una buena cobertura horizontal pero obteniendo una señal significativamente más alta comparada con el dispositivo Dipolo-Dipolo debido a su menor afección frente al ruido telúrico como la configuración Polo-Polo.

El dispositivo polo – dipolo es asimétrico (figura 13) por lo que obtiene anomalías de resistividad aparente en la pseudosección asimétricas lo cual, puede influir en el modelo obtenido tras la inversión.

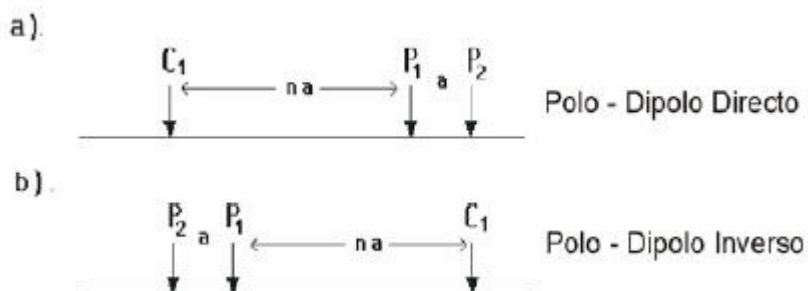


Figura 13. Dispositivo a) Polo-Dipolo Directo, b)Polo-Dipolo Inverso (Loke, 2002)

Este efecto de asimetría puede ser eliminado repetir las mediciones con un dispositivo de electrodos inverso combinando las medidas realizadas en forma “Directa” e “Inversa”.

El dispositivo Polo-Dipolo emplea un electrodo remoto (C_2) que debe emplazarse suficientemente alejado de la línea 2D. El dispositivo presenta una buena cobertura horizontal por lo que es atractivo para realizar mediciones de resistividades con un sistema multi-electrodo que posea un número relativamente pequeño de electrodos. La señal es comparativamente menor a los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger, pero más alta que el dispositivo Dipolo-Dipolo.

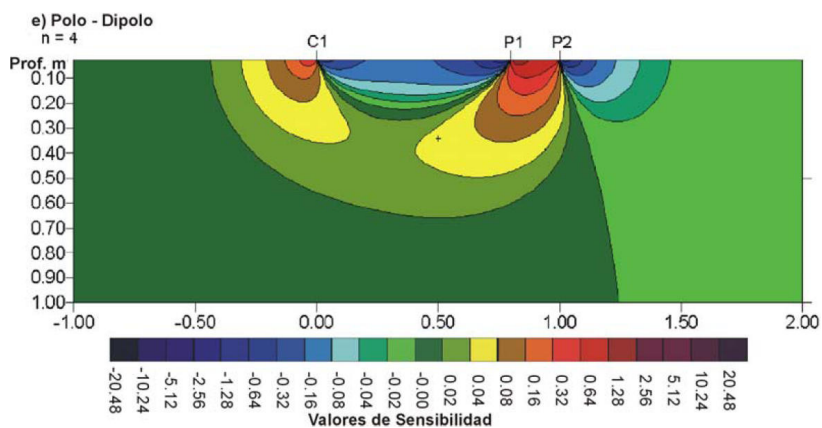


Figura 14. Sensibilidad para la configuración Polo-Dipolo (Loke, 2002)

Como conclusión y a modo de resumen se pueden definir la aplicabilidad y recomendación de empleo de los dispositivos:

Se recomienda el dispositivo Wenner si hemos de trabajar en un entorno con ruido (ciudad) y es necesaria una buena resolución vertical



- El dispositivo Dipolo-Dipolo es el indicado en estudios donde se necesita una buena cobertura horizontal y una resolución elevada siempre que haya un buen contacto electrodo-terreno.
- Si se precisa una buena cobertura horizontal y resolución vertical, se usa el dispositivo Wenner-Schlumberger con niveles de datos de superposición.
- Si se tiene un sistema con un número limitado de electrodos, una opción viable sería utilizar el dispositivo Polo-Dipolo con medidas realizadas en forma Directa e Inversa. Para perfiles con un pequeño espaciado interelectrodico y una buena cobertura horizontal, se recomienda la utilización del dispositivo Polo-Polo.

1.2.2.9 - Procesamiento, Inversión e interpretación

El resultado obtenido de la toma de medidas en campo es un conjunto de entre 200 y 1000 datos (en función del dispositivo y número de electrodos empleados) dispuestos en forma de pseudosección de resistividad aparente, a partir de los cuales, se puede efectuar una interpretación cualitativa de los datos permitiendo realizar una caracterización aproximada del subsuelo.

El procesado de los datos se realiza introduciendo los valores de aparente en un programa de inversión el cual puede realizar la inversión completa 2D para los diferentes dispositivos de medidas.

EL proceso de inversión genera como resultado una imagen de resistividades y profundidades reales que es la que ha de interpretarse y correlacionarse con la posible estructura geológica y litológica, datos de sondeos, etc. con el fin de cuantificar y/o delimitar las anomalías detectadas en profundidad y de lograr una interpretación coherente.

El procesado de los datos no es un proceso automático llevado a cabo por un ordenador sino que requiere la intervención del técnico ya que es necesario configurar el programa de cálculo de acuerdo a las características del objeto de estudio, el dispositivo y la experiencia del mismo.

El resultado obtenido tras el procesado e inversión es una sección o bloque de resistividades y profundidades reales del subsuelo el cual ha de ser interpretado para obtener una visión de la estructura y materiales del subsuelo.

1.2.3. Exploración Eléctrica Tridimensional 3D

1.2.3.1 - Introducción a las mediciones Tridimensionales

En la naturaleza, todas las estructuras geológicas son tridimensionales por lo que la generación de un modelo tridimensional de resistividad debería aportar resultados más precisos.

1.2.3.2 - Tipos de Configuraciones para Mediciones Tridimensionales

En estudios 3D se emplean los dispositivos Polo-Polo, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo. EL resto de dispositivos presentan una cobertura de datos más pobre cerca de los bordes de la malla



de registro. Las ventajas y aplicabilidad de estos tres dispositivos definidas en el caso de perfiles 2D son válidas para modelos tridimensionales.

Configuración Polo – Polo

La figura 15 muestra un dispositivo electródico para una medición 3D con una manguera de 25 electrodos. Uno de los requisitos para la obtención de un modelo 3D ha de ser que el mallado electródico ha de ser regular en las direcciones x e y.

El número máximo de medidas independientes para este tipo de configuraciones, $n_{\text{máx.}}$, que puede hacerse con n_e electrodos viene definido por la formula:

$$n_{\text{máx.}} = n_e (n_e - 1) / 2$$

En este caso, cada electrodo se emplea como electrodo de corriente midiendo el potencial eléctrico en todos los otros electrodos; debe notarse que debido a la reciprocidad es necesario medir solo los potenciales en los electrodos con un índice más alto que el electrodo actual de corriente.

Para una malla compuesta por cinco perfiles de cinco electrodos se pueden registrar 300 medidas mientras que en una malla de 10 perfiles de 10 electrodos se obtendrían 4.500 mediciones.

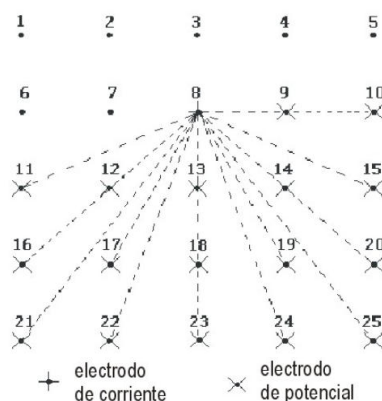


Figura 15. Localización de los electrodos de potencial correspondientes a un electrodo de corriente usado para mediciones para un conjunto de datos completo (Loke, 2002)

Configuración Polo – Dipolo

Dispositivo indicado cuando se va a realizar un mallado de mayor tamaño (12 por 12 y superiores). Este dispositivo presenta una mayor resolución siendo menos susceptible al ruido telúrico ya que ambos electrodos de potencial son incluidos dentro de la malla de medidas.

Configuración Dipolo-Dipolo

Este dispositivo se recomienda para mallas de registro de 12 por 12 electrodos debido a la pobre cobertura lateral debida a los pocos datos que obtienen en la horizontal. La señal que registra es comparativamente más baja que en otros dispositivos aspecto que puede ser solucionado aumentando el espaciamiento "a" entre electrodos P1-P2, a fin de conseguir una mayor profundidad de investigación.



Tras este análisis podemos definir la aplicabilidad de los diferentes dispositivos para estudios 3D.

En el caso de estudios 3D con mallas de pequeño tamaño (inferiores a 12 por 12 electrodos) y corta separación interelectródica se recomienda el empleo del dispositivo Polo-Polo ya que el mismo permite obtener un elevado número de medidas frente a otros dispositivos y la pérdida de datos cerca de los extremos de la rejilla se reduce al mínimo obteniendo una mejor cobertura horizontal. El dispositivo presenta el inconveniente de necesitar la implantación de dos electrodos "remotos" que deben ser ubicados a una distancia suficientemente grande y que es además el más sensible frente al ruido telúrico.

El dispositivo Polo-Dipolo presenta sin embargo una resolución más alta que el conjunto Polo-Polo ya que requiere un único electrodo remoto siendo menos sensible al ruido telúrico. Para la realización de mallas más grandes y en especial cuando no se puede implantar un electrodo remoto se recomienda utilizar un dispositivo Dipolo-Dipolo.

1.3.- Adquisición de datos en 3D (Mediciones Continuas en 3D)

Muchos de los estudios 3D se basan en mallas de registro superiores a 16 por 16 electrodos la cual requerirá 256 electrodos. Esta cantidad suele ser muy superior a las disponibles por lo que se ha diseñado un método para trabajar en mallas con gran número de electrodos basado en el análisis continuo de mediciones 2D y pasarlo a 3D (Dahlin y Bernstone 1997). La figura 16 muestra un ejemplo de toma de datos utilizando un Resistivímetro Multielectródico con 50 electrodos para medir una malla de 10 por 10 electrodos. Como punto de partida se dispone una malla 10 por 5 electrodos con las líneas más largas orientadas en la dirección x. Las mediciones se realizan primero en la dirección x con algunas mediciones en las direcciones diagonales.

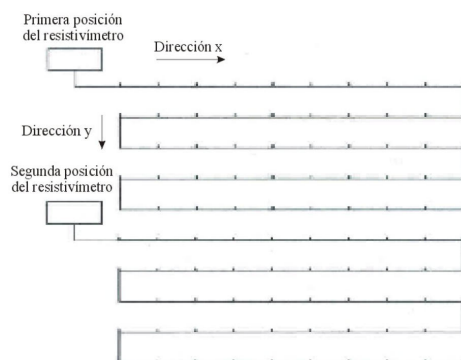


Figura 16. Malla de 10 por 10 electrodos (Técnica de análisis Continuo en 3D) (Loke, 2002).

En algunos casos, las mediciones se realizan en una dirección. El modelo 3D se basa en la integración de un número determinado de líneas paralelas 2D. Los datos de cada línea 2D se invierten de manera independiente para obtener secciones transversales en 2D. Cuando se han invertido todos los perfiles, se procede a combinar la totalidad de los mismos en un conjunto de datos 3D y se invierten para obtener una imagen 3D. Ha de tenerse en cuenta que este procedimiento presenta una calidad en los datos menor que en el caso de la adquisición 3D pura (full 3D).



1.3.1.- Técnica de Inversión de Datos

La rutina de inversión es similar al caso de los perfiles 2D pero aplicada al tratamiento de un bloque de electrodos distribuidos en un plano. Se basa en el método mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin y Constable 1990, Sasaki 1992). El software presenta una implementación del método de mínimos cuadrados con la técnica de optimización cuasi-Newton (Loke y Barker 1996) que incrementa la velocidad y capacidad de procesado en hasta 10 veces que el método de mínimos cuadrados para un gran conjunto de datos requiriendo menos memoria. El método de mínimos cuadrados con suavizado forzado se basa en la siguiente ecuación:

$$(\mathbf{J}'\mathbf{J} + \mathbf{uF})\mathbf{d} = \mathbf{J}'\mathbf{g} \quad (1)$$

$$\text{donde } \mathbf{F} = \mathbf{fxfx}' + \mathbf{fzfz}'$$

f_x = filtro de achatamiento horizontal

f_z = filtro de achatamiento vertical

\mathbf{J} = matriz de derivadas parciales

\mathbf{J}' = transpuesta de \mathbf{J}

\mathbf{u} = factor de amortiguamiento

\mathbf{d} = vector del modelo de perturbación

\mathbf{g} = vector de discrepancia

Una de las ventajas de este método es que el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento pueden ser ajustados para satisfacer diferentes tipos de datos.

También puede usarse el método convencional de Gauss-Newton el cual recalcula el Jacobiano de la matriz de derivadas parciales después de cada iteración. Esto es mucho más lento que el método cuasi-Newton, pero en áreas con gran contraste de resistividad más grandes que 10:1, brinda resultados ligeramente mejores (Loke y Dahlin, 2002). Una tercera opción es utilizar el método Gauss-Newton para las primeras dos o tres iteraciones, después que se usó el método cuasi-Newton. En muchos casos, esto provee la mejor solución de compromiso.

El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas tanto para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados. Puesto que la resolución del método de resistividad decrece rápidamente con la profundidad se ha demostrado que la subdivisión de los bloques solamente es beneficiosa para las dos primeras capas.

El método de optimización intenta reducir la diferencia entre la resistividad aparente calculada y la medida por adecuación de la resistividad del modelo de bloques. La medida de esta diferencia viene dada por el error cuadrático medio (RMS). Sin embargo, un modelo con un error RMS bajo puede mostrar variaciones elevadas y no realistas en los valores del modelo de resistividad no siendo el mejor modelo desde el punto de vista geológico.

1.4.- Tomografía eléctrica marina (Sysmar Software)

El Sysmar software es un programa de adquisición de resistividades en modo continuo, desarrollado por la empresa Iris Instruments, que puede ser utilizado tanto en aplicaciones



marinas como en tierra cuando las condiciones de humedad lo permiten.

Este Software ha sido desarrollado para la unidad de medida Syscal-Pro que gracias a sus 11 canales de recepción permite obtener 10 puntos de medida del parámetro resistividad simultáneamente correspondientes a 10 niveles de profundidad.

Esta herramienta permite tomar medidas cada 150 ms (tiempo de inyección de corriente) y en caso de la utilización de un GPS/sounder durante la toma de datos del perfil, el tiempo de adquisición sería de 2 s.

Permite la inyección de hasta 2,5 A lo que permite obtener una alta calidad en los resultados en caso de áreas muy conductoras como por ejemplo el agua salada.

Todas estas especificaciones permiten que esta herramienta (Sysmar Software + Syscal Pro) sea muy eficiente para la toma de medidas en aplicaciones marinas.

En la práctica, la tomografía eléctrica marina consiste en ir desplazando una manguera de 13 electrodos (2 para la inyección de corriente y 11 para la recepción de los potenciales) mediante un barco. En cada inyección de corriente se obtienen 10 medidas de resistividad (10 niveles) en el centro de la manguera y las medidas son tomadas con el dispositivo Schlumberguer recíproco que permite obtener 10 medidas con tan solo dos electrodos de inyección de corriente.

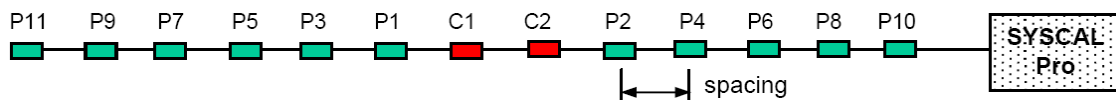


Figura 17. Dispositivo de medidas (http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/SyscalPro_Gb.pdf)



Imagen 1. Detalle de los equipos



1.5.- Ejemplos de Aplicación

1.5.1.-Determinación Estructural y geométrica de materiales permeables para la elaboración de un modelo numérico de flujo en León capital.

El trabajo consistió en la realización de una serie de perfiles de TE 2D en un entorno urbano en las zonas de “sombra” en las que no existen datos acerca de la estructura y profundidad de los materiales permeables que constituyen el acuífero regional. El objetivo es aportar información estructural para generar un modelo de flujo de apoyo a la construcción del soterramiento de una línea de ferrocarril.

Los perfiles se realizaron empleando una manguera de 48 electrodos con 3 m de espaciado y se empleó un dispositivo wenner. EN las zonas en las que no fue posible la implantación de los electrodos en el terreno (aceras, hormigón, etc.) se emplearon placas galvánicas (figura 18).

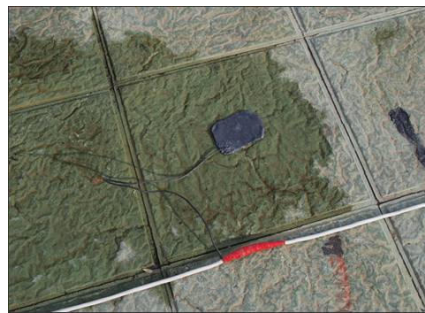


Figura 18. Placa galvánica impregnada de solución salina

Como apoyo a la interpretación de los perfiles, se han utilizado los sondeos existentes más cercanos, con información litológica disponible con carácter paramétrico. El perfil inferior se interpretó empleando para tal efecto los datos de dos sondeos de investigación. Con la ayuda de las profundidades de contacto litológico se establecieron los criterios de interpretación de los perfiles restantes dentro del estudio.

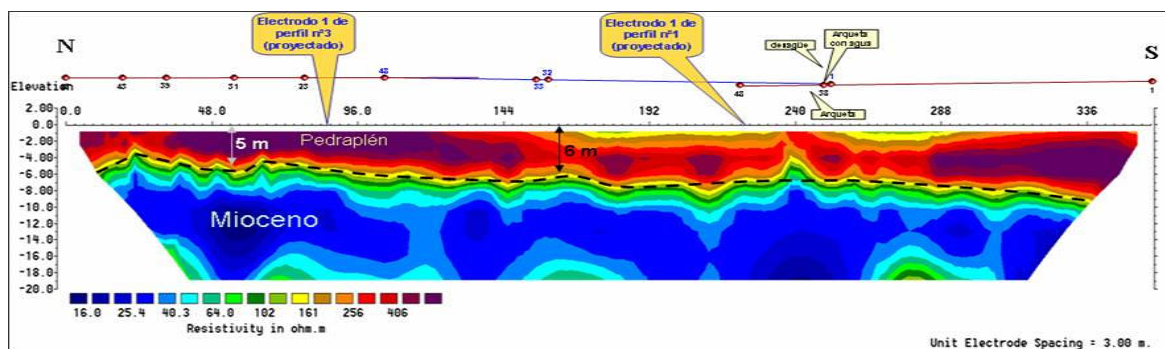


Figura 19. Perfil 1 con los sondeos paramétricos e interpretación realizada. Procesado mediante programa Res2Dinv

El estudio determinó que la TE es una herramienta muy eficaz para la realización de este tipo de estudios permitiendo definir con gran precisión la morfología y potencia de los materiales

acuíferos. Y determinando zonas de conexión y desconexión hidráulica con el río existente en la zona de estudio.

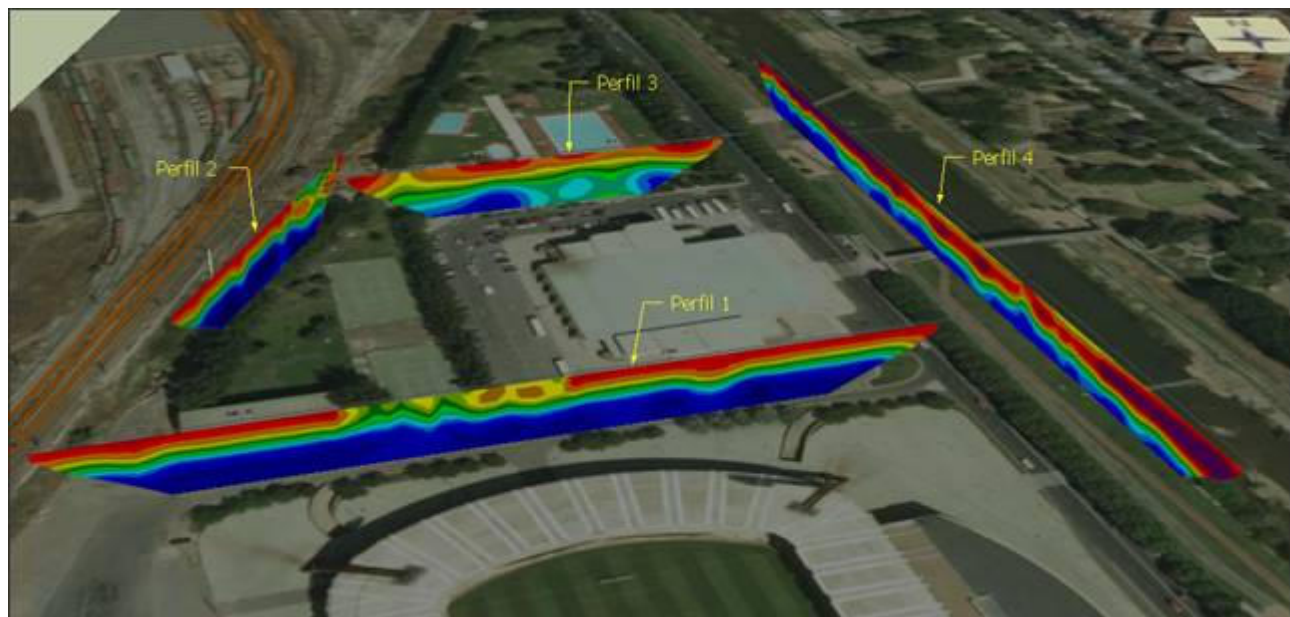


Figura 20. Imagen 3D montada mediante el software Sketchup de los perfiles realizados

1.5.2.- Determinación estructural y geométrica de materiales permeables para su empleo como depósito subterráneo mediante recarga artificial en la Luisiana (Sevilla)

El trabajo consistió en la realización de una serie de perfiles de TE 2D con el objetivo de localizar la existencia de materiales permeables con el fin de emplearlos como depósitos subterráneos mediante recarga de los mismos con los excedentes de lluvia recogidos en vales de drenaje. Para ello, se ejecutaron un total de 8 perfiles de TE de más de 12 Km de longitud total empleando para ello una manguera de 48 electrodos con 3 m de espaciado y dispositivo wenner. La traza de los perfiles se trató de hacer coincidir por algunos de los sondeos de investigación existentes para emplearlos con carácter paramétrico (figura 21).

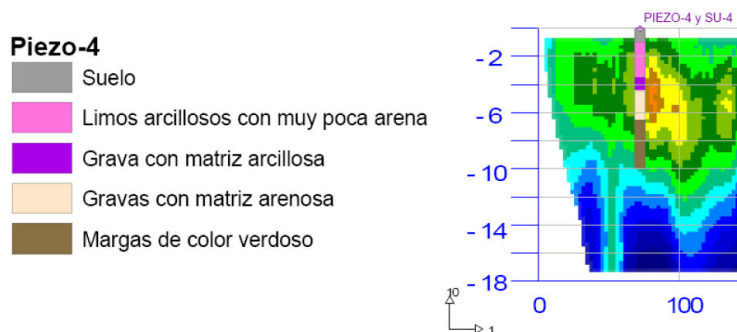


Figura 21. Comparación entre la columna litológica obtenida en un sondeo de investigación y los valores de resistividad obtenidos por el perfil de TE. Empleo del sondeo con carácter paramétrico

Una vez establecidos los patrones de interpretación se procedió a interpretar los perfiles y definir las zonas de interés para llevar a cabo los sondeos de inyección o zanjas de filtración. La imagen inferior (figura 22) muestra una visión 3D de los perfiles realizados. Las zonas resistivas



(tonos verdes a morados) corresponden a los niveles arenoso-conglomeráticos que constituyen la formación permeable almacén mientras que los tonos azules se interpretan como materiales margo-arcillosos de carácter predominantemente impermeable. El análisis de los perfiles muestra como el nivel de interés tiende a situarse de forma más profunda hacia la derecha llegando a estar en su parte más distal, aislado de la superficie por margas. También se observa como el nivel de interés es más resistivo (tonos rojos) hacia la parte derecha indicando litologías más permeables.

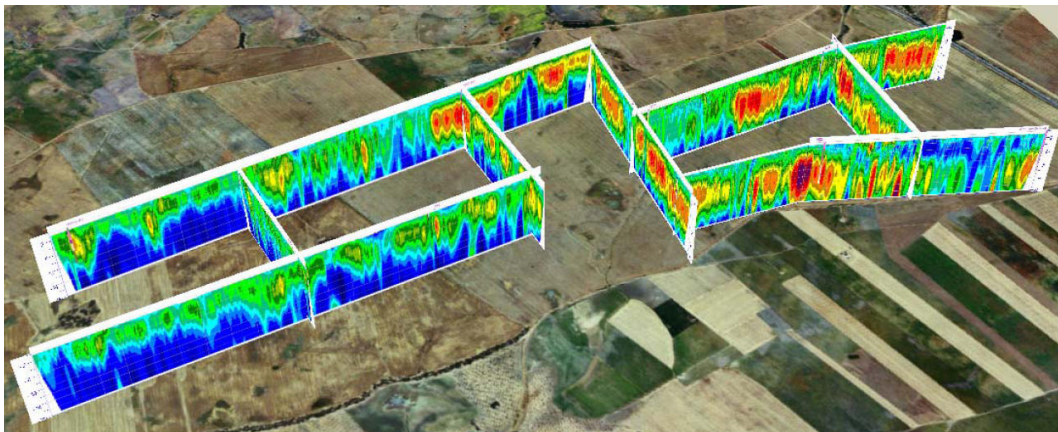


Figura 22. Imagen 3D montada mediante el software Sketchup de los 8 perfiles realizados en la zona de estudio

1.5.3.- Tomografía eléctrica 2D/3D para la determinación de zonas de karstificación (fracturas y huecos) en el embalse de Santolea (Teruel).

El objetivo de la investigación fue el estudio de una posible zona karstificada para la detección de fracturas y/u oquedades dentro de los materiales carbonatados cretácicos que constituyen la cerrada actual de una presa y que serán objeto de los trabajos de recrecimiento de la misma.

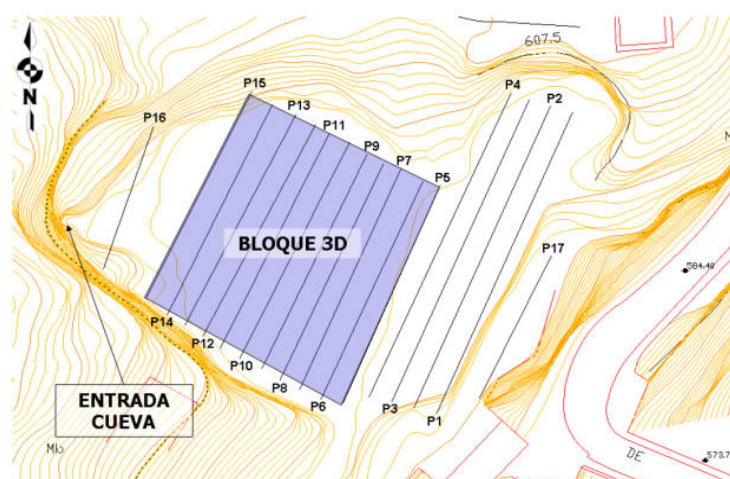


Figura 23. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D

Los perfiles 2D y bloque 3D se realizaron con electrodos separados 1,5 m de espaciado y



dispositivo Polo-Polo. Se realizaron 6 perfiles 2D y un bloque 3D con una malla de 165 electrodos (figura 23).

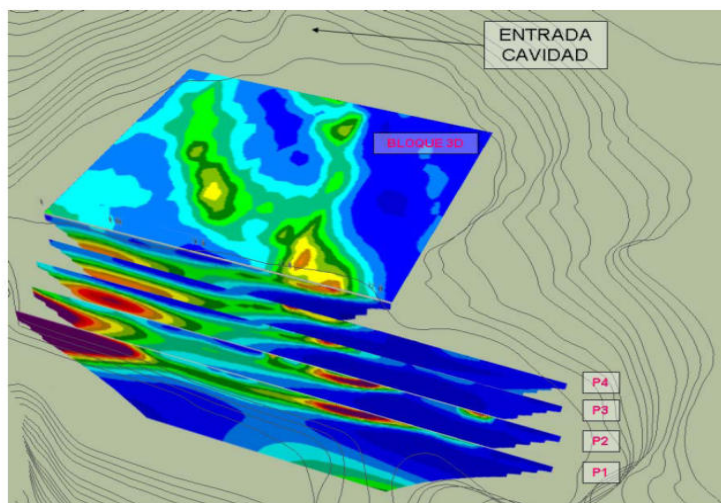


Figura 24. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D montado con el software Sketchup

La interpretación conjunta de los perfiles 2D y modelo 3D permitieron definir una serie de anomalías resistivas (tonos rojizos) que definían la presencia de un plano de debilidad (estratificación o fractura) a favor del cual se habían desarrollado unas posibles fracturas. El modelo 3D permite la definición tridimensional de las zonas de fractura (figura 25).

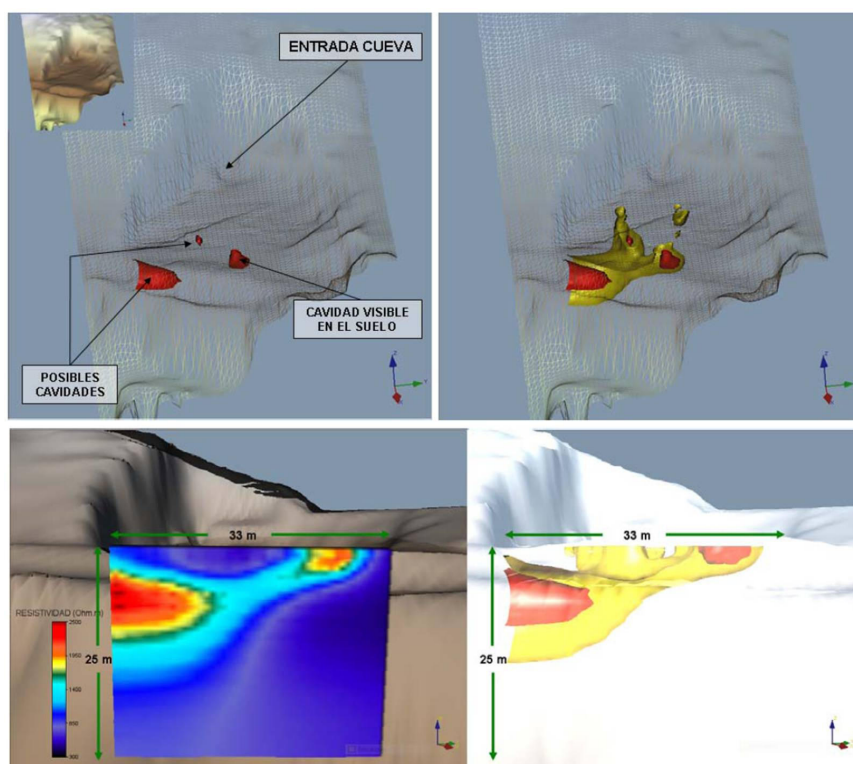


Figura 25. Modelo 3D realizado mediante el programa Voxler. Delimitación de las zonas de cavidades y vista frontal de las mismas



1.5.4.- Tomografía eléctrica 3D para la determinación de zonas de huecos en Mallorca capital.

El objetivo de la investigación fue la localización de cavidades que pudieran afectar a la cimentación de una serie de futuras edificaciones. El modelo 3D tubo unas dimensiones de 42 por 30 m, 140 electrodos y dispositivo polo-polo. EL bloque 3D de resistividades obtenido muestra la existencia de una anomalía resistiva (tonos rojos) en la esquina SW del bloque la cual se relaciona con la existencia de una cavidad rellena de aire (figura 26).

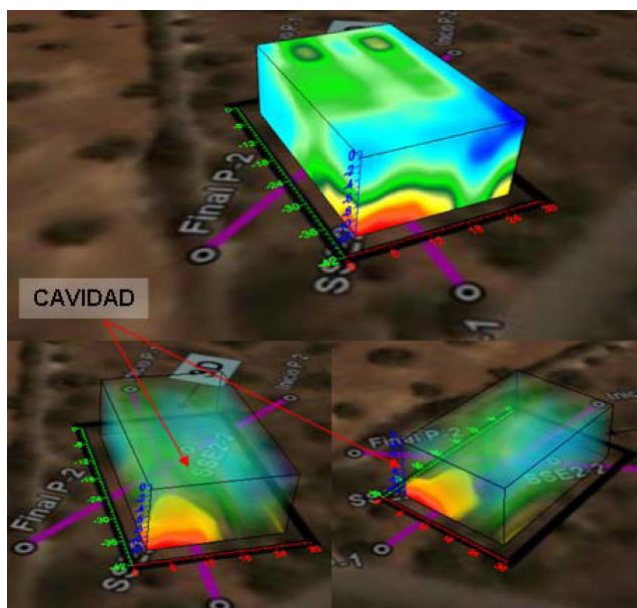


Figura 26. Plano de situación de los perfiles 2D y Bloque 3D. Software Voxler

El software de tratamiento de los datos permite definir isosuperficies de resistividad. La figura 27 muestra la superficie de 500 Ohm·m, valor considerado en este caso como indicador del posible límite de extensión de la cavidad.

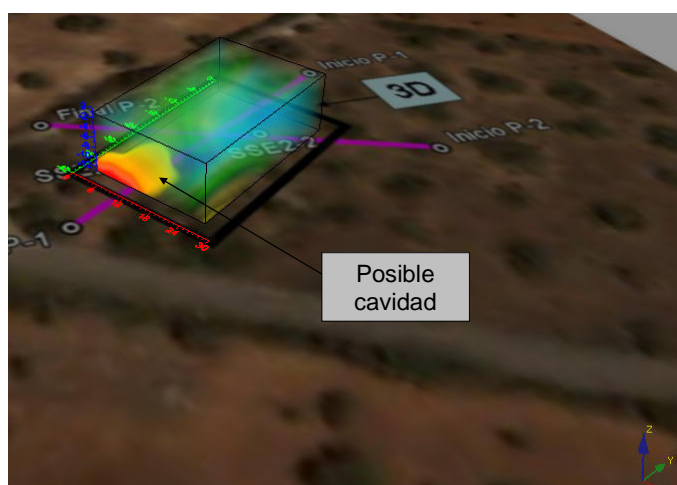


Figura 27. Delimitación de la isosuperficie de resistividad que refleja el límite de extensión de la cavidad. Software Voxler

1.5.5.-Tomografía eléctrica 3D para la localización de galerías mineras que afectan a la traza de un túnel (Detección de huecos) en Valencia

Durante el inicio de excavación de un túnel en yesos aparecieron restos arqueológicos de actividad minera. El objetivo de la investigación fue la localización de las galerías mineras para su tratamiento y relleno de manera que no afectase por su posición (clave del túnel) a la construcción del túnel. Para ello se realizaron un total de 5 perfiles de TE 2D con una manguera de 48 electrodos de 5 m de separación y dispositivo Polo-Dipolo. El perfil inferior (figura 28) corresponde a uno de los realizados en la zona de estudio y muestra una serie de anomalías conductoras (tonos azules y verdes) que se han relacionado con las galerías de extracción de mineral.

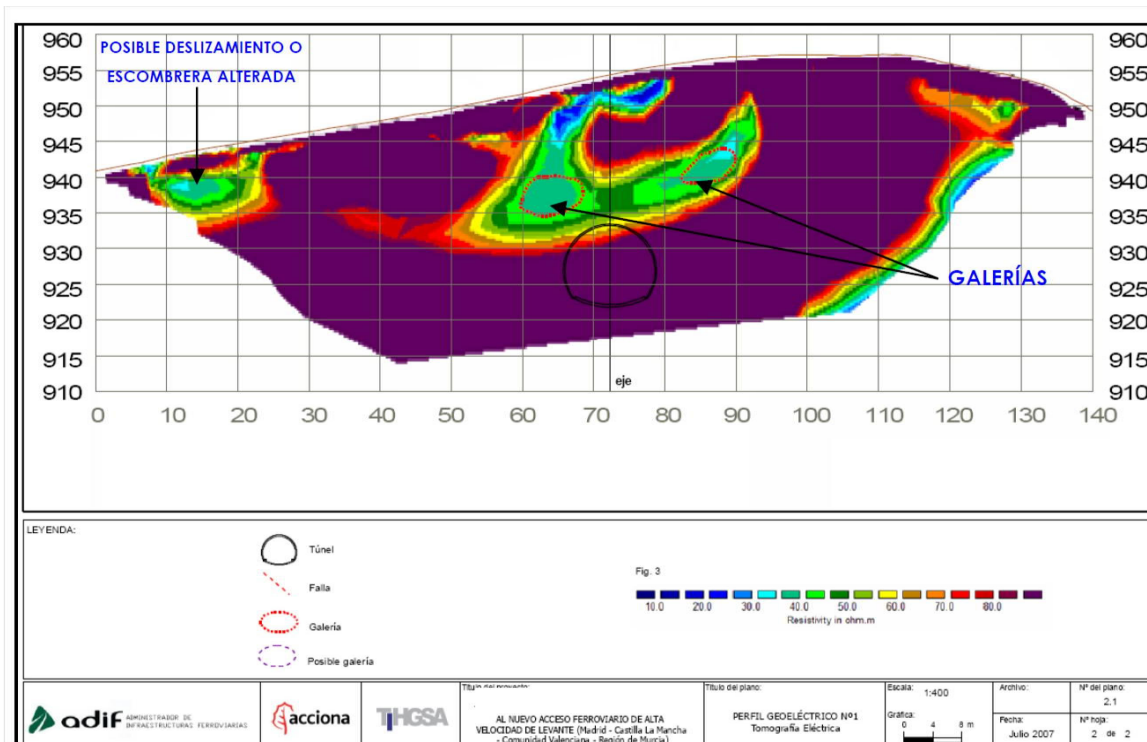


Figura 28. Perfil de TE 2D mostrando el emplazamiento de las posibles galerías mineras y del túnel a ejecutar. Procesado mediante programa Res2Dinv

El tratamiento conjunto de todos los perfiles (figura 29) permite el posicionamiento tridimensional de las galerías de extracción de mineral, definir el grado de afección al túnel y diseñar el sistema de tratamiento (inyecciones) de las galerías.

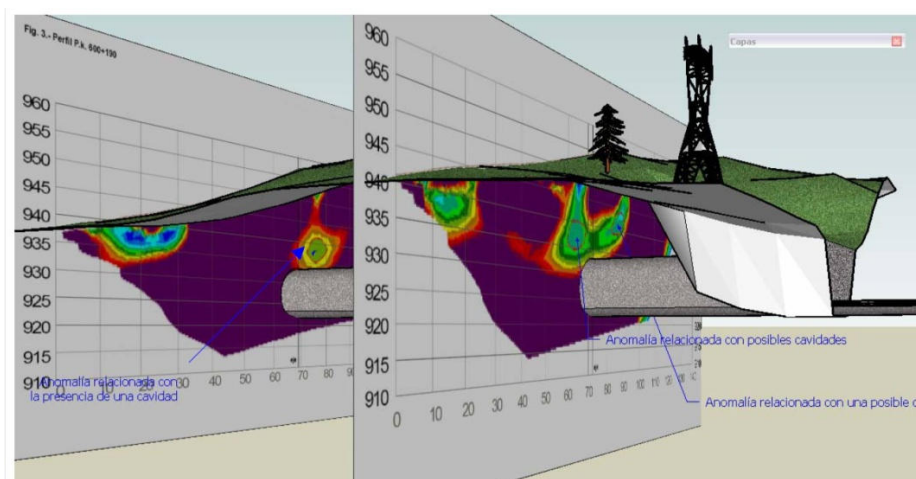


Figura 29. Imagen 3D montada con programa Sketchup de los perfiles 2D realizados mostrando la situación d las galerías mineras y la posible correlación entre las mismas.

1.5.6.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para evaluar el estado de un dique en el Puerto de Barcelona

El objetivo de esta investigación fue el definir la morfología y distribución litológica de los materiales del dique, así como, poner de relieve las condiciones en las que se encontraba su estructura. El método de investigación geofísica empleado fue el eléctrico de resistividades en la modalidad de Tomografía Eléctrica 2D, tecnología que permitió controlar los cambios laterales y en profundidad, deduciendo un modelo geoelectrico del subsuelo.

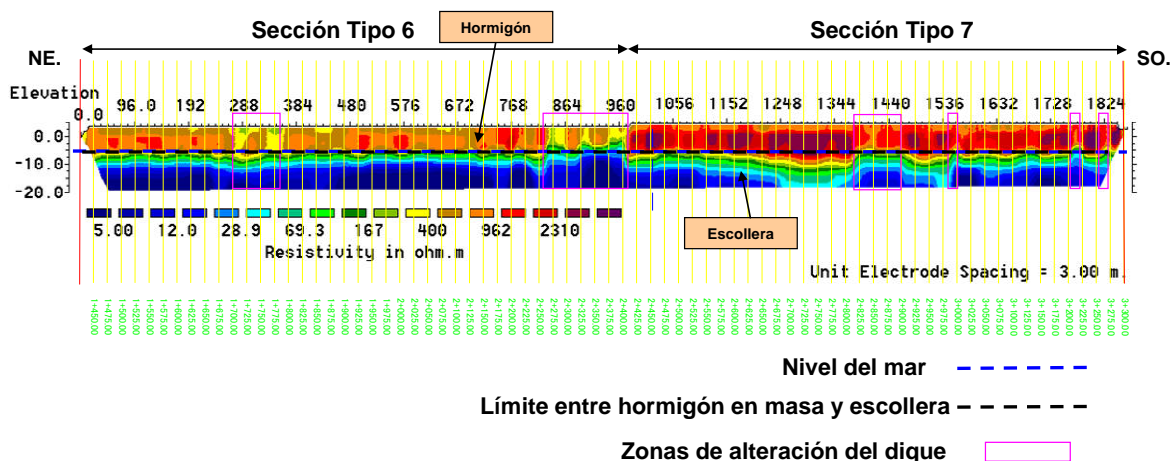


Figura 30. Ejemplo de perfil de TE 2D mostrando el emplazamiento de los diferentes tipos de sección del dique y las zonas de alteración. Procesado mediante programa Res2Dinv.

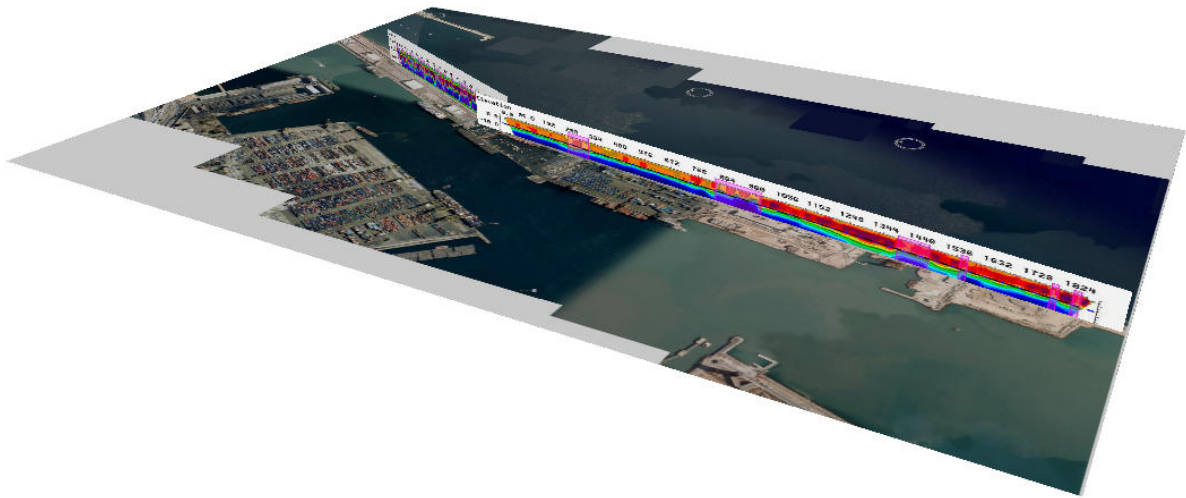


Figura 31. Imagen 3D montada con programa Sketchup de los perfiles 2D realizados



Imagen 2. Toma de datos mediante TE en el Puerto de Barcelona



1.5.7.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica en el río Guadiana (Mérida)

El objetivo de esta investigación fue el de definir la morfología y distribución litológica de los materiales en el subsuelo hasta una profundidad de 50 metros, así como, poner de relieve la presencia de cambios significativos. Para la realización de las medidas de tomografía eléctrica sin fugas de corriente, se utilizaron cables preparados para medir bajo el agua.

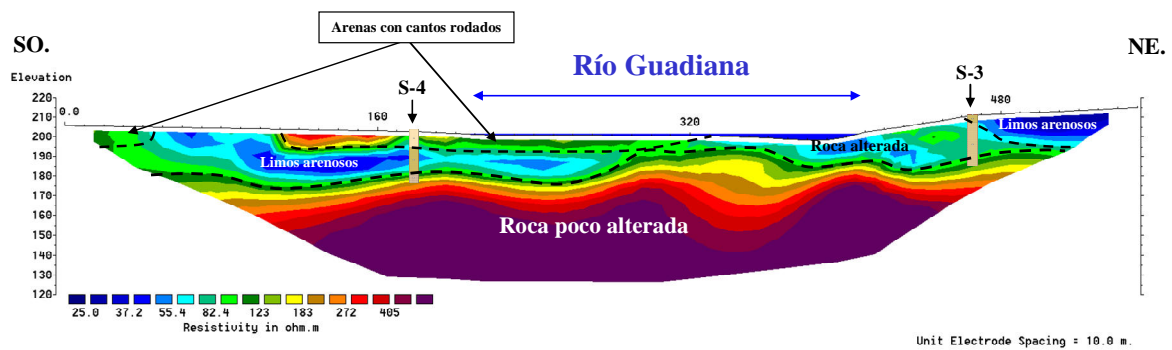


Figura 32. Perfil 1 con los sondeos paramétricos e interpretación realizada. Procesado mediante programa Res2Dinv.

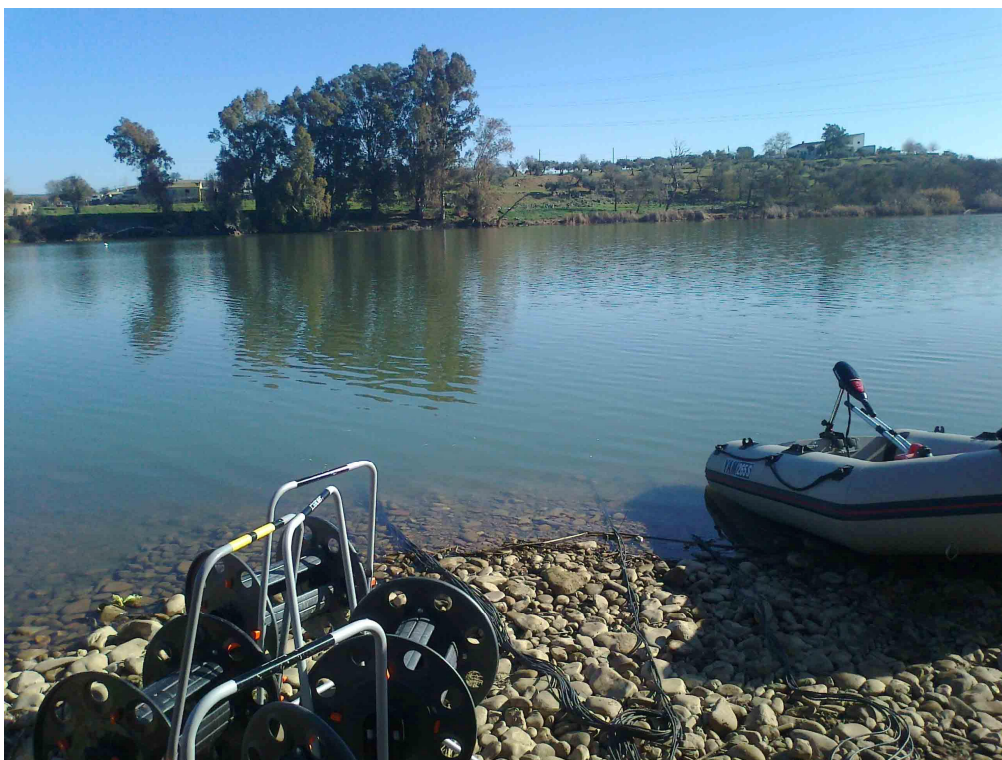
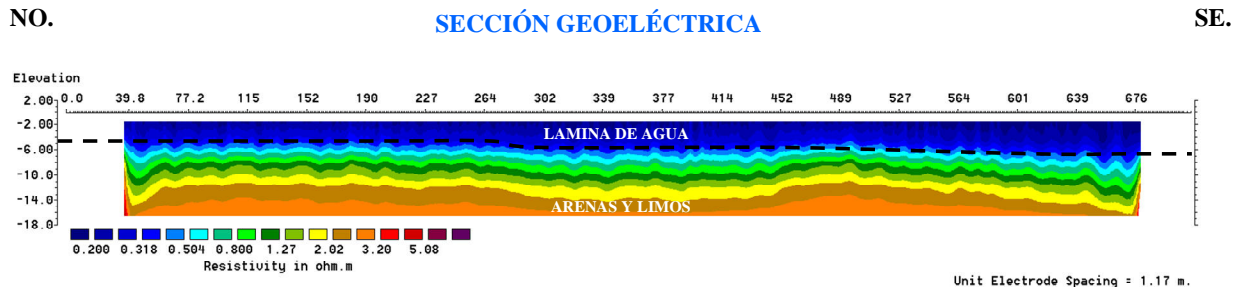


Imagen 3. Toma de datos en el Río Guadiana (Mérida)



1.5.8.- Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica marina en Valencia

El objetivo de esta investigación fue el de definir la morfología y distribución litológica de los materiales bajo el mar hasta una profundidad de 12 metros.



La resistividades de la sección son bajas debido al efecto del agua salobre

Figura 33. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica marina 2D realizado mediante programa sysmar.

Procesado mediante programa Res2Dinv.



Imagen 4. Toma de datos



1.6.- Equipo empleado

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD: SYSCAL Pro



Imagen 5. Equipo Syscal-Pro desarrollado por la empresa Iris Instruments

OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter) Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- Switch version output voltage: up to 800 V

INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M Ω
- Input voltage: Max. channel 1: 15 V Max. channel 2 to channel 10: 15 V Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement: Precision: 0.2 % typical Resolution: 1 μ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg



2.- POLARIZACIÓN INDUCIDA (PI)

2.1. - Origen del efecto de la polarización inducida. Generalidades.

Durante el tiempo que fluye la corriente, se supone que algún tipo de energía se almacena en el material. Aunque esta energía teóricamente (y probablemente así sea) puede existir de diferentes formas, por ejemplo: mecánica, eléctrica y química, los estudios realizados en laboratorios de polarización en varios tipos de roca han establecido que la energía química es con mucho la más importante.

Esta energía química almacenada es como consecuencia de:

Variaciones en la movilidad de los iones de los fluidos contenidos en la estructura de la roca;

Variaciones entre conductividad iónica y electrónica donde hay presentes minerales metálicos.

El primero de estos efectos es conocido como polarización de membrana o electrolítica, y constituye el valor de fondo o el también llamado efecto normal de P.I. Éste puede tener lugar en rocas que no contienen minerales metálicos (Kearey y Brooks, 1991).

El segundo es conocido como polarización de electrodo o sobrevoltaje. Éste es generalmente mayor en magnitud que el valor de fondo de P.I. y depende de la presencia de minerales metálicos en la roca.

2.2. - Polarización de membrana.

Este efecto ha sido estudiado exhaustivamente (Marshall, D.J y Madden, T.R., 1959) . Hemos de recurrir a él para poder explicar los efectos de P.I. que se observan en zonas terciarias con presencia de arenas, arcillas, etc., y, en contrapartida, con ausencia de minerales metálicos.

Partimos del hecho de que en la mayoría de las rocas, cuando no están presentes minerales metálicos, la corriente circula por medio de conducción iónica o electrolítica y, por otra parte, la estructura de la roca ha de ser porosa para permitir el flujo de la corriente.

La mayoría de las partículas de mineral presentes en los poros de la roca tienen carga negativa y, en consecuencia, los iones positivos son atraídos hacia la superficie del mineral, produciendo una concentración, mientras que los iones negativos son repelidos por ella.

Cuando se aplica una corriente a su través los iones negativos se acumulan en un extremo de la partícula y los positivos en el otro. Es decir, se produce una separación de cargas para formar una distribución bipolar.

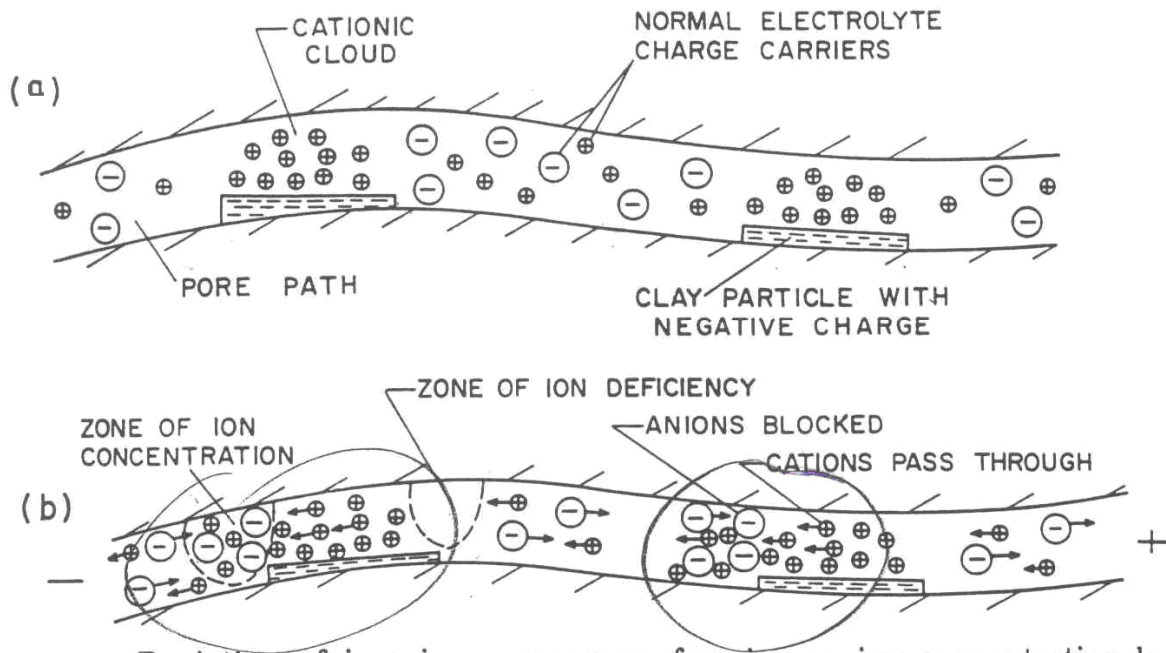


Figura 34. Creación de la polarización de membrana. Posición de los iones antes de la aplicación de un potencial eléctrico a) y después de la aplicación de una corriente eléctrica b) (Kearey y Brooks, 1991)

Como resultado de esta distribución polarizada, se dificulta el paso de la corriente, al no permitir una libre circulación de iones. En un instante posterior, cuando se produce el corte de la corriente, la concentración de iones que se ha ocasionado tarda un tiempo finito en desaparecer, hasta que regresan a su posición original.

El efecto de polarización de membrana es más pronunciado en ausencia de minerales en los que los poros son particularmente pequeños. Este fenómeno no se observa en las arenas limpias de cuarzo.

La magnitud de polarización varía en función de la concentración de arcilla en los minerales. La concentración óptima varía a su vez para diferentes tipos de arcillas, siendo baja en la mormorillonita y alta en la caolinita (Por otra parte, los esquistos, con un alto porcentaje en minerales arcillosos, tienen una polarización relativamente baja.) El efecto de membrana aumenta también con la salinidad de los fluidos que rellenan los poros.

Podríamos decir que la polarización de membrana es generalmente máxima en rocas que contienen minerales arcillosos dispersos a través de la matriz en una concentración $\leq 10\%$ y el electrolito presenta alguna salinidad.

2.3. - Polarización de electrodos.

Este tipo, similar en principio a la polarización de membrana, tiene lugar cuando en la roca hay presentes minerales metálicos.



Partimos del principio de que la corriente eléctrica es transportada en el terreno normalmente por iones en los electrólitos presentes en los poros de las rocas (conducción electrolítica).

Si el paso de estos iones queda obstruido por ciertas partículas que, como los metales, transportan la corriente por electrones, las caras iónicas se acumulan en el límite electrolito-partícula: las positivas por donde la corriente penetra en la partícula y las negativas por donde la corriente sale. La partícula mineral se polariza al producirse en el límite electrolito-partícula un paso de conducción iónica a electrónica e inversamente (Kearey y Brooks, 1991).

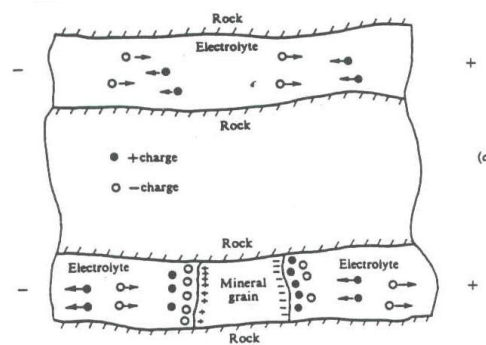


Figura 35. Membrane and electrode polarization effects. Electrolytic flow in upper pore, electrode polarization in lower pore.) (Kearey y Brooks, 1991)

En ese contacto ha tenido lugar una reacción química que en fisicoquímica se conoce como sobrevoltaje.

Durante el tiempo que la corriente eléctrica está circulando a través del subsuelo se produce un campo eléctrico primario por la inducción de corriente, y como consecuencia de la polarización que adquieren las partículas minerales metálicas, se crea un campo eléctrico de polarización; el efecto ambos será medido en superficie mediante un par de electrodos im polarizables.

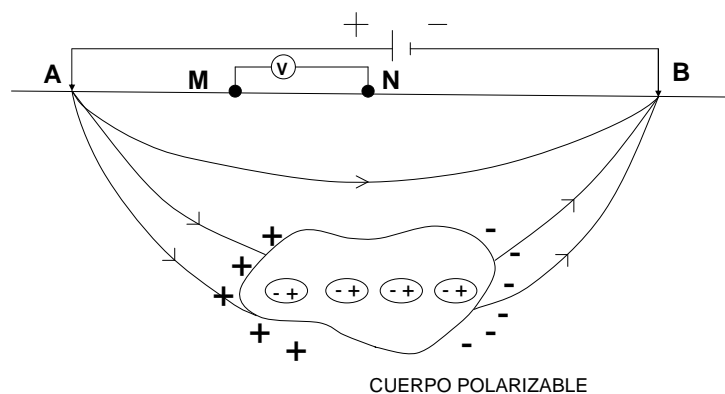


Figura 36. Campo primario + Campo de Polarización



Cuando la corriente se interrumpe, la distribución de iones se modifica volviendo a alcanzar su estado original de equilibrio; esto no se realiza de una manera instantánea sino invirtiendo en ello un cierto tiempo, durante el cual el potencial residual que queda en la partícula (o sobrevoltaje) va decreciendo continuamente hasta estar de nuevo la partícula en equilibrio con el cuerpo que la rodea.

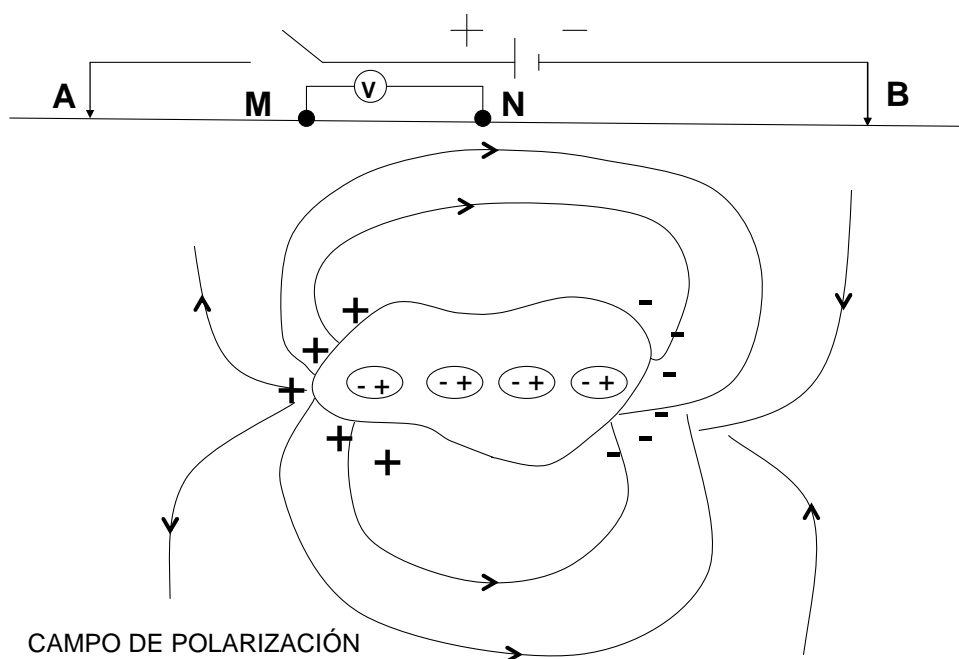


Figura 37. Interrupción de la corriente. Distribución de los iones volviendo a su estado original

Ha ocurrido que al cesar la corriente el campo eléctrico primario ha desaparecido y sólo queda el campo eléctrico de polarización, cuyo efecto será medido en superficie por los electrodos M y N.

Según lo expuesto, la magnitud de esta polarización depende, por supuesto, de la fuente de corriente externa, y también de una serie de características del medio. Varía directamente con la concentración de mineral, pero debido a que es un fenómeno de superficie, su efecto será más intenso cuanto mayor sea el grado de división de la sustancia que lo origina.

Por ello, podríamos considerar que los yacimientos metálicos diseminados, por ejemplo, los yacimientos de cobre "porfídico", que presentan una gran superficie efectiva en sus partículas de mineral, son objetivos muy adecuados para su investigación mediante el método de P.I.

Parece ser a primera vista que los yacimientos masivos o continuos no producirían anomalías intensas de P.I. debido al pequeño número de superficies susceptibles de polarizarse, pero realmente la situación no es tan simple como ésta, ya que en muchos casos no ocurre así, muchas veces por la presencia de aureolas de mineralización diseminados y otras quizá porque lo que parece una bolsada más o menos homogénea está constituida en realidad por un gran número



de cristales limitados por caras susceptibles de polarización.

Además de esta consideración hay otras a tener en cuenta, y diremos que para un caso concreto dado la polarización decrece con el incremento de la porosidad de la roca, ya que en este caso se produce un aumento en el número de caminos alternativos para la conducción electrolítica. Por tanto, podríamos decir que se esperaría un mayor efecto de P.I. en un sulfuro diseminado que se encuentra en una roca ígnea densa que el que se encuentra en una roca de caja muy porosa.

La polarización varía también con el contenido en fluido de la roca; en muestras experimentales, se ha observado que se produce un máximo cuando alrededor del 75 % del espacio de los poros está lleno de agua (Bertin y Loeb, 1976)

Se continúa diciendo que los minerales que son conductores electrónicos muestran, polarización de electrodo. Entre ellos se incluyen la mayoría de los sulfuros (pirita, marcasita, galena, calcopirita, etc.), a excepción de la esfalerita, la blenda y el cinabrio (SZn, SHg), que no podrían ser detectados por este método a no ser conductores electrónicos o metálicos.

Existen otras sustancias que no son sulfuros, tienen brillo metálico y presentan el mismo efecto, entre ellas algunos óxidos como la magnetita, casiterita, pirolusita, hematites, y otras como el cobre nativo y, desafortunadamente, el grafito.

Concluyendo con este punto, podríamos en principio considerar que la presencia de una tensión residual de polarización indicaría la presencia de conductores electrónicos (minerales metálicos) dentro del volumen de terreno afectado por el paso de la corriente.

Sabemos, sin embargo, que las cosas no son tan sencillas, porque, como ya hemos expuesto, los fenómenos de polarización inducida se observan también, aunque en menor medida, en rocas carentes de sustancias metálicas.

También se aplica para la investigación de aguas subterráneas y para problemas de contaminación medioambiental.

2.4. - Técnica de medida de la polarización inducida en el dominio del tiempo.

Generalidades.

Partimos de la necesidad de contar con un dispositivo electródico adecuado que nos permitirá aplicar al terreno por los electrodos AB una intensidad de corriente durante un determinado periodo de tiempo, menor o mayor según se quiera reducir o no la duración de las investigaciones, durante el cual se determina el valor del potencial máximo (V_p) medido en MN. Transcurrido este intervalo se corta la corriente durante un tiempo similar, en el cual se mide el voltaje residual (V_r) entre ambos electrodos.

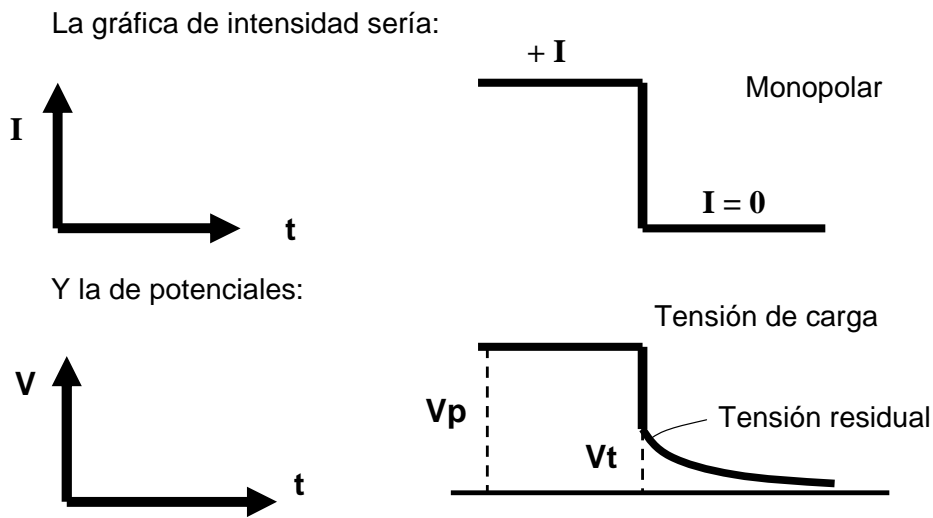


Figura 38. Gráfica de Intensidad y Potencial

El valor de P I. que obtuviéramos con estas medidas se consideraría tomado en “dominio de tiempo en régimen de impulsos aislados”.

Sin embargo, en la práctica, se aplica el método de dominio del tiempo en régimen de impulsos heteropolares, de forma que en el caso anterior, y tras el periodo sin corriente, se inyecta nuevamente la misma intensidad de corriente pero de signo opuesto (polaridad invertida) durante el mismo tiempo, y se mide nuevamente el potencial primario, produciendo un nuevo corte de corriente y determinando en este punto lo que sería un ciclo de medida.

El número de ciclos estudiados en cada estación dependerá de la respuesta del terreno, así como del tiempo previsto para la investigación.

La onda que emite el aparato transmisor es una onda cuadrada y cíclica, que tiene paso por cero.

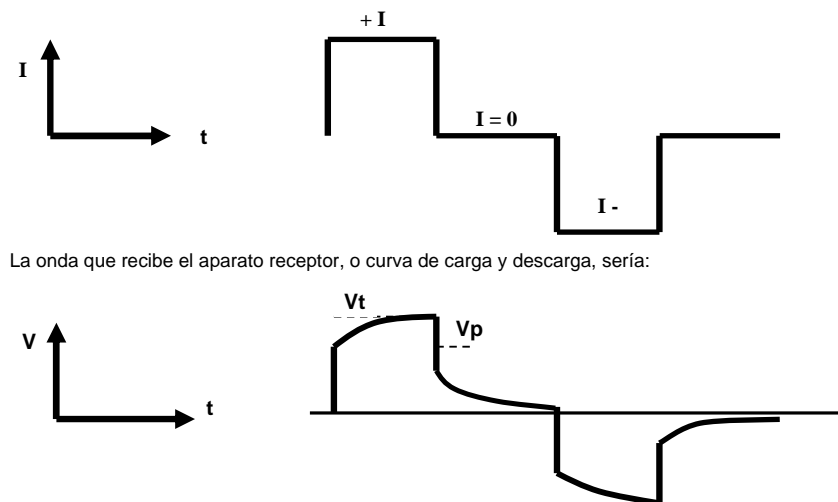


Figura 39. Onda que emite el aparato receptor



Para que el método pueda ser aplicado e interpretado adecuadamente en estudios de prospección geofísica necesitamos tener medidas cuantitativas de P.I.

Una medida sencilla, aunque quizás no demasiado intuitiva, sería el cociente entre la "tensión residual" $V(t)$ es decir, la registrada entre los electrodos M y N en el mismo momento en que se interrumpe la corriente- y la "tensión de carga" V_p , es decir, la medida entre los mismos electrodos una vez estabilizada y durante el periodo de inyección de corriente.

$$P.I. = \frac{V(t)}{V_p}$$

Si en el mismo instante de la interrupción de la corriente medimos V_t .

La tensión residual es pequeña y se expresa generalmente en milivoltios, mientras que la tensión normal se expresa en voltios; en consecuencia, el efecto de P.I. vendría dado en mV/V .

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ V}}$$

Debido al bajo valor que alcanza, esta relación suele expresarse en tantos por ciento, expresando las tensiones en la misma unidad:

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ mV}} \times 100$$

Esta relación porcentual es denominada por algunos autores como polarizabilidad (η).

$$P.I. = \frac{V(t) \text{ mV}}{V_p \text{ mV}} \times 100$$

Si el medio es homogéneo la relación es el verdadero valor de la polarizabilidad del medio estudiado (η verdadera). Si el medio es heterogéneo, que en realidad son las condiciones típicas o normales que se dan en el subsuelo, esta relación de tensiones dependería de la distribución en el subsuelo de rocas de distinta polarizabilidad y de la acción de electrodos, tipo de electrolito, temperatura, tamaño del poro, etc. Por analogía con la resistividad aparente, el parámetro obtenido se denominará polarizabilidad aparente (η_a).

Hasta ahora hemos considerado que $V(t)$ era medido en el preciso instante del corte de la corriente, pero en la práctica es casi imposible medir ese valor de tensión residual máxima por lo que ha de transcurrir un cierto tiempo antes de que ésta sea medida, es decir, lo será en un momento posterior en "t" segundos a la interrupción de la corriente.

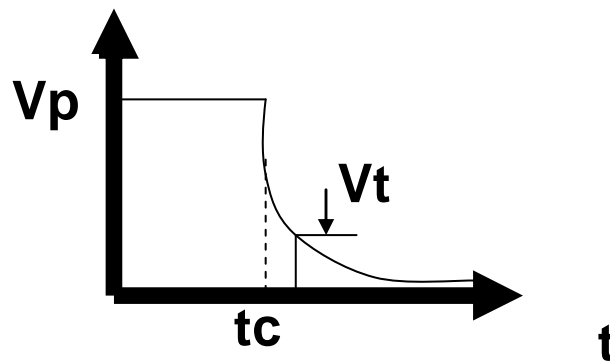


Figura 40. Momento en el que se realiza la medida

El momento del muestreo debe ser lo suficientemente retardado para que debido a las corrientes electromagnéticas secundarias inducidas en el terreno hayan desaparecido, pero también lo suficientemente inmediato para que la tensión residual $V(t)$ no haya caído por debajo de la sensibilidad del instrumento, o hasta el nivel de ruido.

Si en lugar de determinar la tensión residual $V(t)$ en un sólo instante se desea determinada durante un intervalo definido $\Delta t = t_2 - t_1$ es necesario registrar la curva de descarga durante ese intervalo. Se calcula el área comprendida entre esos dos límites de tiempo y la curva de descarga, que vendrá determinada por:

$$\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

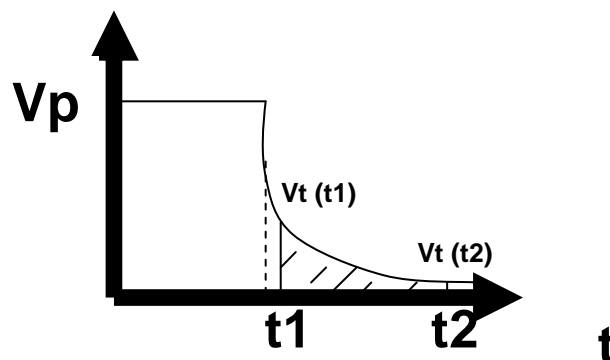


Figura 41. Curva de descarga durante un intervalo

El resultado de esta integral definida se expresa en milivoltios por segundo. Al dividir este resultado por la tensión normal V_p (voltios) se obtiene la medida de lo que denominamos cargabilidad:



$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_p} = \frac{1}{V_p} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

La cargabilidad tiene las dimensiones de un tiempo y se expresa en milisegundos.

Los parámetros que se han definido dependen, bien del intervalo transcurrido entre el corte de la corriente y la medida, bien del intervalo sobre el cual se ha realizado la integración, por lo que es necesario especificar los referidos datos de tiempo.

2.5. - Interpretación de los datos.

En la interpretación de los datos obtenidos en campo se pueden distinguir dos etapas: una primera o interpretación cualitativa y otra segunda o interpretación cuantitativa.

La interpretación cualitativa, que es la que normalmente se hace en P.I., consiste básicamente en búsqueda de anomalías mediante la observación de los perfiles y mapas obtenidos (correlacionando dichos datos con los mapas geológicos), es decir, la búsqueda de zonas donde el parámetro medido (cargabilidad aparente, P.E.F., F.M.) tome valores que superen dos o tres veces al menos al valor normal o de fondo observado en la zona que se investiga, entendiendo que este valor de fondo, corresponde al valor medio registrado en las zonas estériles.

Las anomalías detectadas en los diversos perfiles y situados éstos en un mismo plano de trabajo, se correlacionan, uniendo las que quedan enfrentadas en perfiles contiguos. La correlación permite seguir la marcha de la anomalía en la zona estudiada.

Lógicamente, se habrán seleccionado las anomalías más interesantes en función de su extensión, intensidad o incluso de contraste con la información suministrada por la aplicación de otros métodos geofísicos o geoquímicos que concretamente pueden ayudar mucho en la selección de anomalías (Bertin y Loeb, 1976).

Es conveniente, por otra parte, distinguir las anomalías verdaderas de las debidas a otros efectos (accidentes del terreno, líneas eléctricas con toma de tierra, líneas de ferrocarril, verjas, etc.). Además, habrá que valorar las deformaciones que puedan tener como consecuencia de diferentes factores que les afectan. Así, la conductividad del recubrimiento o la de las heterogeneidades situadas cerca del cuerpo anómalo actúan amortiguando los valores de polarización tanto más cuanto mayor es la conductividad; de esta forma, una anomalía de cargabilidad de poca intensidad en una zona con recubrimiento muy resistivo, podría ser mayor que otra que se manifiesta con mucha mayor intensidad en una zona muy conductiva.

La topografía del terreno sobre la que se realizan las medidas afecta a los valores de la resistividad, y también a los de polarización inducida, debido a que la posición relativa entre los electrodos y el cuerpo anómalo es diferente de la que correspondería a un terreno horizontal. Un



cuerpo anómalo situado a una determinada profundidad debajo del centro de un valle, y a la misma profundidad debajo del centro de una colina, produce efectos mayores de lo normal en este último caso, y menores en el primero.

La interpretación cuantitativa para llevarla a cabo es preciso establecer, basándose en datos interpretativos que represente adecuadamente al cuerpo anómalo. Se supone que este modelo tiene una forma, resistividad y cargabilidad determinadas, y que se encuentra encajado en un terreno cuya resistividad y cargabilidad también se suponen conocidas. (Partimos de un perfil de la anomalía que pase por un centro y sea perpendicular a su rumbo.)

2.6. - Valoración de método. Consideraciones finales

Partimos de la base de que éste, como todos los demás métodos de prospección geofísica, tiene sus limitaciones, sus ventajas y desventajas respecto a los demás; lógicamente, siempre en función del tipo de problema que haya que resolver.

Entre otros autores (Seigel 1959), entiende que el método tiene inconvenientes, como serían:

Un mayor coste económico para su aplicación e interpretación.

Imposibilidad de detectar zonas metalizadas de pequeño tamaño respecto de su profundidad.

No ser posible distinguir cuál es el mineral metálico que produce la anomalía, por lo que no podrían diferenciarse los susceptibles de ser explotados económicamente (SFe) de los que carecen de valor económico (grafito).

No diferencia las anomalías producidas por menas metálicas de las producidas por arcillas, arenas, talco, etc.

Pero, por otra parte, sabemos que todas estas limitaciones no son exclusivas del método de P.I., sino que las podemos encontrar en otros métodos geofísicos de prospección, sin dejar de ser por ello válidos (siempre que se apliquen en las condiciones y a las sustancias adecuadas).

No es un método completamente resolutivo, por lo que lo aconsejable es completar un estudio de P.I. con otro u otros métodos geofísicos que ayuden a disminuir la incertidumbre, inherente a la interpretación de los datos geofísicos (gravimétrico, magnético, electromagnético, geoquímico).

Y, por último, no olvidemos que la característica más atractiva de este método es la buena respuesta que proporcionan las mineralizaciones diseminadas, teniendo en cuenta que otros métodos no trabajan muy bien en estas circunstancias.



2.7.- Ejemplos de aplicación

2.7.1.- Realización de una prospección geofísica mediante tomografía eléctrica y polarización inducida en un vertedero en Sudáfrica.

La combinación de la Tomografía Eléctrica (resistividad) y la Polarización Inducida (cargabilidad) es una potente herramienta para la caracterización de vertederos, escombreras... etc.

La extensión de los residuos enterrados y las posibles filtraciones que pudieran estar ocurriendo son difíciles de determinar únicamente con las medidas de resistividad. Esto se debe a la semejanza en algunos casos de los valores de resistividad de los residuos con los valores naturales del subsuelo y de las filtraciones que pudieran estar produciéndose a través de una falla. Sin embargo, se ha comprobado que la Polarización Inducida es una técnica muy eficiente para delimitar la extensión que ocupan los residuos a causa de su alta cargabilidad. Por esta razón, la combinación de ambas técnicas nos permite delimitar perfectamente los residuos así como conocer la existencia de filtraciones.

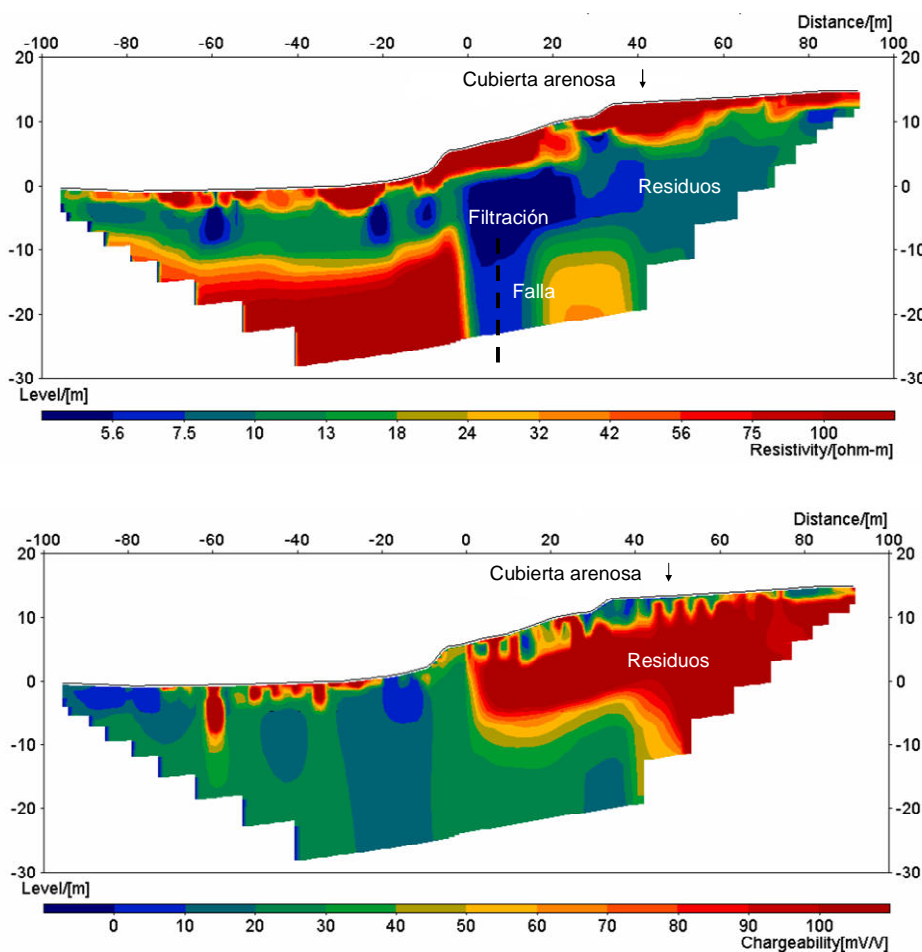


Figura 42. Ejemplo de Tomografía eléctrica - Polarización Inducida en un vertedero para la detección de filtraciones (Rosquist et al, 2003)



2.7.2.- Realización de una prospección geofísica mediante tomografía eléctrica y polarización inducida para el análisis del estado del núcleo impermeable del embalse de Beninar (Almería).

La detección de zonas arcillosas es una de las principales aplicaciones del sistema de Potencial inducido. En el caso de la naturaleza de los materiales empleados como tapiz impermeabilizante en la presa son filitas, el producto de alteración de los mismos es de naturaleza arcillosa. La detección de anomalías de potencial inducido, pueden ser relacionadas con fenómenos de degradación de la pantalla impermeabilizante lo que puede relacionarse a su vez con la posible presencia de fenómenos de filtración.

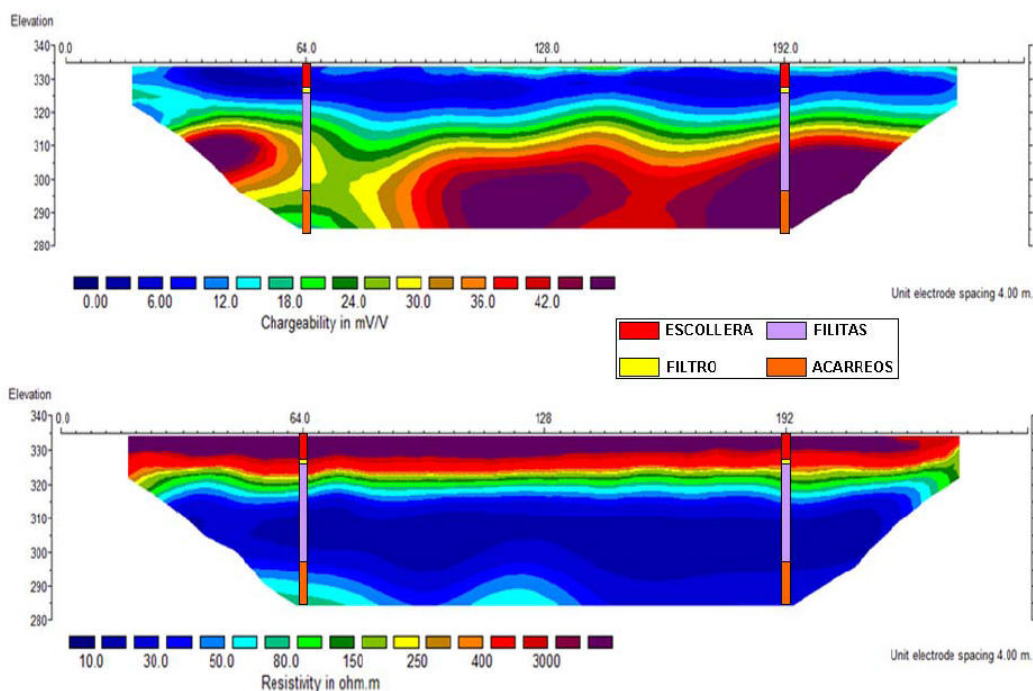


Figura 43. Perfil de Tomografía Eléctrica y Polarización Inducida realizados para la detección de zonas de alteración en el núcleo de la presa. Procesado con programa Res2dinv.

2.8. – Equipos empleados

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD: SYSCAL Pro



Imagen 6. Equipo Syscal-Pro diseñado por la empresa Iris Instrument



OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter) Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- Switch version output voltage: up to 800 V

INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M Ω
- Input voltage: Max. channel 1: 15 V Max. channel 2 to channel 10: 15 V Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement: Precision: 0.2 % typical Resolution: 1 μ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg

Convertidor 1200 W AC DC

Este equipo es un complemento del Syscal Pro para dotarle de una mayor potencia necesaria para los estudios de Polarización Inducida (cargabilidad).



Imagen 7. 1200 W AC DC converter diseñado por la empresa Iris Instruments



3.- MISE A LA MASSE (PUESTA A MASA) O POTENCIAL INDUCIDO

El método “mise-a-la-masse”o potencial inducido es un dispositivo que usa la masa conductora enterrada como uno de los electrodos de corriente. En minería, la masa conductora es un cuerpo mineral que se accede a él mediante una perforación, en geotecnia, el objeto de investigación podría ser una tubería de metal abandonada, en hidrogeología una masa de agua ...

El segundo electrodo es colocado a una gran distancia (5 o 10 veces la masa que esta siendo investigada). La distribución del potencial de estos dos electrodos de corriente refleja la geometría de la masa conductora y algo de información sobre la forma y extensión del cuerpo (Parasnis, 1973).

3.1.-Principio del método

Las técnicas geofísicas que aquí se describen son técnicas geoelectricas que caracterizan eléctricamente una masa conductora a través de la distribución del potencial eléctrico, V , cuya expresión simplificada viene dada por:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (V)$$

Siendo ésta la expresión que da el valor del potencial, V , en un punto cualquiera de un semi-espacio homogéneo e isótropo de resistividad, situado a una distancia r de una electrodo de corriente que introduce en el terreno una corriente I (Ward, 1990). En un medio ideal, como el descrito, se generarán superficies equipotenciales semi-esféricas al electrodo de corriente, siendo perpendiculares a las líneas de corriente. Esta variable es la preferida en este tipo de aplicaciones (Frangos, 1994).

Aunque hay otras ocasiones en las que el parámetro obtenido podrá ser la diferencia de potencial o el gradiente del potencial, ΔV , cuyo valor decrece exponencialmente conforme nos alejamos del electrodo de corriente, siendo su expresión, también para un medio homogéneo e isótropo, la siguiente:

$$\Delta V = -\frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r^2} \quad (V/m)$$

Para este proyecto se ha aplicado el método de pseudosección de puesta masa cuyo principio esta basado en que si aumentamos las distancia entre el MN (electrodos de potencial) medimos equipotenciales más profundas. De esta forma, realizando la totalidad de combinaciones posibles de MN podemos obtener una pseudosección que nos indique la dirección del cuerpo cargado en profundidad.



3.2.- Parámetros de los Levantamientos

Medición del potencial absoluto (V) o de la diferencia de potencial (DV).

El potencial normalizado se obtiene del potencial observado y de la corriente inyectada.

3.3.- Aplicaciones en Exploración Minera

Busca definir la extensión de una zona mineralizada conductiva previamente ubicada en un afloramiento o que ha sido interceptada por taladros.

Determina la proyección en superficie, rumbo, buzamiento e inmersión de una zona conductiva.

Ubicación de cuerpos secundarios mineralizados.

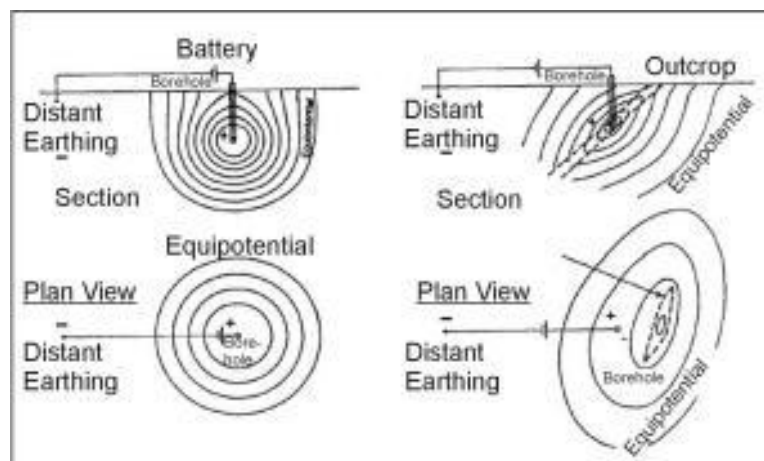


Figura 44. Ubicación de cuerpos secundarios mineralizados (Parasnis, 1973)

3.4.- Aplicaciones en embalses y vertederos

La corriente eléctrica se hace pasar entre dos electrodos de corriente, uno de los cuales está situado fuera de la geomembrana, electrodo A, pero en contacto con el terreno próximo a la estructura de almacenamiento, y el otro, electrodo B, se sitúa en el interior del embalse de agua; en el caso de vertederos se situará dentro de los residuos o dentro de una capa de arena humedecida que se dispone inmediatamente sobre la geomembrana. Para la detección de anomalías de potencial eléctrico se pueden adoptar dos sistemas de medida: uno que emplea una pareja móvil de electrodos de potencial, denominados M y N, unidos a un potenciómetro y que nos dará diferencias de potencial, V/m , y el otro sistema que emplea un único electrodo móvil de potencial, situando el segundo electrodo de potencial de forma fija en el exterior, simulando que está en el infinito ($V_{\infty} = 0$), con lo cual se estarán obteniendo medidas de potencial V en el electrodo móvil de potencial.

A continuación se representan, de forma esquemática, los diferentes dispositivos implantados para el caso de un vertedero (Caso 1) y para el caso de un embalse de agua (Caso 2).

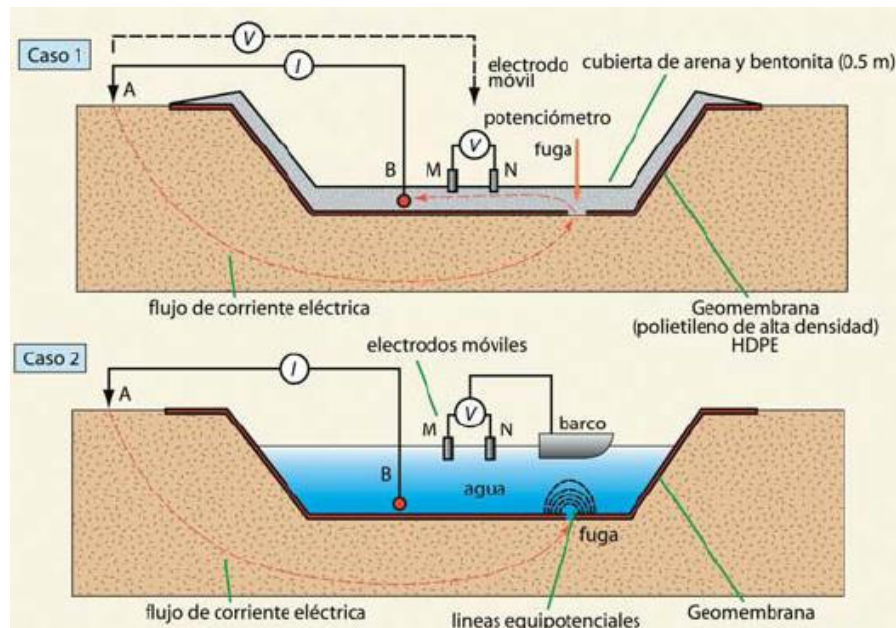


Figura 45. Tipos de dispositivos electródicos empleados en embalses y vertederos (Martínez-Pagán, 2004)

En ambos casos se puede emplear cualquiera de los dos sistemas descrito anteriormente: pareja móvil de electrodos de potencial o un único electrodo móvil de potencial.

Las anomalías eléctricas debidas a la presencia de fugas en la geomembrana se van a producir al permitirle a la corriente eléctrica penetrar a través de ella. En la siguiente figura se representa un perfil típico ideal que se obtendría de medir la diferencia de potencial, ΔV , sobre un embalse de agua el cual presenta una fuga. Se observa que sobre la posición de dicha fuga, presenta un valor del gradiente igual a bajo flanqueado por un máximo y un mínimo (Mazàc et al., 1990).

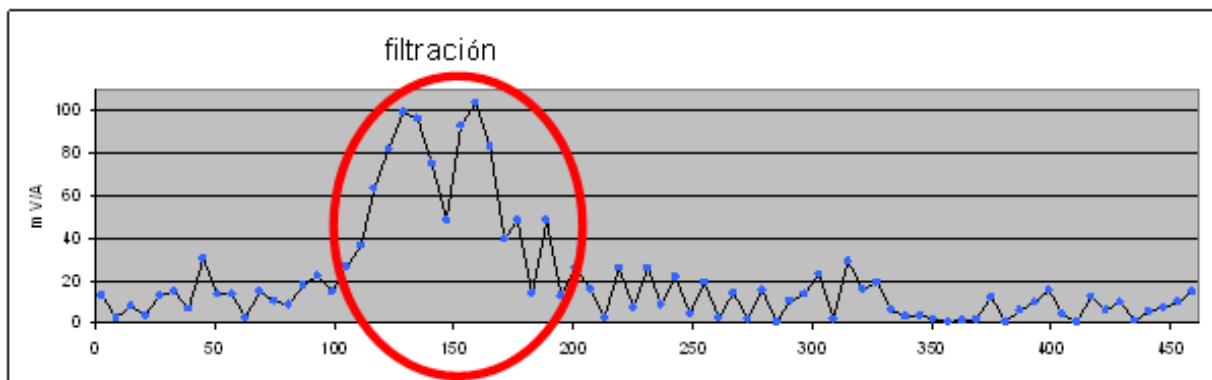


Figura 46. Ejemplo de perfil realizado en el Embalse de Beninar (Almería) con la técnica misse a la mase

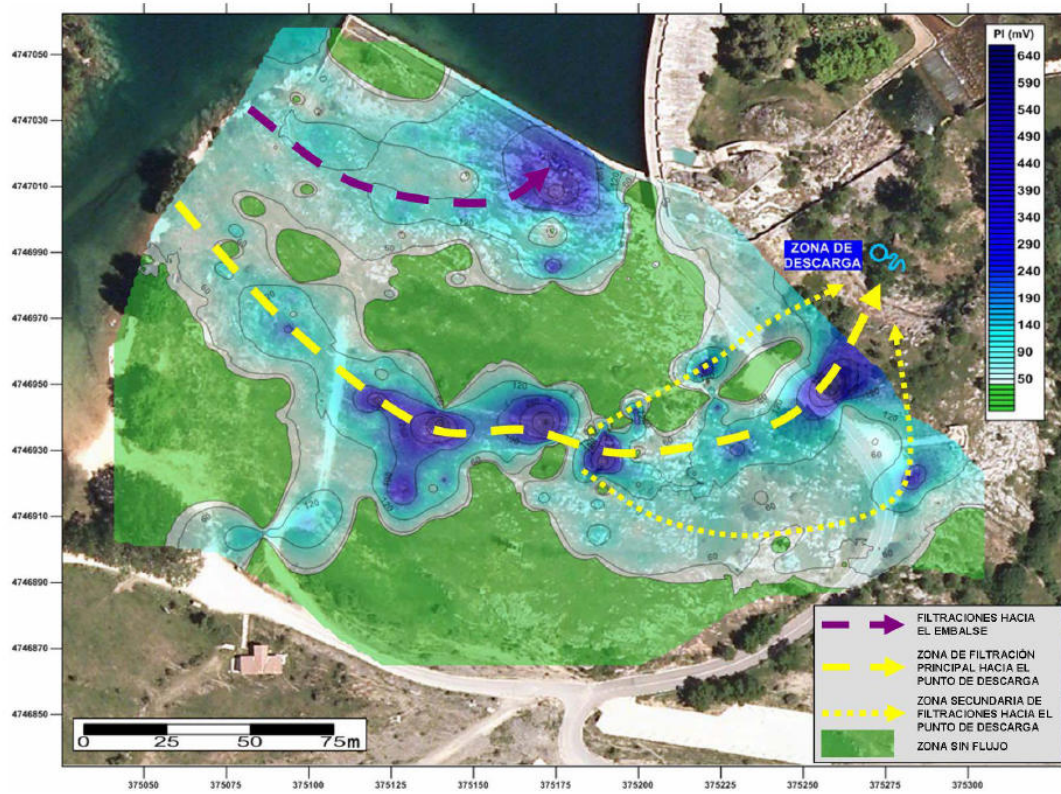


Figura 47. Ejemplo de planta realizada con la técnica misse a la mase y programa Surfer. Presa de Cervera (Palencia)



4.- MÉTODO DEL CAMPO ELÉCTRICO NATURAL (POTENCIAL ESPONTANEO)

4.1- Introducción

El fenómeno de potencial espontáneo (PE o SP) fue descubierto por Robert Fox en 1815. El método del campo eléctrico natural [abreviadamente método PE] está basado en la observación de los campos eléctricos creados por las fuerzas electromotrices naturales de procedencia electroquímica, de filtración y difusión.

Campo electroquímico. Las fuerzas electromotrices de naturaleza electroquímica se observan en el medio geológico, en los casos en que en las rocas del medio que poseen conductancia iónica existen acumulaciones de minerales buenos conductores con conductancia electrónica, tales como piritita, calcopiritita, bornita, petlandita, arsenopiritita, magnetita y otros. El cuerpo mineral junto con las rocas circundantes forma un elemento galvánico natural. El mecanismo de su origen e influencia, resultado de las leyes electroquímicas, se puede presentar del modo siguiente.

En la superficie de un conductor electrónico, colocado en un medio de conducción iónica, es decir, en el límite de las fases de conductancia de distinta naturaleza, se crea una capa eléctrica binaria. La misma se forma debido al paso de los cationes metálicos de la red cristalina a la solución, o a la precipitación de los cationes sobre la superficie del conductor, o a la adsorción selectiva de los iones de una fase de la superficie por la otra fase. Esta capa se caracteriza por un salto del potencial, cuya magnitud y signo dependen de los factores determinantes del potencial: propiedades, composición y estado del conductor en el medio circundante, los cuales participan en el proceso de formación de la capa eléctrica binaria. Por consiguiente, el conductor electrónico, en relación al medio circundante, adquiere un potencial que se denomina potencial de electrodo.

Los factores básicos determinantes del potencial son: a) la composición química de las aguas subterráneas que circulan en las rocas encajantes e impregnan el cuerpo mineral; b) la composición mineral y las características texto-estructurales del cuerpo mineral (Iakubovskiy Liajov, 1980).

La influencia de estos factores se manifiesta en su dependencia de las condiciones físico-geológicas tales como resistividad de las rocas y minerales, velocidad de circulación de las aguas subterráneas e interacción de las mismas con las rocas y minerales, a causa de lo cual cambia la composición de las aguas en primer lugar y su grado de oxidación y contenido de iones de sulfuro de hidrógeno y de hierro.

Si el valor y signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria permanece constante en toda la superficie del conductor, entonces este cerrará uniformemente la superficie polarizada, no creándose en el medio circundante un campo eléctrico. Las condiciones necesarias para que surja un campo en el medio externo es la diferencia de valor o signo del salto de potencial de la



capa eléctrica binaria en las diversas zonas de la superficie polarizada.

En un medio geológico el valor del salto de potencial en las diferentes partes de la superficie polarizada normalmente es diferente (Iakubovskiy Liajov, 1980). Para los yacimientos minerales polarizantes, ello significa que los factores determinantes del potencial deben ser diferentes para las distintas partes del cuerpo mineral. Esto puede ser consecuencia de la presencia bien de una zonalidad en la distribución de los minerales en el yacimiento, bien de la variación de composición química de las aguas subterráneas. En las condiciones geológicas tiene más importancia la segunda causa, que a su vez está relacionada con la disminución del contenido de oxígeno con la profundidad.

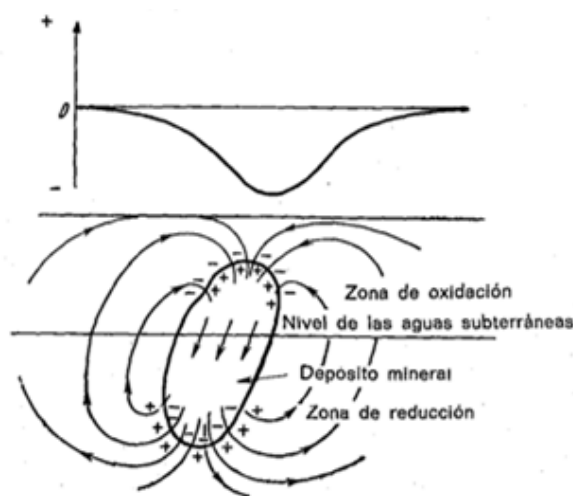


Figura 48. Esquema del nacimiento de un campo natural sobre un depósito mineral (Iakubovskii y Liajov, 1980)

La influencia conjunta de todos los factores enumerados lleva a que en las condiciones naturales, la magnitud del salto de potencial de la capa eléctrica binaria crezca con la profundidad. De esta forma, un depósito mineral junto con sus rocas encajantes forma un elemento galvánico en el cual el cátodo se sitúa en la parte superior del yacimiento y el ánodo en la inferior. El circuito interno del elemento es el mismo cuerpo mineral y el externo, el paquete de rocas encajantes. Dado que las rocas y en especial el cuerpo mineral poseen buena conductancia eléctrica, entre los electrodos del elemento galvánico así creado comienza a circular la corriente. Los portadores en el circuito interno serán los electrones libres y en el externo, los iones.

Se sabe que la corriente en el circuito externo de un elemento galvánico depende de la f.e.m del elemento y de la resistencia total del circuito. La resistencia total se compone de las resistencias de las partes interna y externa del circuito. Para un depósito mineral polarizado, esto significa que el campo en su entorno será tanto más intenso cuanto más se diferencien los valores del salto de potencial en las distintas partes del depósito y cuanto menos sea su resistencia interna. La resistencia interna de la pila natural considerada, depende de la resistividad del mineral y también de las reacciones electroquímicas que se producen en el contacto del cuerpo mineral y de las soluciones que lo impregnan, si por este contacto circula la corriente eléctrica. Los productos de estas reacciones, al acumularse en las zonas anódica y catódica, conducen al aumento de la resistencia interna de la pila natural y con ello a la disminución del campo



eléctrico en el medio exterior. En Electroquímica este fenómeno se denomina polarización del elemento galvánico (no hay que confundir este concepto con la polarización de los cuerpos minerales, como resultado de la cual surge un campo eléctrico natural). En relación con esto, la condición indispensable para la permanencia de la acción de cualquier elemento galvánico, entre ellos también los naturales, es su despolarización o sea la destrucción o separación de los productos de las reacciones electroquímicas.

Como despolarizantes de primer orden se tiene el oxígeno que procede del aire, junto con las aguas subterráneas y los iones de hierro, contenidos en las mismas aguas. También tiene un gran valor para la despolarización la disolución y transporte por las aguas subterráneas de los productos de las reacciones electroquímicas.

Puesto que algunos de los factores enumerados (por ejemplo, el régimen de las aguas subterráneas) disminuyen con el tiempo, entonces también variará el campo natural que depende de ellos. Sin embargo, estas variaciones ocurren muy lentamente. Observaciones repetidas del campo natural sobre algunos lentejones de piritas del Ural y Cáucaso, realizadas durante varios años, han demostrado que en dicho tiempo el campo no varía prácticamente (Iakubovskiy Liajov, 1980).

La intensidad de los campos naturales observados sobre cuerpos sulfurados en diferentes yacimientos, oscila entre amplios límites, desde algunas decenas hasta varias centenas de milivoltios.

También se señalan campos eléctricos naturales sobre capas de antracita, grafito, pizarras carboníferas y rocas grafitizadas las cuales también presentan conductancia electrónica. Sin embargo, en medio iónico las mismas se comportan como electrodos inertes, pues tienen una red cristalina sólida y no ceden cationes al medio iónico. El origen de los campos eléctricos está relacionado en este caso con la formación de una capa eléctrica binaria por adsorción por el grafito o la antracita de los iones de las aguas subterráneas. La anomalía negativa observada en tal caso alcanza a menudo cientos de milivoltios.

Campos de filtración. También surgen campos eléctricos naturales por la filtración de las aguas subterráneas en las rocas porosas (Corwin y Hoover, 1979). Prácticamente estos campos existen en todas partes, porque los procesos de filtración ocurren universalmente. Pero normalmente las fuerzas electromotrices de filtración son insignificantes y el campo eléctrico relacionado con ellas es débil. Sólo en casos aislados, por ejemplo, en la salida bajo los aluviones de agua a presión de manantiales subterráneos, por drenaje intenso de aguas subterráneas en terrenos accidentados, filtraciones en obras hidráulicas..., los campos eléctricos procedentes de la filtración se intensifican hasta tal punto que la observación sobre ellos permite resolver algunos problemas hidrogeológicos y geotécnicos.

Imagínese un capilar, por el que debido a la diferencia de presión hidrostática a la entrada y salida, en la dirección indicada, pasa un electrolito. A causa de la adsorción por las paredes del capilar de los iones del mismo signo (normalmente de aniones, que tienen mayor radio iónico), en el límite entre la solución y la pared de materia sólida se forma una capa eléctrica binaria, la externa (fija) cuyo revestimiento consiste en iones negativos adsorbidos y la interna (positiva)



que a su vez consta de dos partes: una fija relacionada con la atracción electrostática del revestimiento negativo y otra móvil, distribuida por difusión según la sección transversal del capilar.

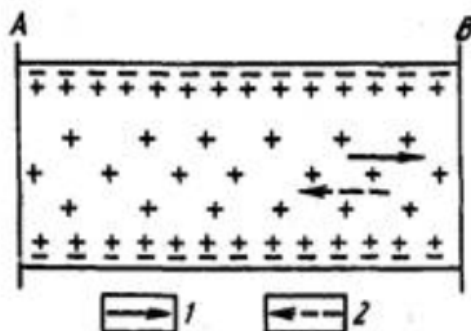


Figura 49. Capa eléctrica binaria en un capilar. Direcciones: 1) marcha del líquido; 2) de la corriente eléctrica (Iakubovskii y Liajov, 1980)

Como consecuencia, del capilar se extraen más iones positivos que negativos y por ello en la salida del capilar se acumulan cargas positivas y a la entrada surge el exceso relativo de cargas negativas. Entre el final B y principio A del capilar, surgen diferencias de potencial proporcionales a la caída de presión hidrostática y que dependen también de las constantes eléctricas del líquido. Su valor puede ser calculado por la fórmula:

$$\Delta U = \zeta \epsilon \rho p / 4 \pi \eta,$$

Siendo ζ la diferencia de potencial en la capa binaria del revestimiento; ϵ la constante dieléctrica del líquido; p la diferencia de presión entre los extremos del capilar; ρ la resistividad del líquido, y η la viscosidad del líquido.

La diferencia de potencial entre los extremos del capilar produce una corriente eléctrica dirigida contra la corriente del líquido y que impide la acumulación de las cargas en el extremo del capilar.

Los poros de las rocas se pueden considerar como sistemas complejos de capilares, en cada uno de los cuales se producen procesos análogos a los descritos. Para las soluciones de filtración, a través de los poros de las capas, la diferencia de potencial electrocinética que se produce en cada capilar considerado aisladamente, se integra en un campo eléctrico general que abarca tanto al acuífero como a las capas circundantes (Iakubovskiy Liajov, 1980). Puesto que las rocas poseen una conductancia variable, bajo la influencia del campo eléctrico en las zonas de circulación de las aguas subterráneas, surgen corrientes eléctricas.

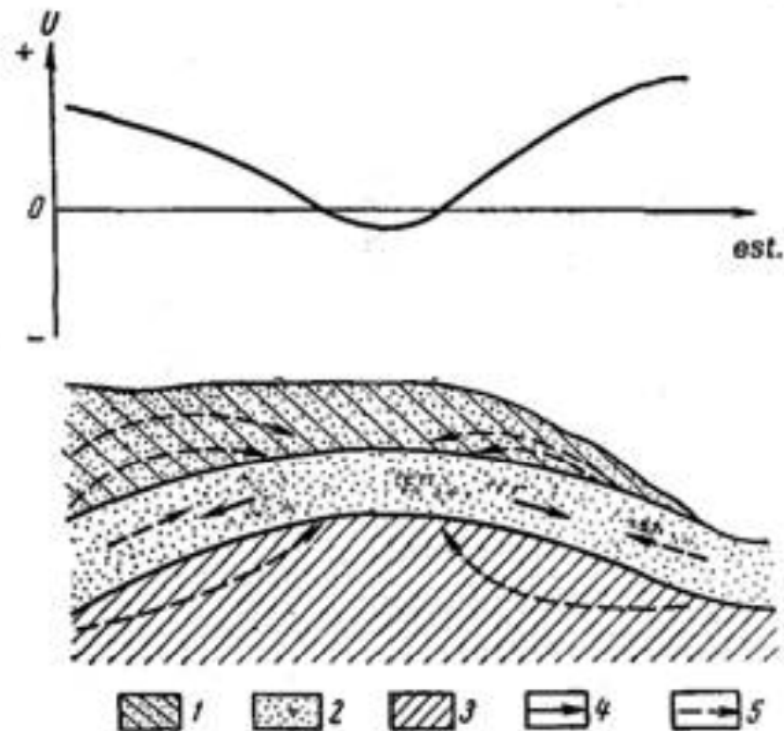


Figura 50. Corrientes de filtración en una capa acuífera. 1) arenas arcillosas; 2) arenas; 3) arcillas; 4) dirección de la filtración; 5) líneas de corriente (Iakubovskii y Liajov, 1980)

En esta figura se tiene de modo esquemático la distribución de las corrientes en una capa acuífera filtrante y su entorno.

Campo de difusión. También se crea un campo natural como resultado de los procesos de difusión, que se producen en los contactos de las rocas que contienen en sus poros soluciones de una misma sal con diferentes concentraciones o soluciones de diferentes sales. En el primer caso, a causa de que la movilidad de los iones de distinto signo es diferente en el electrolito, en el proceso de nivelación de las concentraciones los iones de mayor movilidad adelantan a los de menor movilidad y a un lado del contacto se produce la acumulación de iones principalmente del mismo signo y en el otro de signo contrario. En el segundo caso, en el proceso de difusión también se produce la separación de los iones de mayor movilidad de los de menor movilidad y la acumulación correspondiente de cargas contrarias a cada lado del límite de contacto de las soluciones. Una nueva distribución de los iones lleva también a la creación de un campo eléctrico. La diferencia de potencial que surge por difusión, puede expresarse por la fórmula

$$\Delta U = \frac{u-v}{u+v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_2}{C_1},$$

Siendo u y v la movilidad de los cationes y aniones; R la constante de los gases; T la temperatura absoluta; F el número de Faraday; C_1 y C_2 las concentraciones de las soluciones; n la valencia de los iones.



Los campos eléctricos de difusión no presentan demasiado interés para los métodos de campo de la exploración eléctrica, porque sólo pueden observarse claramente en la práctica, con el estudio de los sondeos mecánicos mediante métodos de testificación eléctrica.

Campos variables en el tiempo. Algunos investigadores (A. S. Semenov, 1948 y otros) han descubierto campos con variaciones claras en el tiempo. Estos campos tienen un ciclo diario con máximo en las primeras horas de la mañana y mínimo en la segunda mitad del día. La amplitud de la variación diaria alcanza 200-300 mV, pudiendo cambiar el signo del potencial. Se ha establecido una relación entre los campos y la temperatura del suelo; al aumentar la temperatura baja el potencial; el gradiente de potencial con la temperatura alcanza decenas de milivoltios por 1°.

Los campos variables en el tiempo se observan en terrenos abiertos donde el espesor del suelo no excede de 10 a 20 cm y falta la vegetación. Se ha establecido la relación entre las áreas anómalas con la presencia de cuarcitas y con zonas de cuarcificación y de otras rocas de alteración hidrotermal. A la inversa, no se aprecian tales campos sobre rocas arenó-arcillosas y muy saturadas. Esta asociación de los campos variables en el tiempo, da pie para utilizarlos en la cartografía geológica y para la localización de zonas de cuarcificación y de rocas de alteración hidrotermal.

4.2. - Equipo para el levantamiento del campo natural.

En la figura siguiente se tiene el dispositivo de medición para el trabajo por el método del campo natural. Consta de un instrumento de medida multímetro M, tomas de tierra de medición M y N y los cables que los unen. Como tomas de tierra se emplean electrodos de construcción especial, denominados impolarizables. Normalmente en este caso no se emplean los electrodos metálicos a causa de su gran polarización.

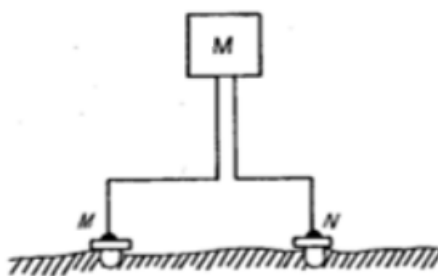


Figura 51. Esquema básico del dispositivo de medición pan el levantamiento del campo (Iakubovskii y Liajov, 1980)

Si la observación de los campos eléctricos naturales la realizáramos con electrodos metálicos, la diferencia de potencial del campo natural se perturbaría en su valor a causa de los potenciales de electrodos. Esta magnitud a menudo es del mismo orden que las diferencias de potencial del campo natural observadas y también cambia de una medición a otra.

La aplicación del compensador de polarización para anular estas interferencias no es



posible en principio, ya que la polarización se superpone a la diferencia de potencial del campo natural medida, y no es posible separarlas en el dispositivo de medición. En relación con esto, la eliminación de la polarización de los electrodos en el resultado de la medición del campo natural se realiza por otros medios, que son la aplicación de los electrodos impolarizables. La construcción de los mismos está basada en que el contacto de la varilla metálica del electrodo con el terreno se realiza no directamente, sino a través de una solución salina del mismo metal de que está hecho el electrodo, al tiempo que la concentración de la solución en ambos electrodos del dispositivo de medición se mantiene igual. Gracias a esto el potencial de electrodo permanece constante durante la medición y de valor análogo en ambos electrodos. En este caso la polarización total de ambos electrodos, como diferencia de sus potenciales de electrodo, será próxima a cero y lo que es más importante, siempre constante en el tiempo. En cuanto a la f.e.m. de difusión que surge al contacto de la solución salina con las soluciones del terreno, es insignificante y no tiene una gran influencia en la medición.

En la práctica de la exploración eléctrica la mayor aplicación la tienen los electrodos impolarizables de cobre y de plomo.

En las figuras de a continuación se tienen los detalles constructivos y aspecto exterior del electrodo impolarizable.

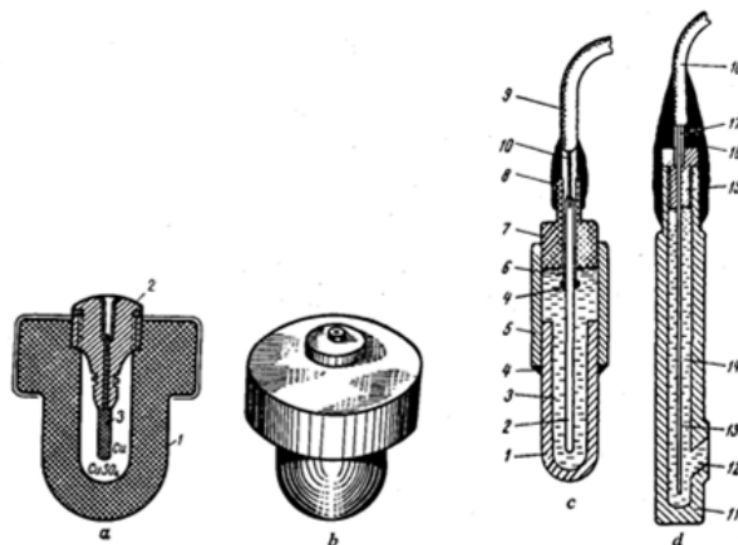


Figura 52. Electrodos impolarizables. a) en corte (1) cuerpo. 2) tapón de plástico. 3) varilla de cobre), b) aspecto exterior. Electrodo de pozo en corte: c) electrodo de vaso cerámico poroso (1) vaso. 2) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 3) solución de CuSO_4 , o KCl en gelatina. 4) masilla o resina epoxi. 5) tubo de vidrio. 6) tubo de vinilo. 7) tapón de plástico, 8) goma virgen. 9) cable. 10) conductor del cable; d) electrodo de canal 11) vaso. 12) canal. 13) varilla de cobre o de cloruro de plomo. 14) solución de CuSO_4 , o KCl en gelatina. 15) tapón de plástico. 16) goma virgen. 17) conductor del cable. 18) cable (Iakubovskii y Liajov, 1980)

El cuerpo del electrodo es hecho de cerámica porosa y está esmaltado por su parte superior. En el cuerpo hay atornillado un tapón 2 de cerámica esmaltada o plástico, dentro del cual se tiene una abertura para una varilla de cobre 3 con un clavijero en la parte superior para conectar el electrodo con el circuito de medición. La varilla de cobre se hace de cobre electrolítico y se asegura en el tapón con ayuda de masilla químicamente inerte. La cavidad interna del electrodo se llena con una solución saturada de sulfato de cobre.



La polarización de los electrodos durante el trabajo varía algo debido a la introducción dentro del electrodo de iones de las soluciones del suelo. En tal caso, los electrodos se lavan cuidadosamente con agua destilada y se llenan de solución nueva de sulfato de cobre.

4.3.- Metodología y técnica de los trabajos de campo

Los puntos de observación para el levantamiento de los campos naturales se disponen normalmente a intervalos determinados a lo largo de un sistema de perfiles paralelos. Solo a veces se realiza la investigación del campo mediante itinerarios sueltos. La red de observaciones se prepara antes del comienzo del levantamiento.

El levantamiento del campo natural consiste en la medición, en una secuencia determinada, de las diferencias de potencial entre los puntos de observación. Dando un cierto valor condicional al potencial en el punto inicial, por los valores medidos de ΔU , se calcula el potencial en todos los restantes puntos y se obtiene un cuadro de la distribución del potencial a lo largo de los diversos perfiles y en toda la zona del levantamiento.

Trabajos de campo. Las observaciones del campo natural se pueden realizar por dos métodos: por levantamiento de gradientes y por levantamiento de potencial. En condiciones industriales, básicamente se emplea el levantamiento de potencial. El levantamiento de gradientes se emplea solo en el caso de fuertes interferencias por corrientes vagabundas, para trabajos en itinerarios y en levantamientos de detalle. En nuestro caso, se utilizó el método por levantamiento de potencial debido a la necesidad de referir todos los datos a una misma base para poder comparar cuantitativamente los valores de potencial medidos. Gracias a este método se pueden localizar filtraciones, catalogarlas de más a menos importantes, e incluso con datos suficientes cuantificarlas.

Diariamente, antes de la salida a los trabajos de campo, de entre los electrodos impolarizables disponibles se elige el par que presenta menos polarización. Para ello, los electrodos, por parejas y con distintas combinaciones, se colocan uno junto a otro en hoyos en terreno húmedo; a continuación y repetidamente se mide el valor de la polarización permutando los electrodos. Se puede también realizar la medición dejando los electrodos en un recipiente común con sulfato de cobre. De los pares medidos se eligen aquellos en que la polarización no excede de 5 mV.

En el proceso de las mediciones de campo, para los electrodos de las tomas de tierra, se cavan junto a los jalones, con una paleta pequeña (de zapador), hoyos de 5 a 8 cm de profundidad. Se sitúa cada electrodo en un hoyo y se le echa tierra, pero de forma que toque solo la base del vaso poroso. Hay que procurar también que la cabeza del electrodo no toque la vegetación. Durante el trabajo, la temperatura de los electrodos debe ser en lo posible la misma, por tanto de ello se deduce que hay que protegerlos de los rayos directos del sol; durante las pausas de trabajo se deben colocar en un hoyo común y unirlos con conductores.

Si el levantamiento se realiza en suelo seco entonces, a causa de la mayor resistencia de la toma de tierra y por consiguiente menor sensibilidad de la línea de medición, dichas mediciones se hacen inexactas. En este caso hay que regar previamente el terreno junto a los jalones, en el



punto de disposición del electrodo, con agua o con una solución débil de sulfato de cobre. El riego se debe realizar al menos una hora antes del comienzo del trabajo, para que la f.e.m. de filtración que surge por la penetración en el suelo del agua o solución, no altere los resultados de la medición.

Al final del día los electrodos se lavan de la tierra adherida a los mismos, se les añade sulfato de cobre, se colocan en un recipiente con solución de sulfato de cobre o en terreno húmedo regado con sulfato de cobre y se unen entre sí con un conductor. En las pausas largas en el trabajo (más de 4 a 5 días) y para preservar los vasos de la posibilidad de rajarse, se lavan en agua limpia y se conservan en ella 24 horas, después de lo cual se ponen a secar.

Método de levantamiento del potencial. Para el trabajo por este método, las mediciones se realizan desplazando solamente el electrodo delantero conectado al borne M del potenciómetro o autocompensador. El segundo electrodo se conecta al borne N y se deja fijo en un punto. Desplazando el electrodo M sucesivamente a todos los puntos de observación, se mide cada vez la diferencia de potencial entre los electrodos fijo y móvil. Si el potencial del punto de parada del electrodo fijo se supone cero, entonces las diferencias de potencial medidas corresponderán a los potenciales en los puntos de observación respecto al punto de parada del electrodo N (punto de cero). Esto permite aumentar considerablemente el rendimiento de las observaciones y también simplificar el tratamiento de las mismas. Solamente hay que recordar que para el trabajo por este método, la polarización entra en la diferencia de potencial medida siempre con el mismo signo, debido a lo cual es necesario en el levantamiento observar con esmero la permanencia de los electrodos y el valor de su polarización. La variación del valor de la polarización durante el trabajo no debe exceder de 5mV en 1 km de perfil.

El esquema de montaje del dispositivo para el levantamiento por este método, se tiene en la figura a continuación en el apartado I.

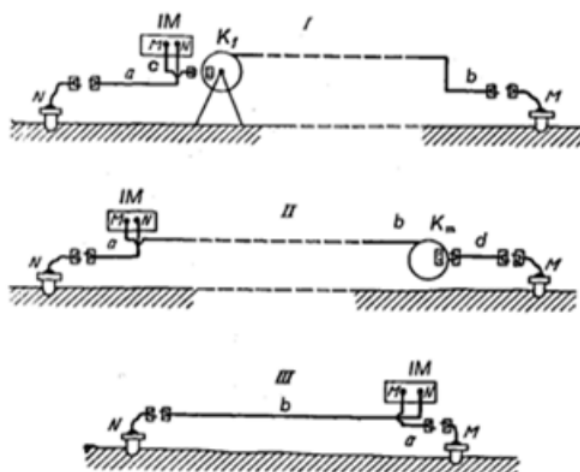


Figura 53. Esquema de montaje del dispositivo para la investigación del campo natural. Métodos: I) de potenciales, con carrete Kt, fijo. II) de potenciales, con carrete Km móvil. III) de gradientes; IM) instrumento de medición (Iakubovskii y Liajov, 1980)



El autocompensador (o potenciómetro) permanece durante la medición junto al punto cero y unido al electrodo fijo N mediante el conductor a. El conductor b se enrolla en el carrete fijo K, situado junto al instrumento en un caballete y que tiene una longitud suficiente para que con una estación del instrumento se pueda efectuar la medición en todo el perfil. Este carrete está unido al instrumento por un cable c.

Si se tienen cables más ligeros se puede emplear un dispositivo con carrete móvil Km que se lleva con el electrodo M. El carrete se une al electrodo con un conductor d y se desplaza junto con el mismo. Para ello se emplea un carrete portátil.

4.4. -Representación de los resultados de las observaciones

Los resultados del levantamiento de los campos naturales se representan en forma de mapas de líneas equipotenciales, de gráficas de potencial y de mapas de gráficas de potencial.

Para La confección de mapas de líneas equipotenciales del campo natural, se llevan a un programa de interpolación obteniendo así las líneas equipotenciales. La densidad de las líneas equipotenciales depende de la intensidad del campo observado. Es deseable que las isolíneas reflejen lo más claramente posible las particularidades de la distribución del potencial en la zona del levantamiento.

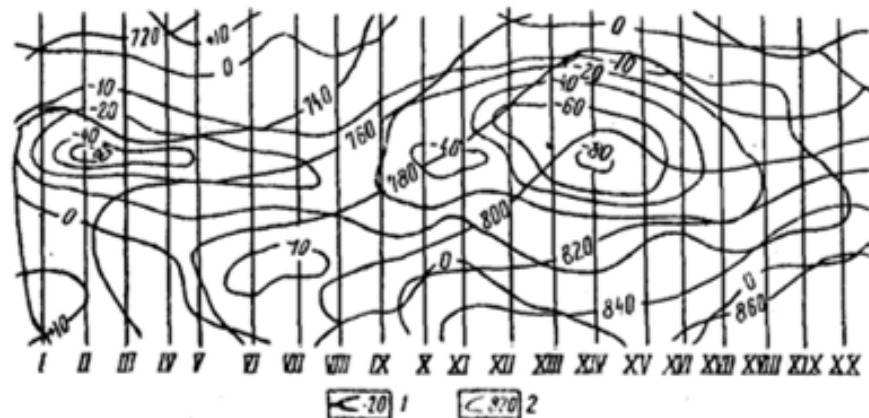


Figura 54. Mapa de líneas equipotenciales del campo natural en un yacimiento sulfurado. 1) Isolíneas de campo natural; 2) Curvas de nivel; I a XX curvas de nivel (Iakubovskii y Liajov, 1980)

Para la confección de la gráfica de potenciales, sobre el eje de abscisas se sitúan los puntos de observación y en el de ordenadas se trazan los valores del potencial en los puntos correspondientes.

La gráfica se dibuja en forma de línea quebrada. Debajo de ella se traza el relieve del terreno y el corte geológico y se representan los datos de la interpretación subsiguiente a las observaciones geofísicas.



Para una comparación más cómoda de los datos de los diferentes perfiles, se confeccionan mapas de gráficas. Para ello se llevan a un plano todos los perfiles y a lo largo de cada perfil, en el plano, se construyen las gráficas de potencial. Como líneas de los perfiles en el plano sirven los ejes de abscisas de gráficas.

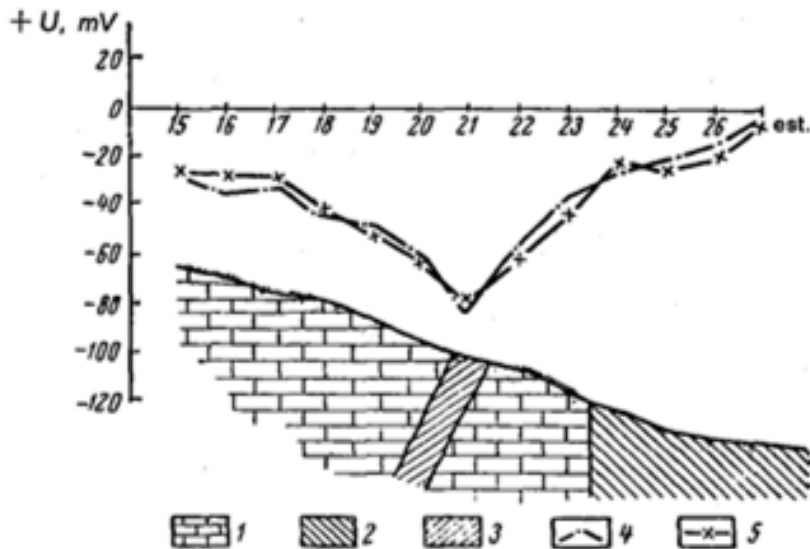


Figura 55. Gráfica del potencial del campo natural sobre un filón polimetálico. 1) calizas; 2) esquistos 3) filón potimetalico; gráficas: 4) de las observaciones principales; 5) de las observaciones repetidas (Iakubovskii y Liajov, 1980)

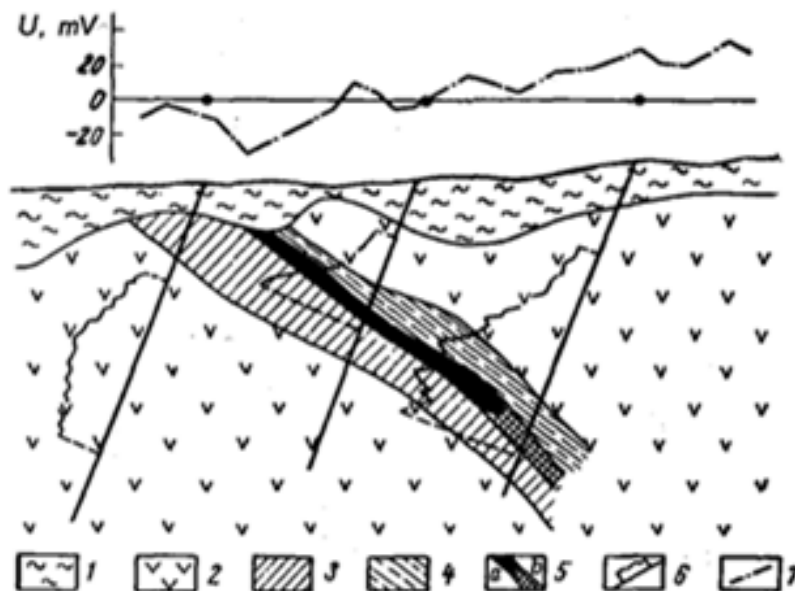


Figura 56. Mapa de gráficas de potencial en un yacimiento de calcopirita 1) sedimentos cuaternarios y corteza de erosión; 2) porfiritas; 3) jaspes; 4) esquistos cuarzosericíticos y clorocíticos; 5) menas de calcopirita a) ricas, b) pobres; gráficas de potencial: 6) en sondeos, 7) a lo largo de la línea de investigación (datos del levantamiento superficial) (Iakubovskii y Liajov, 1980)



4.5. - Bases de la Interpretación

La etapa final en el estudio del campo natural es la interpretación de los mapas y gráficas de potencial obtenidos.

Por las áreas de valores mínimos del potencial, en los mapas de líneas equipotenciales y de gráficas de potencial, se puede establecer de modo aproximado la situación del objeto proyectado. La ausencia en el mapa de áreas de valores máximos del potencial contiguas a las áreas del potencial mínimo, es síntoma de un cuerpo polarizado vertical mente, lo que es frecuente encontrar en la práctica.

La forma de las líneas de potencial permite hacerse una idea del contorno del cuerpo. En el caso de que las isolíneas sean poco alargadas, el cuerpo es un yacimiento más o menos isométrico en planta, y el centro de las isolíneas muestra la posición del epicentro de dicho yacimiento. En caso de isolíneas muy alargadas, el eje del área de potencial mínimo define la posición del eje del cuerpo.

Si el objeto prospectado presenta una polarización oblicua, entonces en el mapa de líneas equipotenciales, cerca del área del potencial mínimo, habrá un área de valores elevados del potencial y las gráficas del potencial en los perfiles serán asimétricas.

Para una interpretación cuantitativa de los resultados del levantamiento, los objetos alargados se pueden asimilar, en función de los datos geológicos, bien a un cilindro (si se trata de un yacimiento lenticular) o bien a una capa (si se trata de un yacimiento filoniano). Es evidente que la extensión de tal cuerpo en la dirección horizontal será bastante menor que la longitud del área anómala del mapa de líneas equipotenciales.

4.6. - Aplicación del Método

Los objetos más favorables para su investigación son los cuerpos constituidos por minerales sulfurados conductores, grafito y antracita y que yacen en un medio hidrogeológico favorable para el nacimiento de campos eléctricos naturales. El método puede ser empleado también para detectar objetos que no se polarizan pero que están asociados a otros que sí lo hacen (por ejemplo con rocas grafitizadas o piritizadas), las cuales por si mismas no presentan interés para su prospección e investigación.

A una mayor efectividad del método contribuye una conductividad eléctrica alta de los minerales. Factores desfavorables son una situación profunda del nivel acuífero y un desarrollo amplio de la zona de minerales oxidados (la denominada montera).

Se pueden señalar tres direcciones básicas en la aplicación del método del campo natural: a) cartografía geológica; b) prospección de yacimientos de minerales industriales; c) búsqueda de filtraciones.

En la cartografía geológica, el método permite observar áreas de rocas grafitizadas, carbónitizadas y chungitizadas y localizar zonas de rocas piritizadas y pirroninizadas y también



las que contienen magnetita. La cartografía de tales terrenos y zonas permite, no sólo detectar la distribución superficial de los correspondientes sedimentos y formaciones, en aquellos casos en que existe una relación genética de las mismas con los procesos de grafitización o piritización de las rocas, sino determinar también las áreas de posible interés en relación con yacimientos polimetálicos y sulfurados. En particular la piritización es el resultado de procesos hidrotermales y neumatolíticos con los que están relacionados los yacimientos de oro, molibdeno, wolframio y otros de metales raros y no férricos.

El método se utiliza ampliamente en yacimientos de minerales de calcopirita y de yacimientos sulfurados de níquel. Encuentra también aplicación en los yacimientos de casiterita, así como en yacimientos de algunos metales raros, en los casos en que la masa mineral contiene como minerales acompañantes piritita, pirrotina y otros sulfuros buenos conductores.

El empleo de las anomalías de P.E. para la cartografía litológica y estructural de las rocas recubiertas constituye un aspecto algo descuidado de la prospección geofísica (Parasnis, 1971) dijo que el, y que no cabe duda de que la interpretación cuidadosa de tales anomalías puede dar abundante información acerca de fisuras someras, fallas, zonas de rotura, etc.

Un objetivo más difícil para la aplicación del método del campo natural son los yacimientos polimetálicos. Esto se puede explicar porque los minerales de galena-esfarelita tienen una resistividad propia mucho mayor que la de otros sulfuros, lo que lleva a una considerable atenuación del campo eléctrico.

A esto se une el que los minerales secundarios de plomo y cinc (sulfato y óxidos) formados por reacciones electroquímicas, poseen una solubilidad escasa y al permanecer en el lugar de formación, obstaculizan la polarización de los minerales primarios. En virtud de estas circunstancias, en la mayoría de los casos, sobre los yacimientos de minerales polimetálicos se observan solamente anomalías débiles. Sin embargo, la presencia en los cuerpos polimetálicos, a título de impurezas, de sulfuros de hierro y cobre favorece el desarrollo de campos más intensos.

El método también encuentra aplicación en la prospección de yacimientos de grafito y antracita

Un área de utilización del método del campo natural es el estudio de los procesos de filtración de las aguas subterráneas. La observación de los campos eléctricos naturales procedentes de la filtración permite determinar la dirección del movimiento de las corrientes subterráneas, revelar los puntos de filtración de las aguas en las obras hidráulicas, descubrir zonas de circulación de aguas en fisuras y su salida bajo los aluviones. A título de ejemplo, en la figura siguiente se tiene la gráfica del potencial del campo natural sobre una cavidad cárstica, por la que tiene lugar la alimentación de las aguas de sedimentos aluviales.

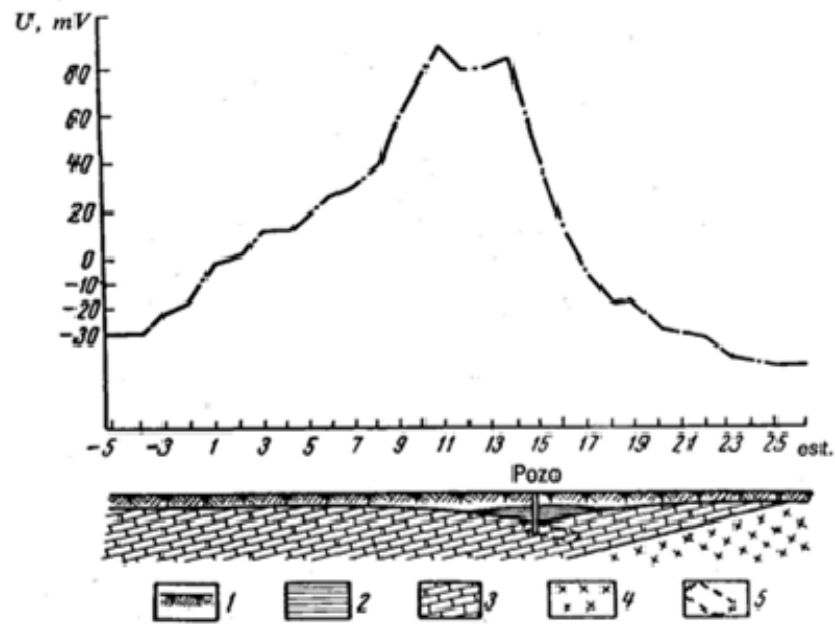


Figura 57. Gráfica del potencial del campo natural sobre el afloramiento de un manantial cubierto por aluviones (según N. Severianov). 1) aluviones; 2) aluviones antiguos; 3) calizas; 4) tobas de rocas eruptivas; 5) cavidad cárstica (Iakubovskii y Liajov, 1980)

4.7.- Medidas de potencial como indicadores de deformación

Cuando sometemos un material a un esfuerzo de deformación de tipo compresivo, se producen una serie de respuestas anómalas en el potencial espontáneo que pueden indicarnos el estado del material. El sistema de potencial espontáneo permite caracterizar los fenómenos de compresión y/o fracturación del medio físico.

La respuesta del potencial espontáneo durante este tipo de eventos está bien documentada (Jouniaux y Pozzi, 1995; Lorne, B., F. Perrier, and J. P. Avouac, 1999; Yoshida, 2001; Eccles, D., P.R. Sammonds, and O.C. Clint, 2005) tanto en pruebas de laboratorio como en estudios en campo.

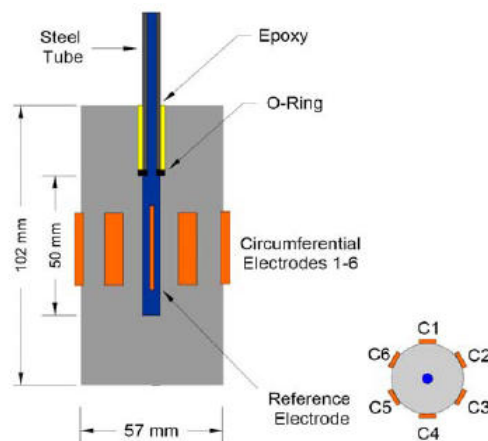


Figura 58. Esquema de la configuración de los electrodos de registro del Potencial Espontáneo en ensayos triaxiales. (J. R. Moore, 2005)



Si tomamos una muestra de material inalterado y la sometemos a un esfuerzo constante de tipo compresivo mediante un ensayo de tipo triaxial y registramos las variaciones de potencial espontáneo, podemos ver como se producen las siguientes variaciones a lo largo del tiempo (figura 59):

- El incremento en los valores de potencial es constante y poco importante hasta alcanzar el 75 % de la deformación plástica del material.
- Cuando se supera el 75 % de la deformación plástica y hasta el comienzo de la rotura frágil, se observa la mayor variación en los valores de potencial espontáneo. Esta fase incluye los primeros instantes de la rotura frágil, en la que la muestra no está totalmente fracturada
- Tras la rotura de la muestra, los valores de potencial espontáneo sufren un brusco descenso alcanzando rápidamente los valores de la muestra antes del inicio del ensayo.

La aplicación a zonas de deslizamientos radica en la posibilidad de localizar zonas del mismo que están sufriendo procesos deformacionales de tipo compresivo, las cuales vendrán definidas por anomalías de potencial de tipo positivo, así como zonas fracturadas y/o relajadas, caracterizadas por anomalías de potencial de tipo negativo. Además, las zonas de fracturación funcionan como sectores de alteración y filtración preferentes que hacen disminuir complementariamente los valores de potencial espontáneo.

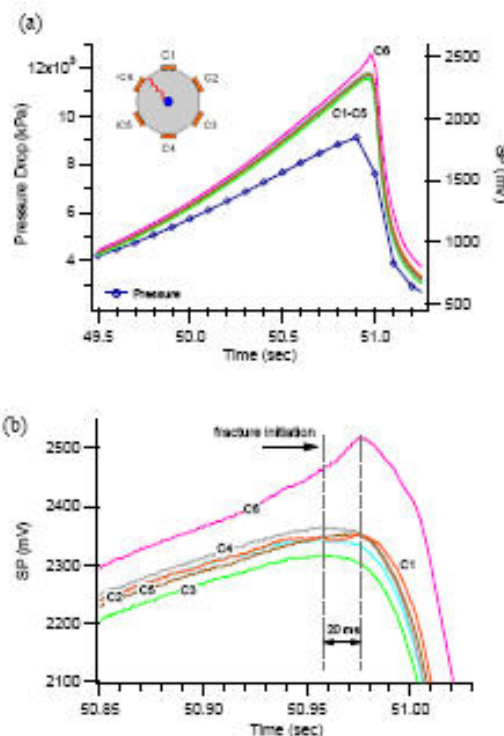


Figura 59. Ensayos de deformación triaxiales. A) Relación entre la presión aplicada y el potencial registrado en cada electrodo en función del tiempo. B) Variación del Potencial registrado a lo largo de la prueba. Nótese el descenso en los valores de potencial registrados tras la fracturación del material. (J. R. Moore, 2005)



4.8.- Ejemplos de Aplicación

4.8.1.- Detección de zonas de filtración en el lecho del embalse de Beninar

El reconocimiento de la zona inundada del embalse mediante el sistema de Potencial Espontáneo tiene como objetivo fundamental, la localización de zonas relacionables con posibles fenómenos de filtración. En este caso se investigó un embalse que poseía tapices impermeabilizantes en gran parte del lecho del mismo que no estaban funcionando correctamente permitiendo la existencia de numerosas filtraciones.

El estudio de los fenómenos de filtración, es una de las principales aplicaciones de este sistema de investigación geofísica, ya que el flujo de agua a través del subsuelo genera fuertes alteraciones en los valores del Potencial Espontáneo natural del terreno.

Los resultados obtenidos muestran una serie de anomalías de potencial caracterizadas por presentar valores negativos de potencial las cuales se relacionan con la presencia de fenómenos de filtración. Del total de anomalías detectadas, las más claras son las situadas en el sector norte (figura 60) del embalse. Dichas anomalías se caracterizan por presentar fuertes gradientes de variación de los valores de potencial así como valores negativos del mismo. Este hecho, unido a la no presencia de tapices impermeabilizantes, las sitúa como zonas claras a investigar mediante perfiles de Tomografía Eléctrica y Potencial Inducido.

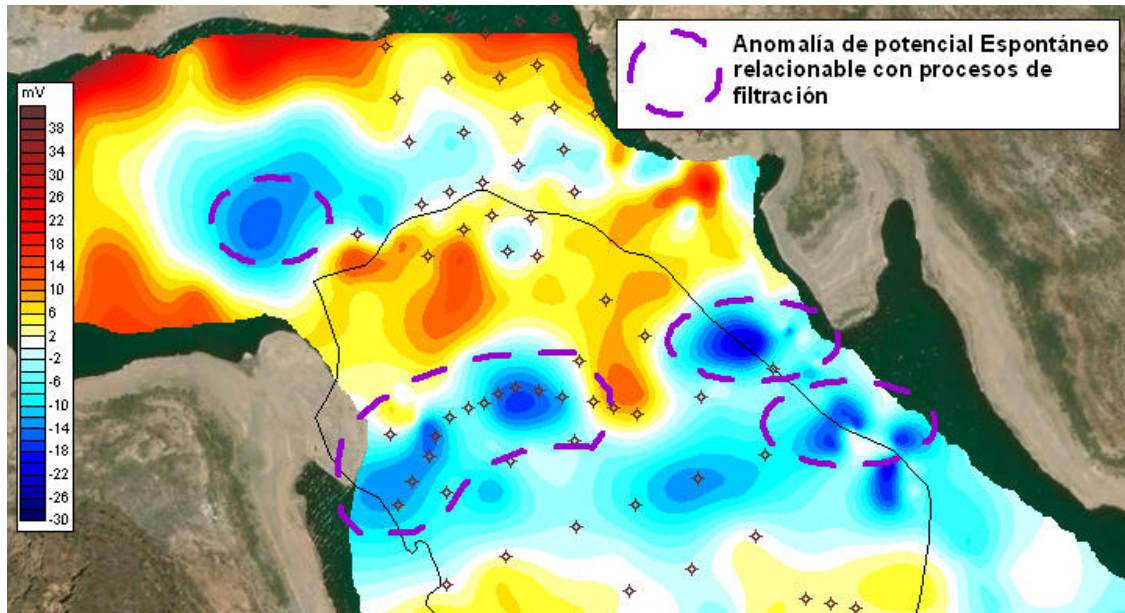


Figura 60. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los cambios en el signo del potencial. Tratamiento de datos con Software Surfer

El análisis visual de los datos (figura 61) muestra con claridad una concordancia total en los resultados de P.E., P.I. y T.E.. Si analizamos los obtenidos por cada uno de los sistemas de investigación de forma individual vemos como:



- En el caso de los valores de P.E., se aprecia una clara anomalía asociada a posibles fenómenos de filtración entre los metros 220 y 300, la cual presenta un fuerte gradiente de variación en los valores y presenta un mínimo de -15 mV.
- La gráfica correspondiente al P.I. muestra un incremento notable en los valores del potencial sobrepasando entre los metros 260 y 330 los 10 mV/A.
- En el caso del corte geoelectrico, se localiza con claridad la presencia de un cuerpo subhorizontal resistivo, de naturaleza probablemente carbonatada bajo una capa conductora que parece corresponderse con la existencia de filitas. El cuerpo carbonatado someriza en las inmediaciones del metro 260 del perfil, viéndose interrumpido lateralmente de forma abrupta. Esta interrupción parece corresponderse con una importante fractura que hunde el bloque carbonatado en la parte final del perfil. Cabe destacar como entre los metros 240 y 300, y por encima de los materiales carbonatados no se obtienen valores de resistividad correspondientes a filitas homogéneas de carácter impermeable (resistividades < 80 Ohm·m), sino más bien, a filitas alteradas o materiales aluvio-coluviales permeables (resistividades > 100 Ohm·m).

El análisis conjunto muestra como entre los metros 250 y 300 del perfil, coinciden las anomalías indicadoras de fenómenos de filtración en una zona donde los carbonatos no parecen estar cubiertos por materiales impermeables, lo cual, ante escenarios de llenado, se posibilita la filtración del agua del pantano.

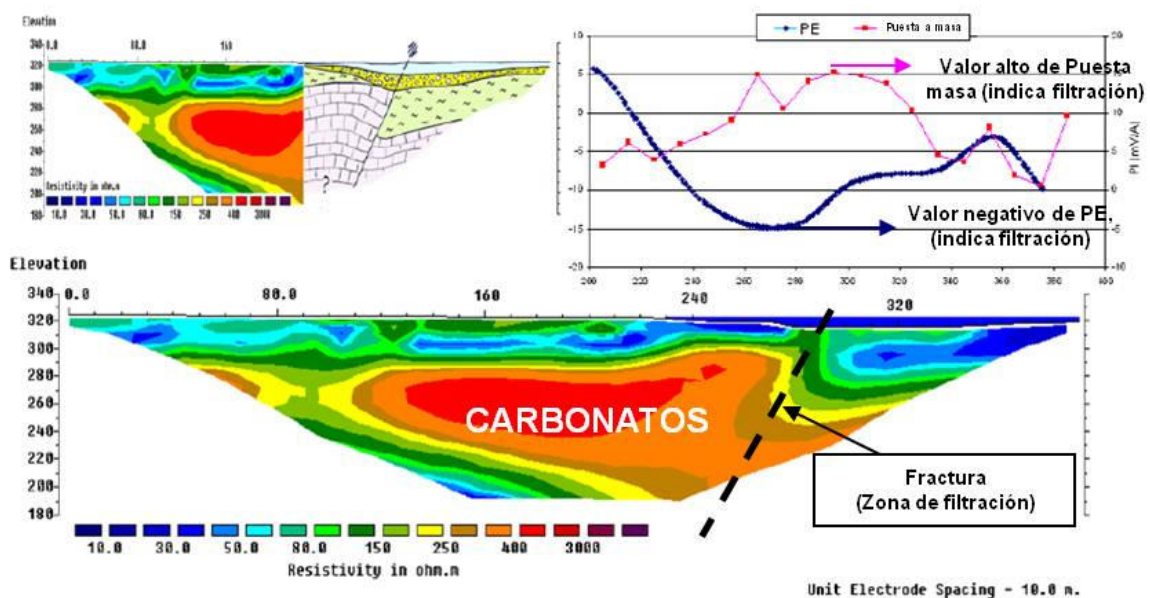


Figura 61. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica. Superior derecha. Variación del PE y PI. Inferior: perfil de Tomografía Eléctrica. Superior Izquierda. Interpretación geológica del tramo del perfil de Tomografía Eléctrica que discurre bajo la lámina de embalse (esquina superior derecha)



4.8.2.- Detección de zonas de filtración en el Canal de Monegros (Torralba de Aragón, Huesca)

Esta campaña de investigación geofísica se realizó para la detección de filtraciones existentes en una sección del Canal de Monegros situada al norte de la localidad oscense de Torralba de Monegros. EL canal de Monegros forma parte de un conjunto de infraestructuras que permiten el riego de más de 100.000 ha en la Cuenca del Ebro. El canal está realizado sobre el terreno y revestido por una losa de hormigón de unos 40 cm de espesor

La presencia de filtraciones en infraestructuras de almacenamiento y transporte hidráulico son un fenómeno común. Dichos fenómenos constituyen un problema ya generan la pérdida de recursos regulados así como potenciales problemas que pueden poner en riesgo la estabilidad de la estructura. En este caso, durante uno de los reconocimientos del canal que se realizan de manera periódica por parte del personal de servicio, se descubrió una serie de grietas y hundimiento parcial de la vía de servicio que discurre por el canal en su margen izquierda, así como un colapso en las inmediaciones de los daños aparecidos en la infraestructura.



Imagen 8. Panorámica de la zona de estudio situada en la margen izquierda del Canal de Monegros. Se pueden visualizar el canal (izda), la carretera de servicio que se hundió y donde aparecieron grietas y el hundimiento aparecido en las inmediaciones de la carretera, así como la zona de cultivos que se vieron anegados

Los objetivos de la investigación ha sido determinar posibles zonas de filtración en el canal dentro de la sección de estudio a través de los materiales del subsuelo.

Para alcanzar dichos objetivos se ha empleado el método de prospección geofísicas de potencial espontáneo el cual ha permitido delimitar las posibles vías de filtración desde el canal.

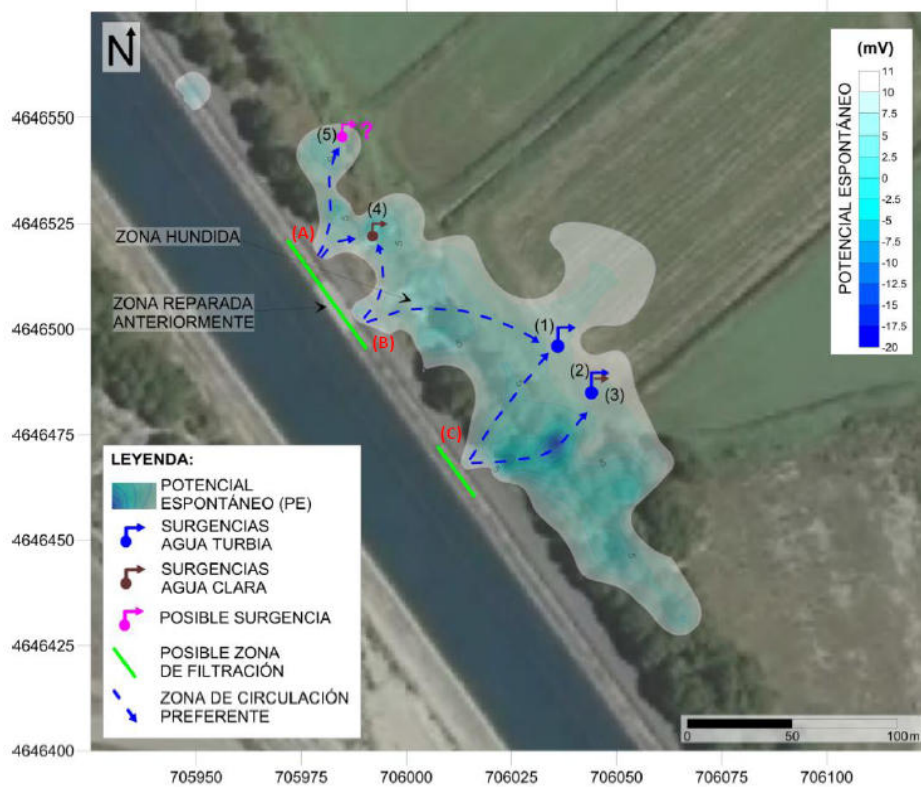


Figura 62. Plano de anomalías de PE e interpretación de las mismas en relación con las surgencias de la zona. Tratamiento de datos con Software Surfer

En la figura 62 se han representado una serie de flechas azules de trama discontinua que representan las posibles zonas de circulación preferente en el subsuelo, de acuerdo a la morfología de la anomalía de potencial espontáneo obtenida en la zona de estudio.

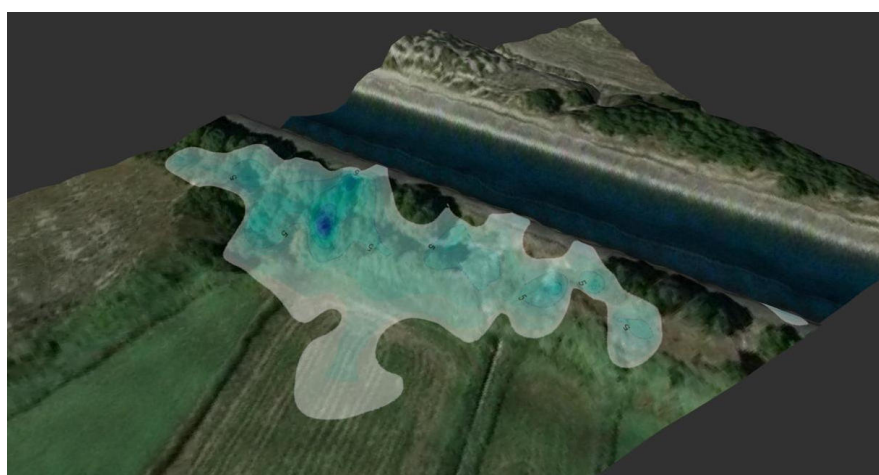


Figura 63. Plano de Anomalías de PE sobre ortofoto y MDT

La figura 63 muestra las anomalías de PE sobre un modelo digital del terreno en la que se ha superpuesto la ortofoto del terreno.



5.- SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (SEDT)

5.1.- Introducción

El método del Sondeo Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (en adelante SEDT; en inglés Time Domain Electromagnetics (TDEM)) constituye una herramienta geofísica capaz de proporcionar información muy detallada de la distribución de resistividades del subsuelo, determinando sus variaciones tanto lateral como verticalmente. Desde el comienzo de su aplicación, ha demostrado su utilidad en investigaciones en el campo de la hidrogeología (Rhoades et al., 1976; Danielsen, 2003), minería, contaminación ambiental subterránea, arqueología y en general, en la localización de estructuras y anomalías complejas, tanto geológicas como antrópicas.

El sistema SEDT se clasifica dentro de los sistemas de investigación electromagnéticos de fuente artificial.

5.2.- Principios Físicos del SEDT

La realización de un SEDT consiste en inyectar una corriente constante en un bucle o bobina transmisora (Tx) generando un campo magnético primario⁴ constante. Cuando se interrumpe de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (Tx) el campo magnético primario deja de ser constante y disminuye su valor en el tiempo hasta hacerse cero (Sheriff, 1989). De acuerdo con la ley de Faraday, cuando un cuerpo es expuesto a un campo magnético variable en el tiempo, se producen una serie de inducciones electromagnéticas de corrientes eléctrica en el subsuelo (figura 64). Estas corrientes, fluyen en trayectorias cerradas por el subsuelo, migrando en profundidad y lateralmente disminuyendo su intensidad a lo largo del tiempo generando a su vez un campo magnético secundario transitorio decreciente en la superficie (McNeill; 1980b).

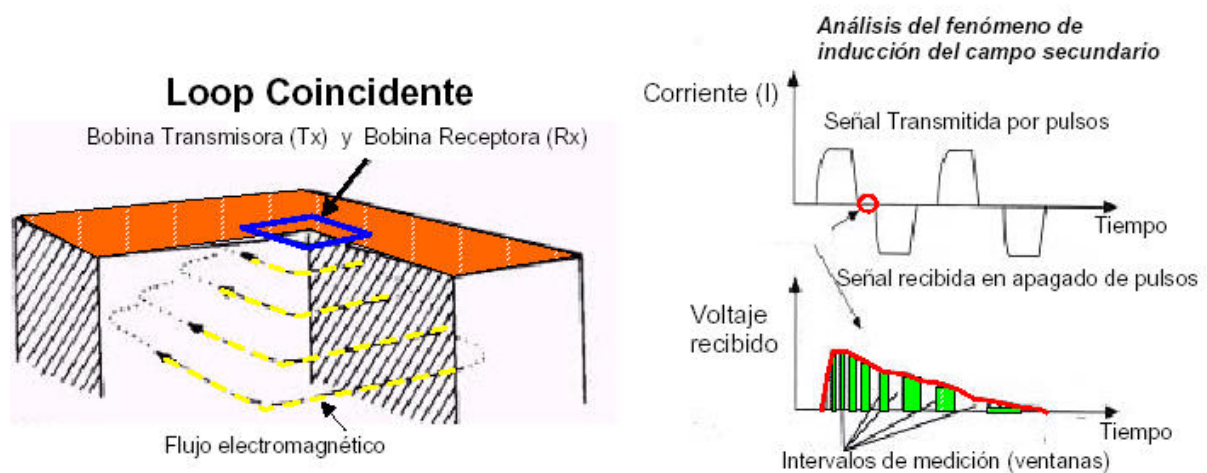


Figura 64. Dispositivo general de un sondeo electromagnético (Navarro Luna, 2006)

⁴ Siempre que existe una corriente eléctrica circulando por un bucle o espira se produce un campo electromagnético.



Este campo secundario induce un voltaje variable en tiempo en el bucle receptor (R_x). La forma en que decae el voltaje contiene información sobre la resistividad del subsuelo puesto que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas depende de la resistividad del medio. El carácter migratorio en profundidad, es decir, los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad de las capas superficiales mientras que los tiempos largos permiten determinar la resistividad de las capas emplazadas a mayor profundidad (Sheriff, 1989).

De forma detallada, el proceso de un SEDT es el siguiente:

1. Se hace circular una corriente por el bucle transmisor (T_x) el cual crea un campo magnético primario, variable en el tiempo.

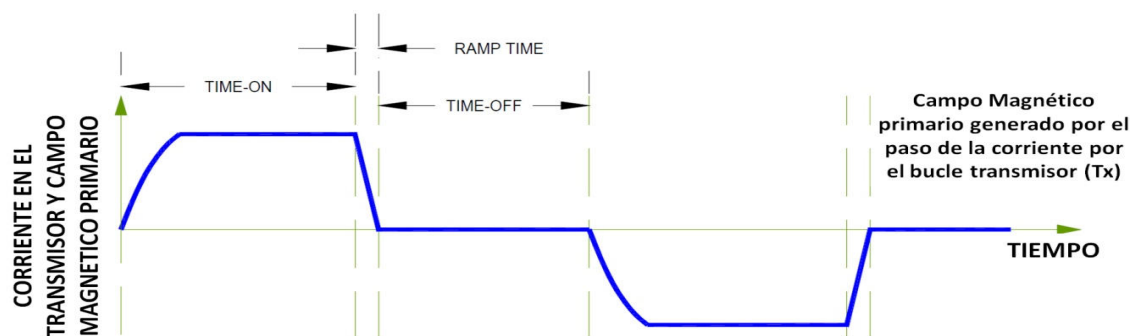


Figura 65. Campo magnético primario (Navarro Luna, 2006).

2. Según la ley de Faraday, una disminución rápida de la corriente transmitida, y por lo tanto, del campo magnético primario induce una fuerza electromotriz (emf.) en el subsuelo.

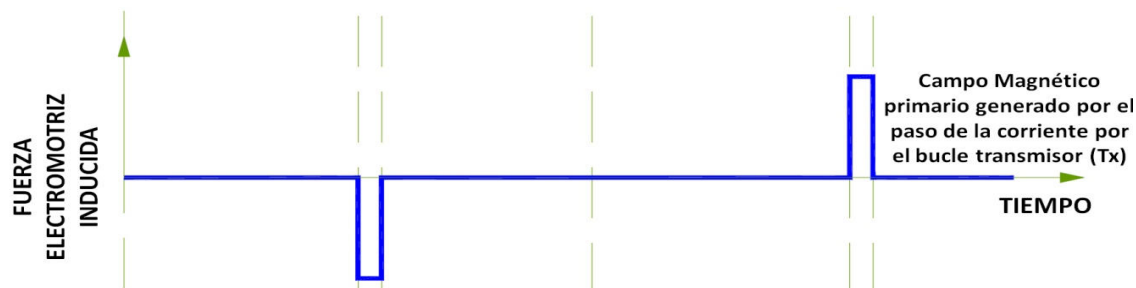


Figura 66. Fuerza electromotriz (Navarro Luna, 2006)

3. Estas corrientes inducidas generan, a su vez, un campo magnético secundario, del cual se mide su variación en el tiempo en la bobina receptora (R_x).

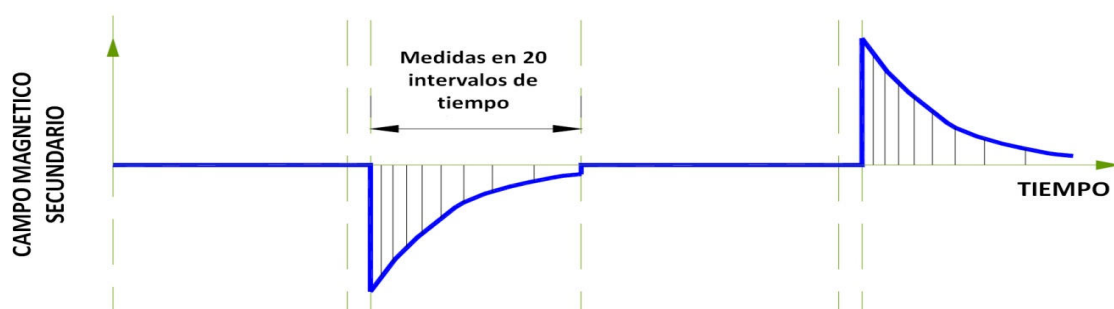


Figura 67. Campo magnético secundario (Navarro Luna, 2006)

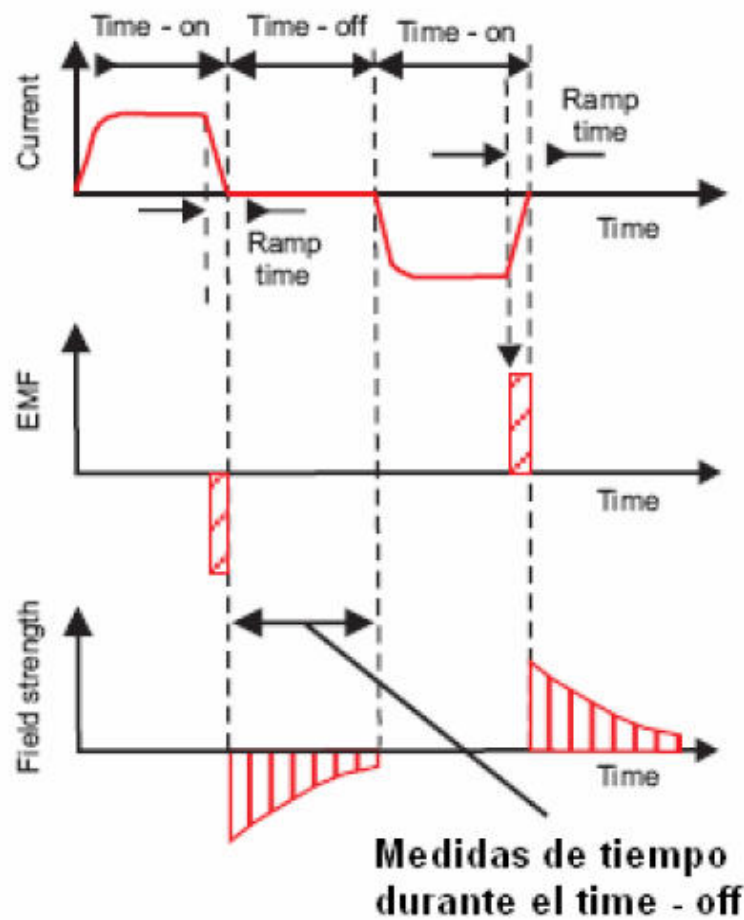


Figura 68. Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor (Navarro Luna, 2006)

Podemos visualizar de forma grafica como se produce la distribución de de las corrientes inducidas en el subsuelo:

1. Distribución de corrientes inmediatamente después del corte de corriente (turn-off).

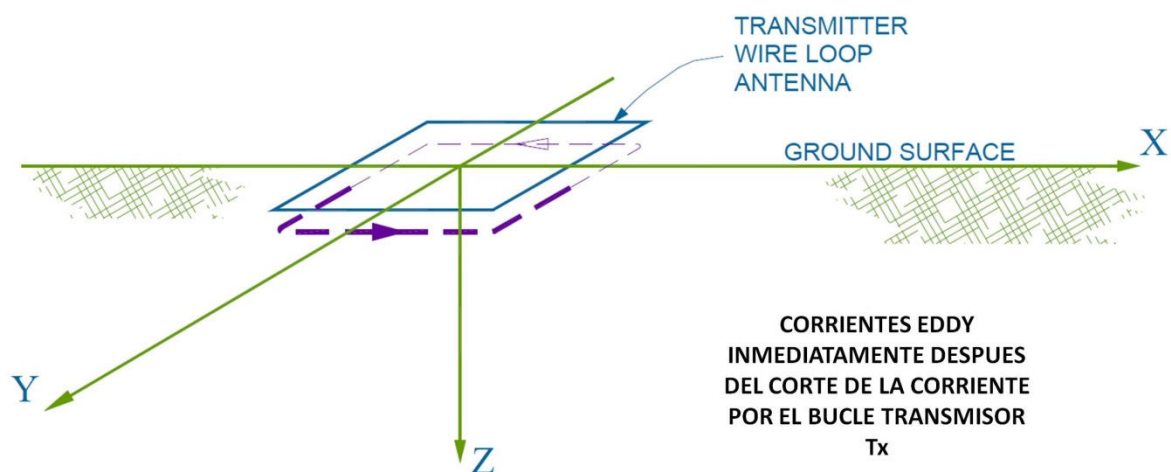


Figura 69. Distribución de corrientes tras el corte de la corriente en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006).



2. Distribución de corrientes transcurrido un cierto tiempo desde el corte de la corriente.

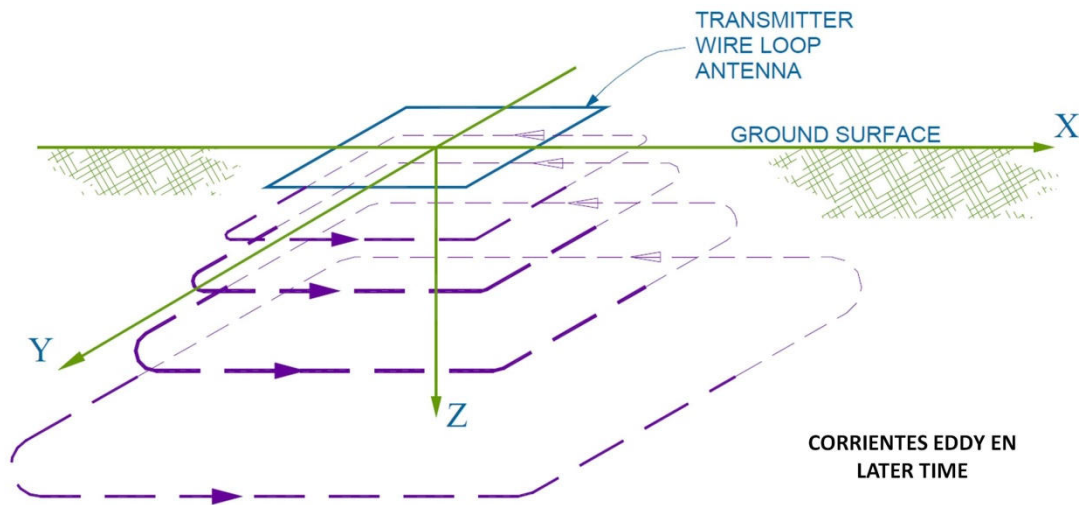


Figura 70. Distribución de corrientes transcurrido un tiempo desde el corte de la en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006)

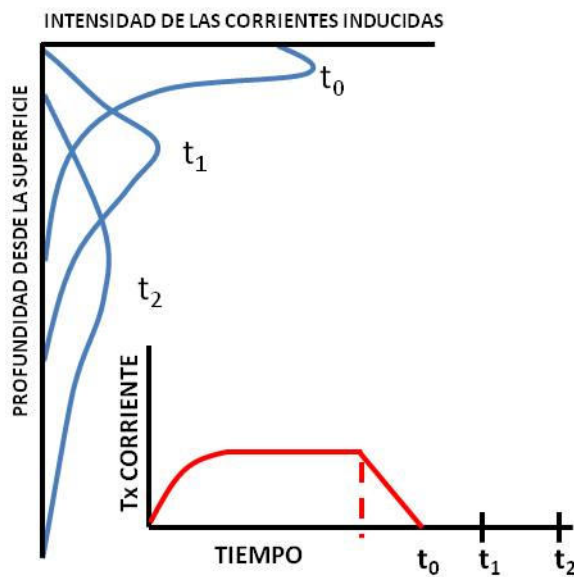


Figura 71. Densidad de corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos (Navarro Luna, 2006)

5.3.- Fundamento físico

Tal y como hemos mencionado con anterioridad, el SEDT registra la amplitud de la señal transmitida en función del tiempo. De acuerdo con la Ley Faraday, al variar un campo eléctrico constante se induce un campo magnético secundario en el terreno:

$$\nabla \times \mathbf{e} = - (\partial \mathbf{b} / \partial t)$$



Donde:

e es igual al campo eléctrico

b es la inducción magnética.

La circulación de una corriente eléctrica por una bobina (bucle) induce un campo magnético estático que denominamos campo primario. Este campo primario no contiene información del subsuelo, pero es proporcional al momento magnético, **M**, del campo generado:

$$M = InA_{loop}$$

Siendo:

I la corriente que circula por la bobina,

n el número de vueltas de la bobina y

A_{loop} el área del bucle.

Tras un corto periodo haciendo circular la corriente por el bucle conseguimos que el campo primario sea constante. En dicho momento, si interrumpimos la corriente en el bucle, el campo primario comienza a decaer generando a su vez un campo eléctrico que induce una serie de corrientes de Foucault que empiezan a discurrir por el subsuelo en las inmediaciones de la bobina. Debido a la pérdida óhmica, estas corrientes rápidamente comienzan a decaer induciendo, un campo magnético secundario. El decaimiento de estas corrientes es función de la conductividad (resistividad) de los materiales del subsuelo que atraviesan. El decaimiento del campo magnético secundario induce una fuerza electromotriz en la bobina receptora (**R_x**) que podemos registrar.

La fuerza electromotriz (fem) generada en el receptor (**R_x**) es:

$$E = K \cdot A \cdot N$$

Donde:

K, contante que depende de campo generado por el transmisor (**T_x**). A mayor campo mayor **K**.

A área del bucle receptor y

N, el número de vueltas o espiras del bucle receptor.

Las corrientes de Foucault generadas se inducen hacia el subsuelo y tienden a su vez a alejarse del punto de generación en un ángulo aproximado de 30°. La **profundidad de penetración**, **Z_d**, en un momento dado, **t**, viene dada por la siguiente formulación:

$$Z_d = (2t/\rho\mu)^{1/2}$$

Dónde **μ** es la permeabilidad magnética y **σ** es la conductividad eléctrica del medio.

De la ecuación anterior se deduce que la resistividad del medio condiciona la penetración



del sistema, tal y como podemos ver en la grafica inferior (figura 72). La grafica analiza la penetración de un SEDT para un mismo momento en un medio homogéneo de diferentes resistividades (0.1, 1 10 y 100 Ohm·m). De la grafica se deduce que la penetración es directamente proporcional a la resistividad del medio de manera que cuanto menos resistivo sea este (margas, arcillas, etc.), la penetración del sistema decrece.

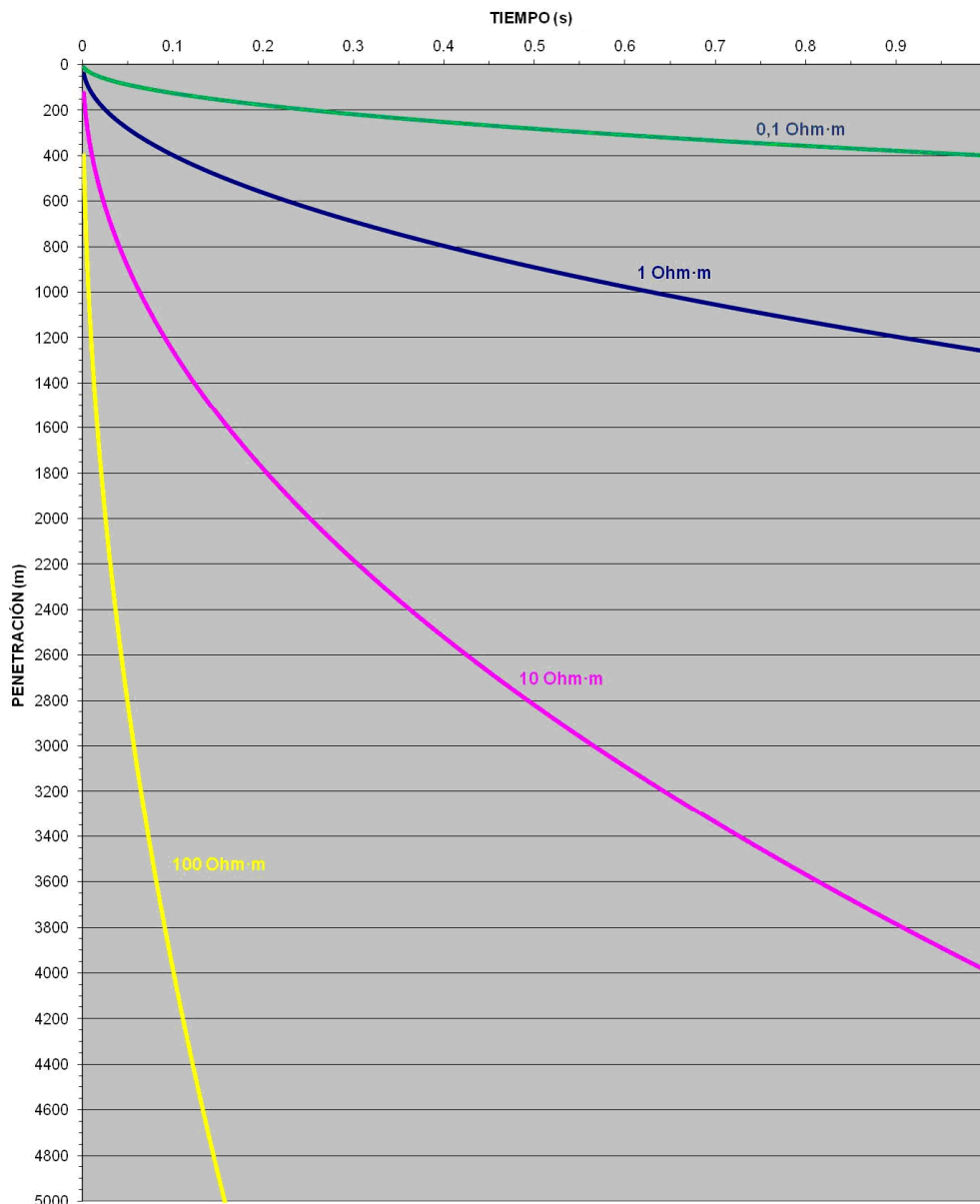


Figura 72. Profundidad de penetración en función de la resistividad del medio

La profundidad máxima al cual podemos medir se obtiene a través de Z_{last} , la cual no depende únicamente del momento sino también, del nivel de ruido ambiental, V_{noise}

$$Z_{last} = (2/25 \Pi^3)^{1/10} (M/\rho V_{noise})^{1/5}$$

El nivel de ruido puede llegar a inhabilitar el registro. Christensen (1998) establece un límite en estos casos cuando la relación señal/ruido es igual a 1. Cuando la señal es muy débil en



comparación con el ruido (sobre todo en tiempos grandes, grandes profundidades), se debe incrementar el stacking⁵.

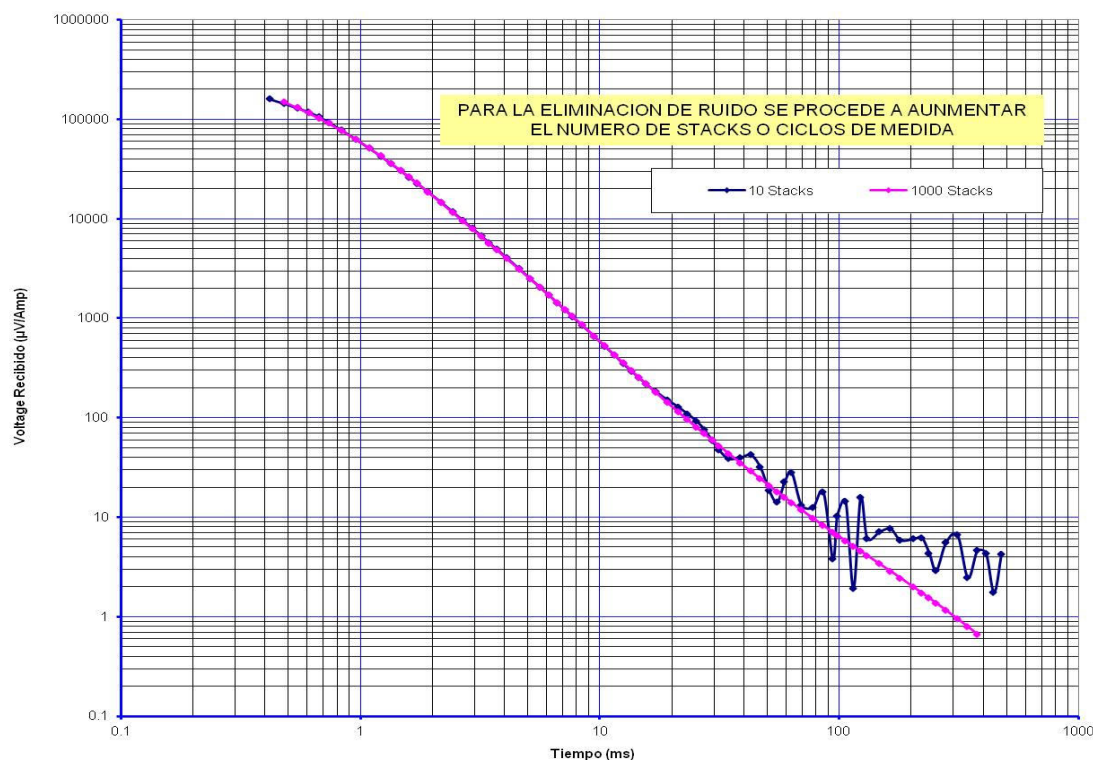


Figura 73. Comparación de un punto de investigación SEDT con 10 stacks (línea azul) en el que se ve la afección del mismo por el ruido ambiente que impide analizar la parte final de la curva. Se representa también el mismo punto pero aumentando el stacking hasta 1000 medidas obteniéndose una curva clara que permite su interpretación

La profundidad máxima de penetración en un medio homogéneo depende directamente del momento magnético (Joakim, 2003) de manera que se pueden alcanzar mayores profundidades aumentando la intensidad de corriente que circula por el bucle, el área del bucle emisor, el número de vueltas del mismo.

Por lo tanto, la profundidad útil de investigación depende de:

- Dimensiones del bucle transmisor⁶
- Intensidad de la corriente que circula por el bucle
- Duración del tiempo de observación del transitorio
- Resistividad eléctrica de las capas superficiales⁷ y del medio en general.

⁵ Procedimiento de mejora del ratio relación señal/ruido basado en la repetición de las medidas múltiples veces, sumando la señal recibida y representando el valor medio.

⁶ La dimensión de bucle emisor (T_x) condiciona la profundidad de investigación. Son usuales el empleo de bucles de 50, 100 y hasta 500 m de lado logrando alcanzar profundidades de investigación de hasta 2.000 m. Hemos de recordar en este punto que a medida que se incrementa el tamaño del bucle emisor, incrementamos la profundidad de investigación, pero se pierde resolución en la parte más superficial, viéndose incrementado también, el nivel de ruido.

⁷ Las capas conductoras tienden a concentrar la corriente impidiendo su difusión a otras capas. La existencia de conductores en la parte superficial condiciona por tanto la penetración del sistema (Figura 72)

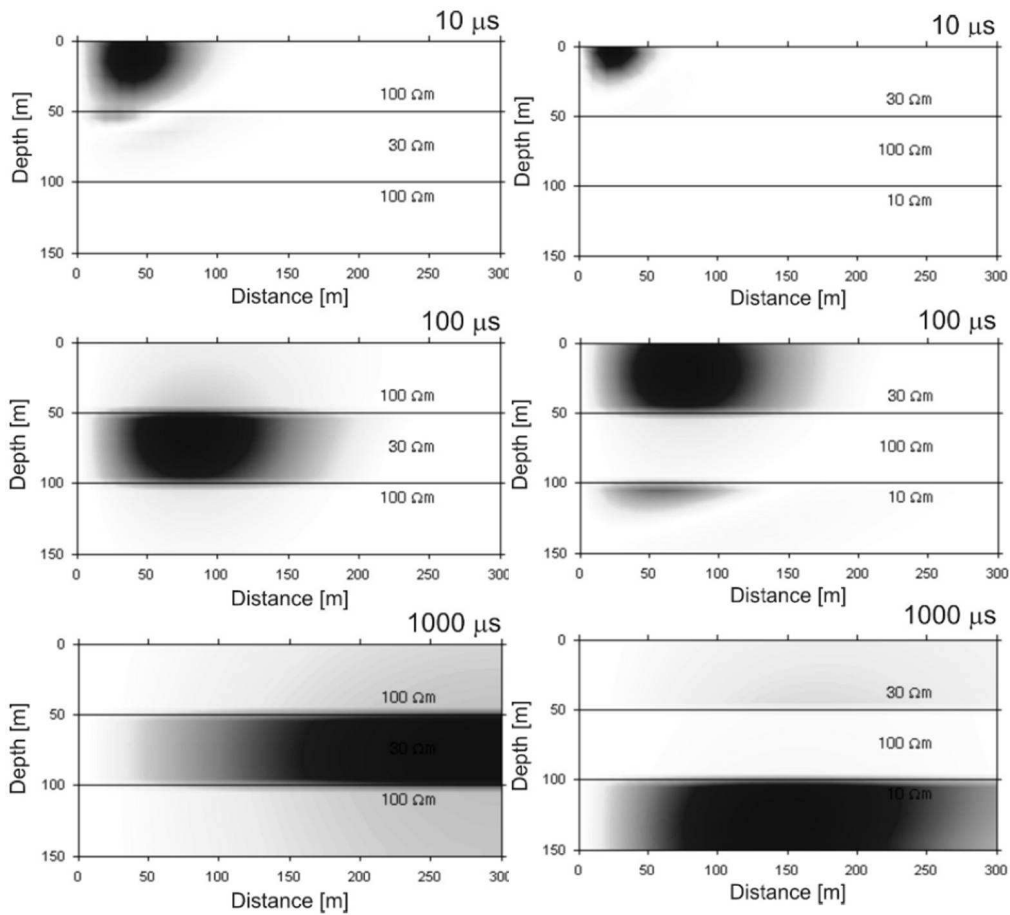


Figura 74. Densidad de corriente recogida para un pulso de corriente en diferentes tiempos para un medio estratificado con diferentes resistividades. Como podemos ver, la corriente tiende a concentrarse en las capas más conductoras disminuyendo la penetración para un mismo tiempo (Kirsch, 2006)

5.4.- Equipos y configuraciones

El equipo básico para la realización de un SEDT consta de una unidad de control y un bucle emisor (T_x) y otro receptor (R_x). Existen múltiples equipos en el mercado cuyas diferencias radican en el tamaño de bucle máximo que pueden emplear, intensidad de corriente de trabajo en el bucle emisor (T_x), ventanas de tiempo de registro, stacking, etc.



Imagen 9. Equipo SEDT Terra-Tem (Monex Geoscope)



El método SEDT puede emplear múltiples configuraciones del bucle emisor (T_x) y receptor (R_x) (figuras 75 y 76):

Bucle Coincidente (Coincident loop)

Dispositivo compuesto por dos bucles (uno emisor (T_x) y otro receptor (R_x)) que se tienden conjuntamente sobre el terreno. Esta configuración se recomienda para la realización de la mayor parte de los estudios ya que combina una elevada productividad, baja afección por ruido ambiental y buena sensibilidad para el estudio de objetos profundos.

Bucle Simple (Single Loop)

Configuración en la que un único bucle actúa como emisor y receptor. Configuración más simple desde el punto de vista logístico y productivo ya que solo ha de emplazarse un bucle si bien, se ve afectado en mayor medida por el ruido.

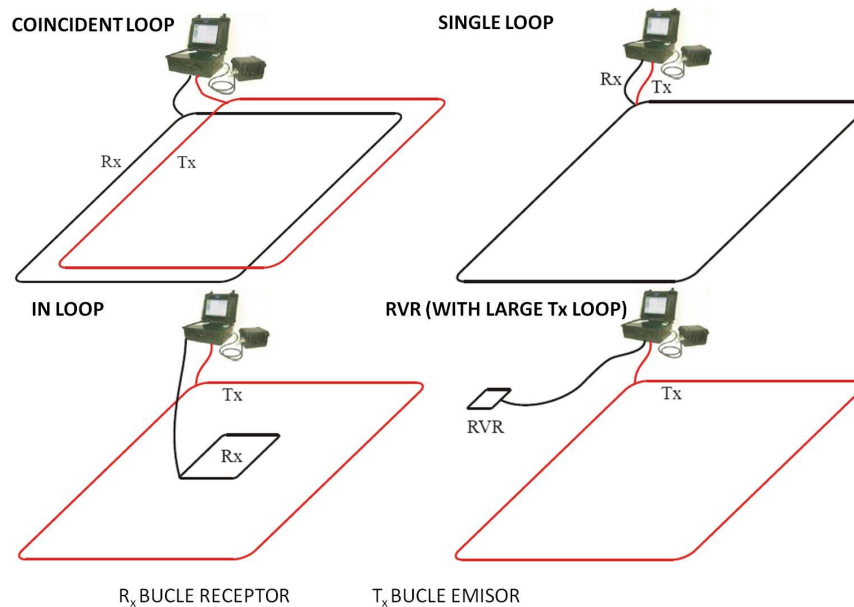


Figura 75. Configuraciones del sistema SEDT (Fuente: Manual de operaciones del Equipo TerraTem)

In Loop

Variante de la configuración de bucle coincidente en el cual el bucle receptor (R_x) es de menor tamaño y se emplaza en el centro del bucle emisor (T_x). Esta configuración se recomienda cuando es necesaria la implantación de un bucle transmisor de gran tamaño.

RVR (Con bucle emisor T_x de gran tamaño)

Se trata de un dispositivo especialmente recomendado para la obtención de una elevada resolución espacial.



Down Hole

Dispositivo diseñado para investigar las inmediaciones de sondeos. La configuración se basa en la disposición de un bucle transmisor (T_x) rodeando el sondeo haciendo descender un receptor (R_x) por el mismo a profundidades crecientes. El dispositivo presenta una elevada sensibilidad permitiendo determinar pequeñas variaciones de conductividad con la profundidad.

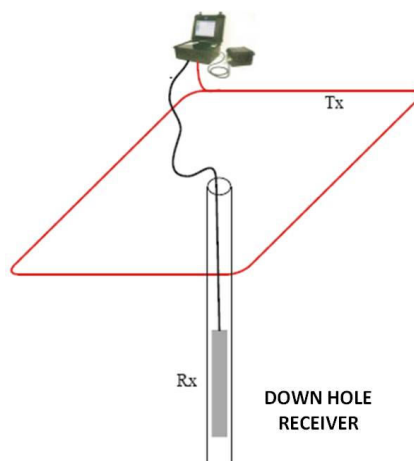


Figura 76. Configuración DOWN-HOLE del sistema SEDT (Fuente: Manual de operaciones del Equipo TerraTem)

5.5.- Procesado de datos SEDT

El procesado de los puntos de investigación SEDT (1D) es similar a los de los demás métodos de prospección eléctrica. La fem medida en función del tiempo, se convierte en resistividad aparente introduciéndose en un programa de inversión que calcula la estratificación de resistividades con el mejor ajuste posible a la curva de resistividades aparentes observadas.

El software de inversión permite la transformación del transitorio en resistividades aparentes en función del tiempo, realizando un cálculo del modelo geoelectrico más probable y su ajuste matemático posterior en base al modelo geológico de la zona en profundidad. También determinan las posibles equivalencias estimado el valor medio como más probable del proceso interpretativo. El resultado final de un sondeo TDEM es una curva variación de la resistividad aparente en función del tiempo.

Recientemente se ha desarrollado un sistema que permite el tratamiento conjunto de datos 1D en forma de perfiles obteniendo por tanto, una tomografía electromagnética. El software efectúa un procesado conjunto basado en algoritmos específicos (Algoritmo de Spiker. Smith 1994) obteniendo secciones 2D de la conductividad aparente del medio. Este tratamiento permite correlacionar los resultados de la interpretación cuantitativa de los diversos SEDT 1D agrupados en un mismo perfil obteniéndose una sección geoelectrica. las variaciones laterales de resistividad (resolución lateral) dependerá de la distancia entre puntos de observación.

La focalización de las medidas de los SEDT (en comparación con otros sistemas de investigación) hace de esta técnica esté especialmente recomendada para el estudio de acuíferos contaminados industrialmente. El procesado y representación de los datos en forma de



pseudosecciones o de planos de isovalores de resistividad aparente representativos de diferentes rangos de profundidad puede proporcionar una imagen de la distribución de la zona contaminada en tres dimensiones con un grado elevado grado de detalle.

No existe en la actualidad software específico de inversión 3D de datos SEDT si bien, es posible emplear programas de interpolación⁸ para obtener pseudoimágenes en 3D a partir de una malla de puntos de investigación SEDT.

Por último cabe citar las ventajas e inconvenientes que presenta el sistema SEDT:

VENTAJAS

- Gran focalización. Evaluación del prisma del subsuelo bajo el bucle emisor evitando efectos laterales
- Elevada penetración y resolución con un reducido dispositivo de medida (Bucle). La penetración es función del tiempo y no de la dimensión del bucle).
- Método activo que permite obtener una elevada relación señal/ruido permitiendo la adquisición de datos en múltiples ambientes.
- Posibilidad de trabajar en presencia de materiales conductores en superficie.
- Los principios de equivalencia presentan menos incertidumbres que en otros sistemas de investigación geofísica.
- Rapidez operacional.
- No necesita el emplazamiento de electrodos en el terreno (trabajo sobre roca).
- Puede atravesar pantallas resistivas.
- Menor costo.

DESVENTAJAS

- Sensibilidad frente a interferencias (líneas de alta tensión).
- Limitada sensibilidad en la zona superficial.
- En caso de bucles de gran tamaño, baja productividad.
- Elevado coste de los equipos.
- Logística compleja. Terrenos abiertos donde emplazar el bucle.
- Descenso en la profundidad de penetración en presencia de capas superficiales conductoras.

⁸ Surfer, Voxler, rockworks.

5.6.- Ejemplos de aplicación

5.6.1.- Localización de materiales permeables para la ejecución de sondeos en una finca de La Herrera (Albacete).

Realización de un perfil de tomografía electromagnética a partir de la realización de 8 SEDT de 400 x400 m (single loop). Los bucles se procesaron de forma individual y posteriormente, se realizó una inversión 2D con el algoritmo de Spiker (Smith. 1994).

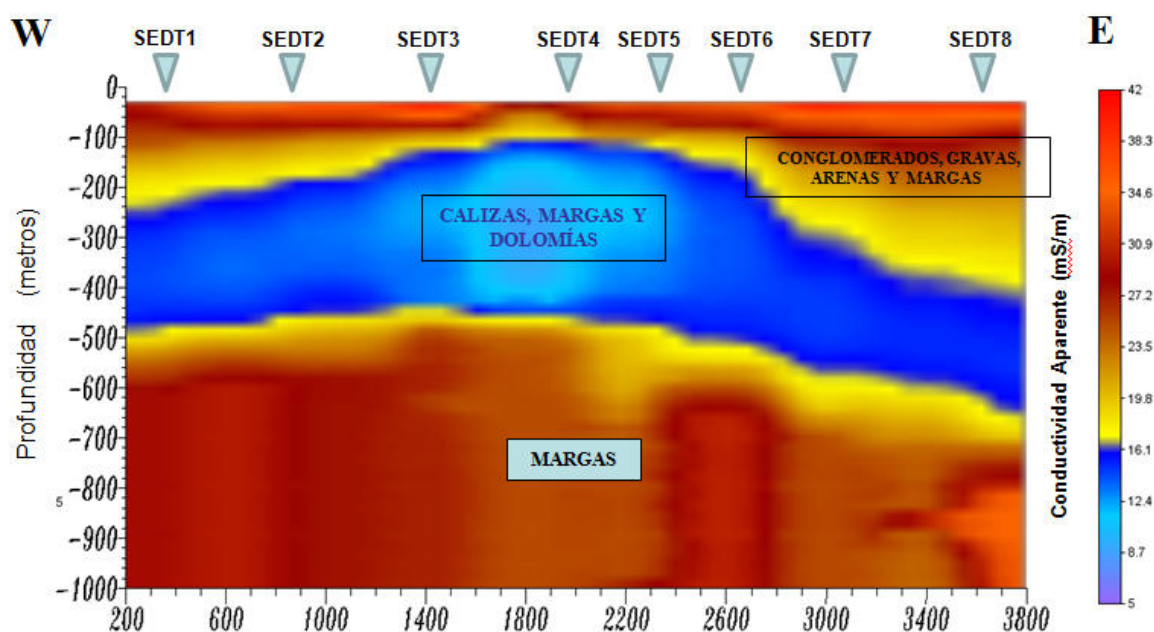


Figura 77. Tomografía electromagnética. Tratamiento de datos mediante Software Surfer

El perfil obtenido (figura 77) muestra la posición de un nivel de carbonatos (tonos azules, baja conductividad) cuyo techo se emplazan a una profundidad de entre 150 y 400 m y una potencia media de 200 m También se observa que los materiales de interés presentan cierto carácter anticlinal.

Se recomendó la realización del sondeo en las inmediaciones del SEDT 4 debido a que en este punto el techo de la formación se encuentra a una menor profundidad y a que la potencia de la formación carbonatada presenta los mayores espesores en este sector.

5.6.2.- Estudio estructural de materiales permeables en Las Cabezas de San Juan (Sevilla).

Realización de una investigación tridimensional para obtener la estructura y continuidad lateral de materiales de naturaleza carbonatada. La malla está compuesta por un total de 16 SEDT de 400x400 m (coincident loop). Los bucles se procesaron de forma individual y posteriormente, se realizó una interpolación 3D para obtener el bloque 3D.

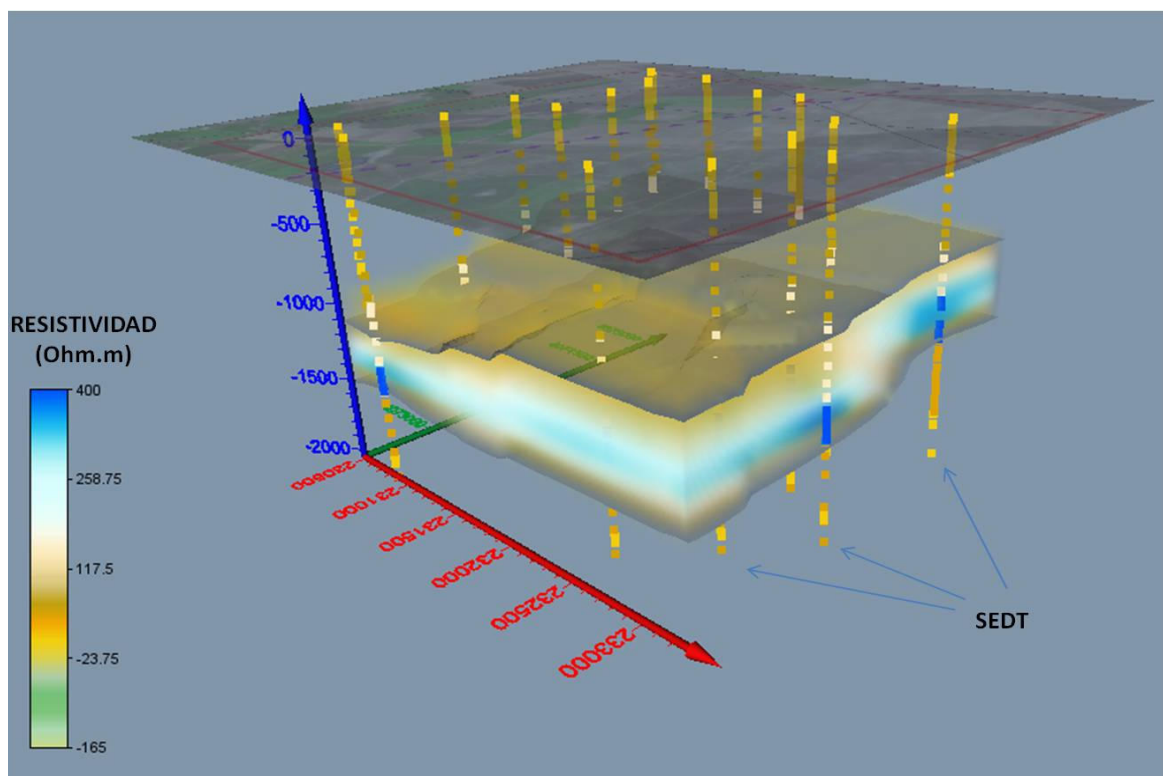


Figura 78. Modelo 3D de resistividades creado mediante el software Voxler y obtenido a partir de los SEDT realizados en campo

La figura superior (figura 78) muestra el bloque 3D generado a partir de los datos 1D de cada SEDT (columnas de cuadros). Se ha aislado y representado la zona de interés la cual presenta resistividades $> 150 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ correspondientes a los materiales permeables de interés. El estudio tridimensional permite obtener secciones 2D de interés mostrando la estructura de los materiales de interés. EN este caso, se ha determinado que en los límites de la zona de estudio los materiales de interés se emplazan entre las cotas -800 y -1.500 m.s.n.m. y que presentan una potencia que oscila entre los 500 y 700 m de potencia.

5.6.3.- Localización de zonas favorables para la captación de aguas subterráneas en Ecija (Sevilla)

Realización de un estudio areal a partir de la ejecución de un total de 29 SEDT con dispositivo Coincident Loop de 20 m de tamaño.

El trabajo se basó en el diferente comportamiento geoelectrico que presentan los materiales arenosos y conglomeráticos respecto a los predominantemente margosos que constituyen los metros superficiales de la zona de estudio. Para ello, se obtuvieron secciones en planta de los valores de amplitud (V/Amp) de los voltajes recogidos en el bucle receptor (R_x). Las zonas margosas presentan una mayor amplitud que los materiales arenosos y conglomeráticos.

El plano inferior (figura 79) muestra una planta con los resultados de los puntos SEDT para los metros 5 a 15 de profundidad. Se han representado la posición y caudales obtenidos en

los sondeos preexistentes así como los puntos seleccionados para los nuevos sondeos. Podemos ver como los existe una clara correlación entre los sondeos preexistentes y la conductividad de los materiales en los que se emplazan (bajos valores de amplitud).

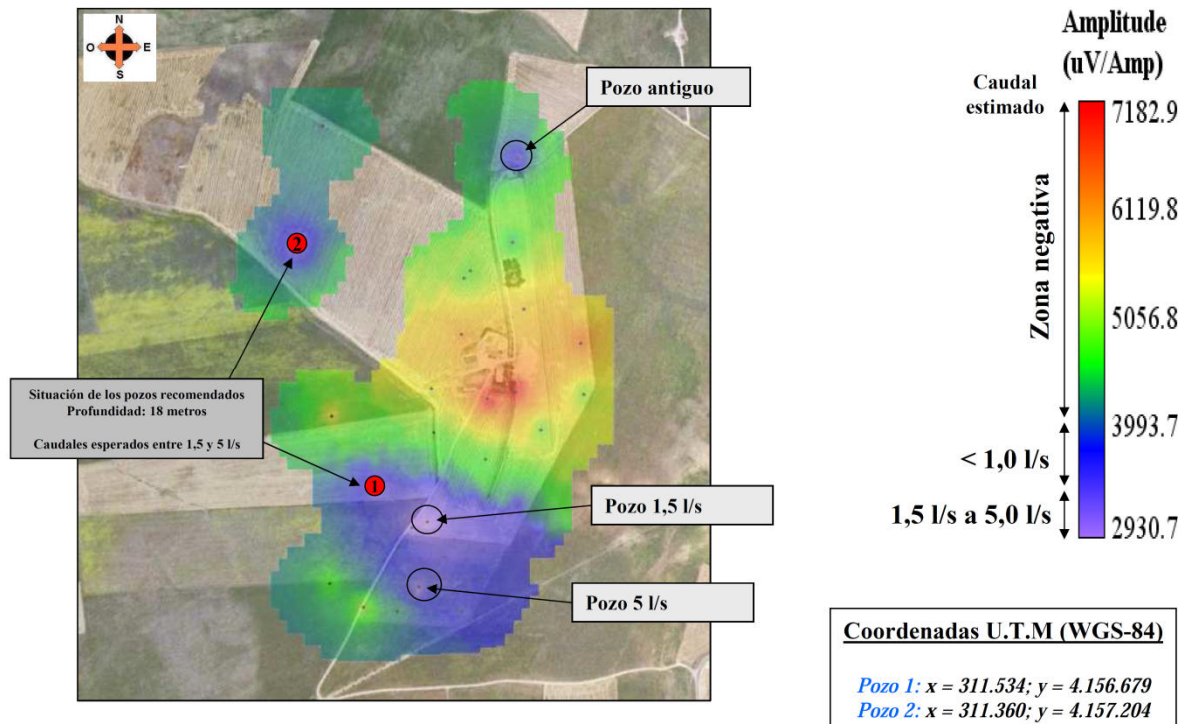


Figura 79. Planta de amplitudes obtenida en el estudio mostrando las zonas favorables para la ejecución de sondeos de extracción. Planta georeferenciada en Google Earth

5.6.4.- Estudios estructurales. Localización de zonas de fractura en Gerena (Sevilla)

Realización de un perfil de tomografía electromagnética a partir de la realización de 4 SEDT de 100 x 100 m (single loop). Los bucles se procesaron de forma individual y posteriormente, se realizó una inversión 2D con el algoritmo de Spiker (Simith. 1994).

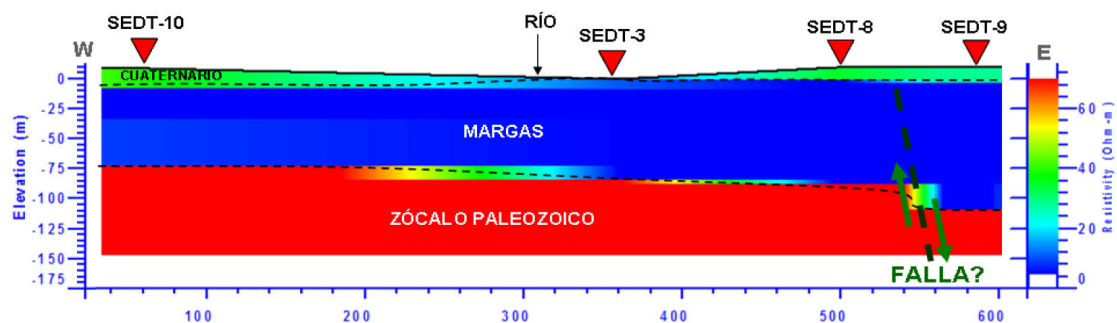


Figura 80. Tomografía electromagnética mostrando la presencia de una falla entre los SEDT 8 y 9

El perfil la existencia de una interrupción abrupta en la continuidad lateral de los materiales que constituyen el zócalo paleozoico entre los SEDT 8 y 9 interpretándose dicha interrupción como una falla.



5.6.5.- Estudios estructurales. Estudio Geofísico realizado en Pozanco (Ávila).

Realización de un estudio geofísico para la determinación de la posición de materiales detríticos a partir de la realización de 30 SEDT de 400 x400 m (single loop). Los bucles se procesaron de forma individual y se trataron posteriormente para obtener el modelo 3D.

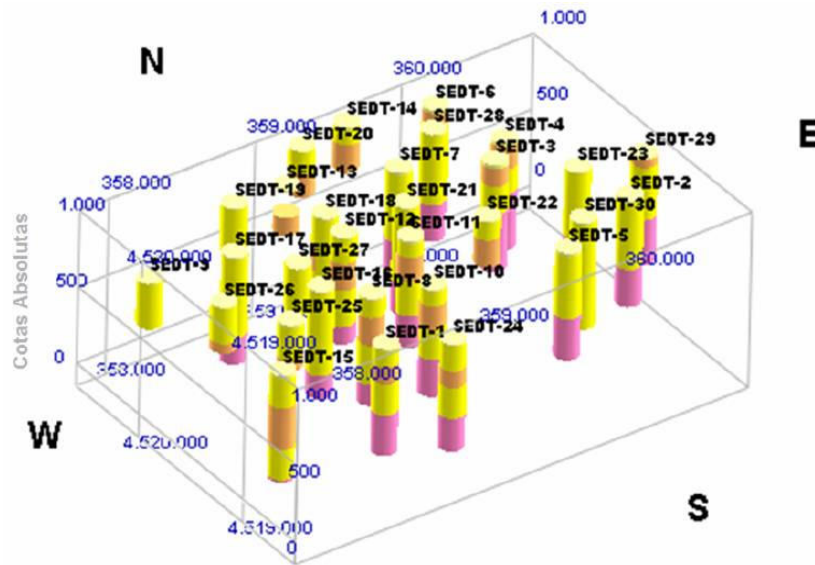


Figura 81. Posición e interpretación geológica de los SEDT realizados. Software Rockworks

El diagrama superior muestra la posición e interpretación litológica de los 30 SEDT que ha constituido la base para la elaboración del modelo 3D. El modelo 3D permite la obtención de plantas y perfiles de interés que ayuden a visualizar la estructura y disposición de los materiales.

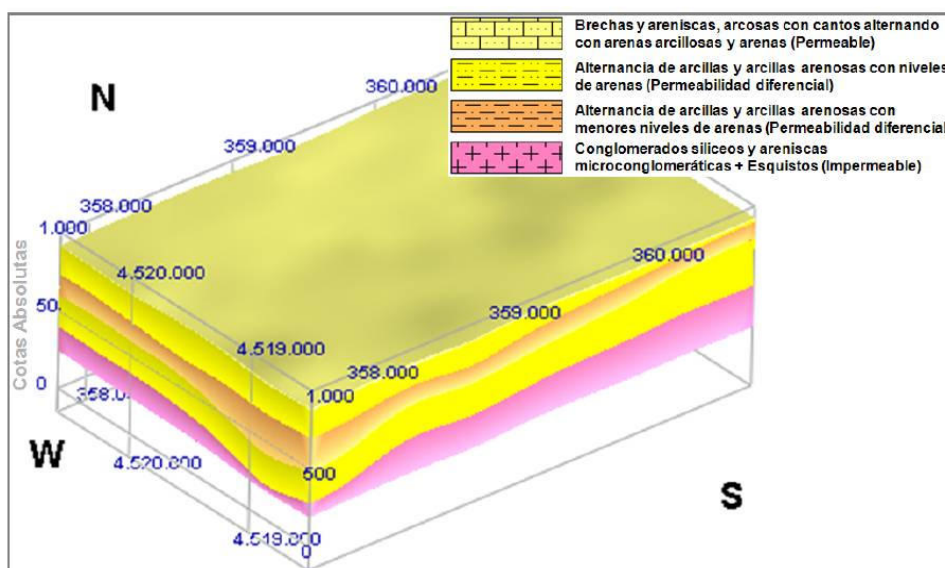


Figura 82. Modelo geológico 3D obtenido a partir de la interpretación geológica de los SEDT. Software Rockworks.

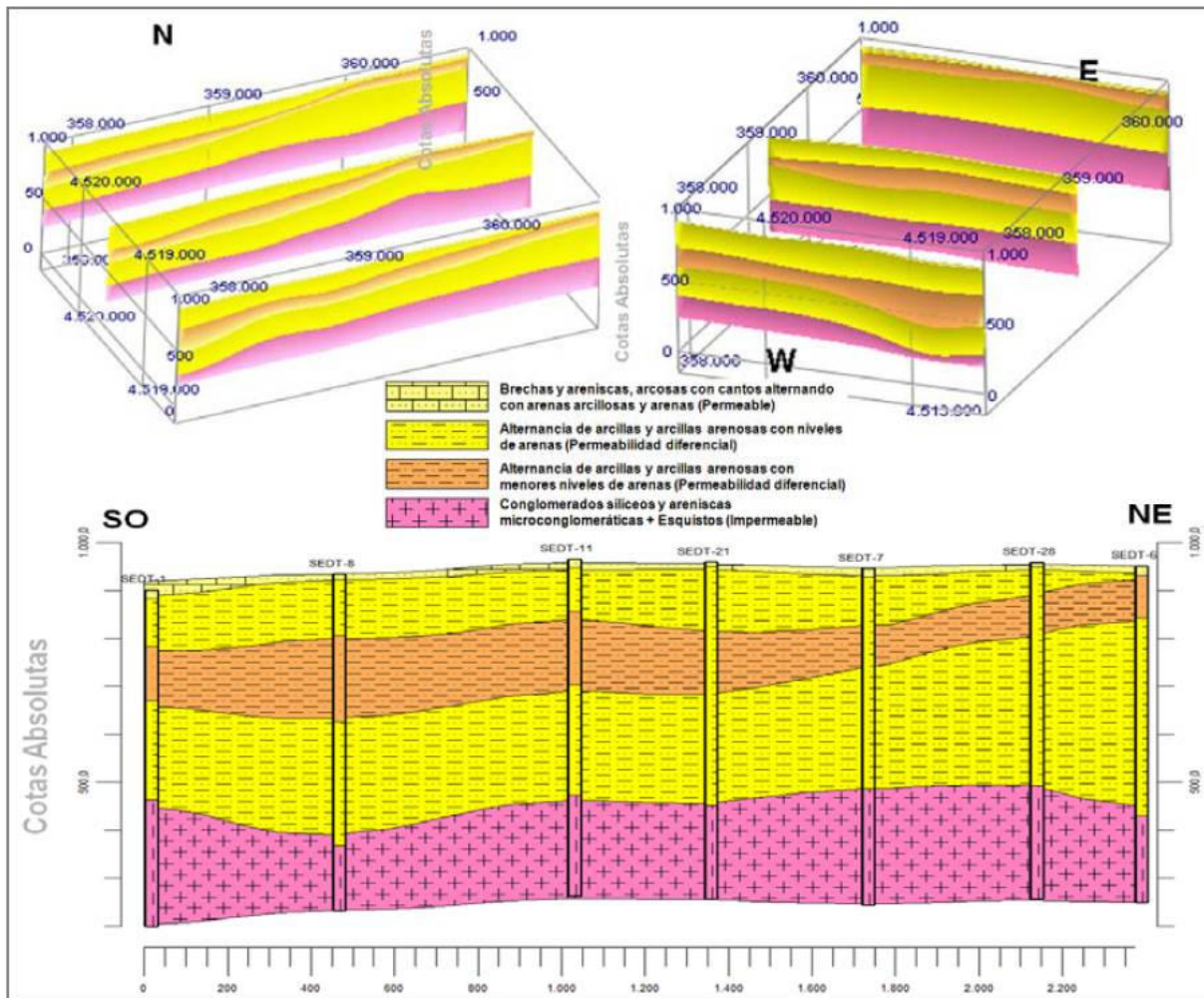


Figura 83. Perfiles geológicos realizados a partir del modelo 3D

5.6.6.- Determinación de la posición de materiales salinos dentro de un permiso de investigación (Estudio estructural) en Mequinenza (Zaragoza).

El trabajo se basó en el diferente comportamiento geoelectrico que presentan los materiales margosos (conductores) y los salinos (resistivos) objeto de la investigación. La investigación se llevó a cabo a partir de la ejecución de un total de 15 SEDT con dispositivo Coincident Loop y 500 m de tamaño.

Como punto de partida se realizó un SEDT para métrico⁹. La realización de puntos de investigación paramétricos es fundamental en estudios geofísicos ya que disminuyen el principio de equivalencia y permiten mejorar la precisión en las determinaciones.

⁹ Aquel punto de investigación que se realiza en las inmediaciones de una zona en la que se conocen con precisión las características del terreno como puede ser el caso de un sondeo, el cual, aporta datos precisos sobre los cambios litológicos en profundidad e incluso informa sobre las propiedades físicas de los materiales del subsuelo (testificación geofísica). La información aportada por el sondeo mecánico se emplea con el fin de ajustar parámetros durante la inversión de los datos SEDT y poder utilizar la curva obtenida en la interpretación del resto de SEDT del estudio.

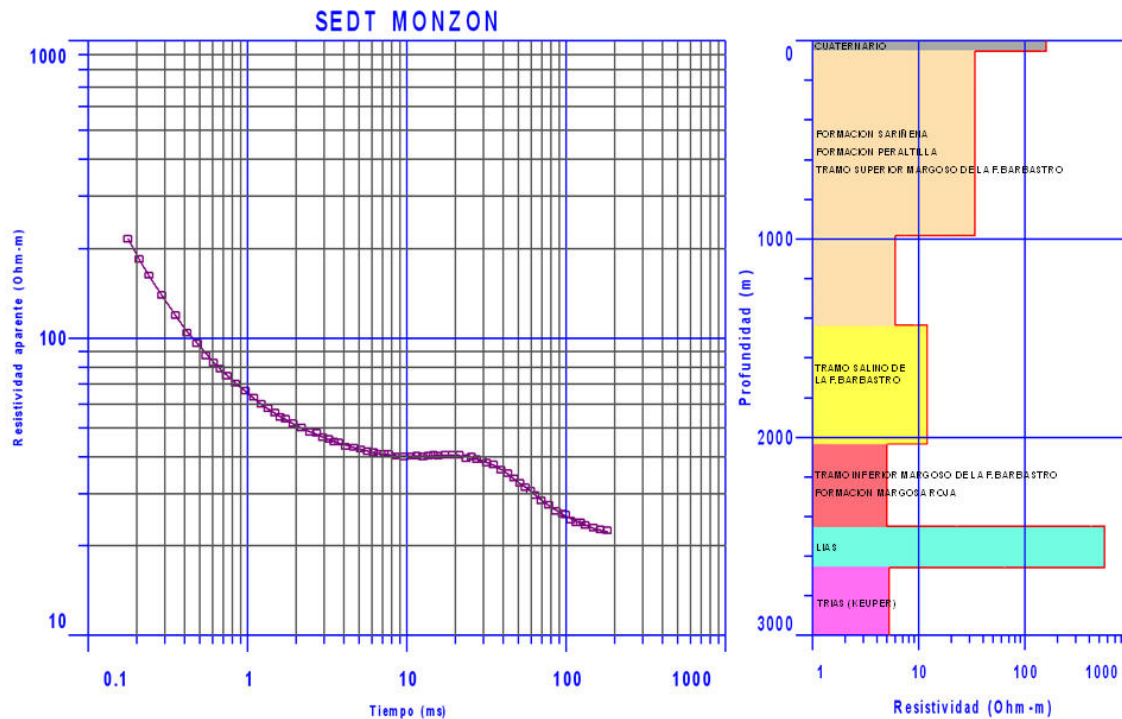


Figura 84. SEDT paramétrico y modelo geológico

La figura superior (Figura 84) muestra la curva SEDT obtenida en el punto paramétrico realizado sobre un sondeo de investigación preexistente. El modelo geológico se ha obtenido fijando la profundidad a la que se emplazan las formaciones según el sondeo y obteniendo las resistividades de las formaciones.

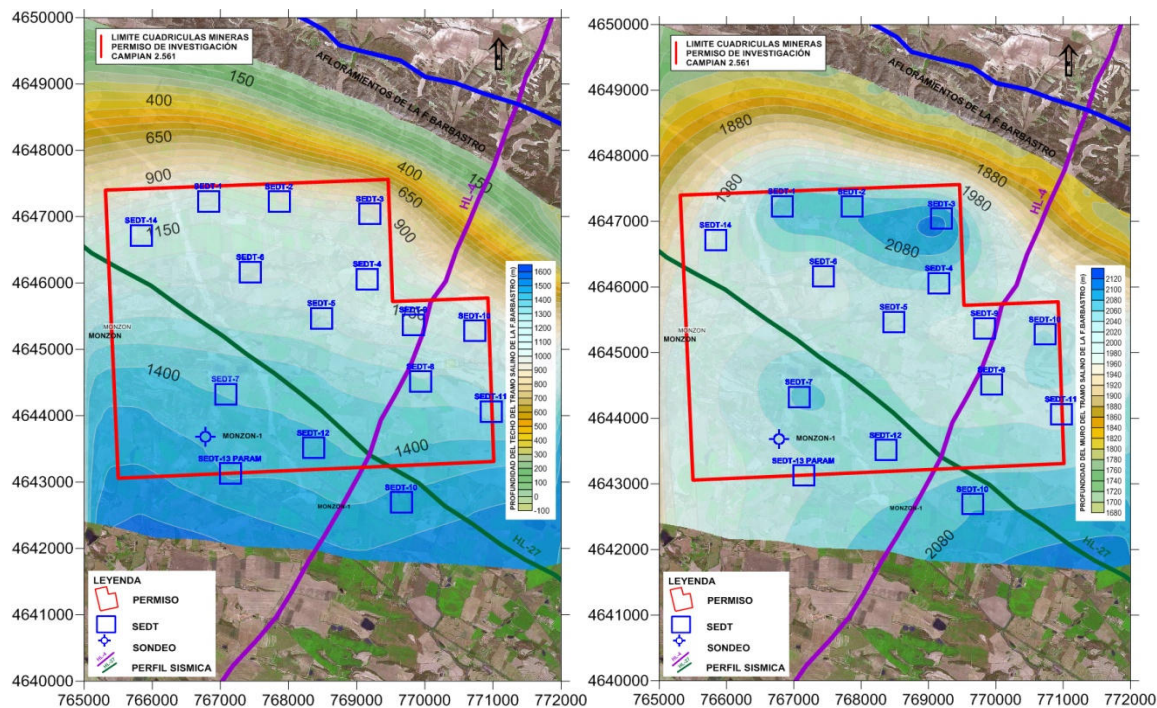


Figura 85. Techo (Izda) y muro (Izda) de la capa de interés obtenido a partir de los SEDT ejecutados en la zona de estudio. Software Surfer.



La aplicación de software de tratamiento permite la obtención de superficies 3D de interés. En este caso, la figura superior muestra la profundidad de emplazamiento del techo (Izda) y muro (Dcha) de los materiales de interés dentro de los límites de la zona de estudio. A partir de estas superficies ha sido posible la obtención de la potencia así como la cubicación del yacimiento.

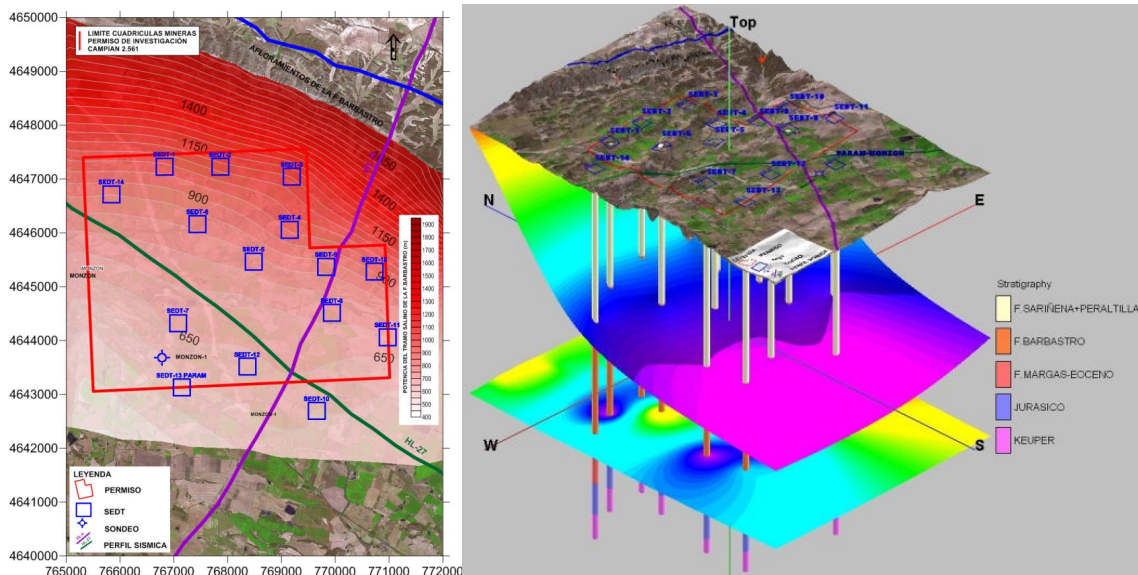


Figura 86. Potencia de los materiales de interés (Izda) y bloque 3D (Dcha) mostrando el techo y muro de los materiales de interés así como los resultados de los SEDT del estudio. Software Rockworks

5.7.- Equipos empleados

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PARA PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO



Imagen 10. Equipo TerraTem diseñado por Monex Geoscope



SYSTEM

The terraTEM is a new transient electromagnetic survey system designed and constructed in Australia. It incorporates a 10 Amp transmitter and a true simultaneous 500 kHz 3-component receiver. The unit is powered by an external 24 V battery pack system allowing 6-8 hours of continuous operation. An inbuilt GPS is mounted on the front panel, allows for location information to be automatically recorded with soundings. All connectors are external to the case allowing easy transportation without having to shutdown between sites. The user interface comprises a 15" colour LCD panel and a touch-screen. Menus are designed to allow intuitive and rapid transition between critical acquisition parameters and data display. Spectral analysis, combined with DSP options, allows the user to monitor and identify local sources of noise; these may be removed ultimately using additional filters specific to local site conditions. A diagnostic menu provides access to a spectrum analyser as well as time-domain views of the input signal for rapid troubleshooting or optimisation of acquisition parameters to ambient site conditions. Data is stored in an expandable 1 GByte solid-state memory. This provides the user with essentially unlimited storage space (up to 500,000 soundings), making the terraTEM system ideal for rapid, high-resolution surveys. System parameters are stored automatically with each sounding for post-survey quality assurance.

SPECIFICATIONS

| | terraTEM | Options |
|---|--|---------------------------|
| Transmitter Output | 10 Amps. (max.) | Enhanced Transmitter |
| Receivers | 1 Channel | 3 Channels (simultaneous) |
| High Resolution Sampling Rates | 500 kHz | - |
| User Selectable Multiple Time Gates | - | Option |
| Data Visualisation and Processing in field | Standard Software | Enhanced Software |
| Storage Device – 1 GB Flash Disk | Standard | - |
| GPS Receiver – 12 channel | - | Option |
| Communications – Port for Data Transfer | USB and RS-232 Standard | - |
| External Synchronisation | - | Option |
| Continuous Recording (with external GPS Interface) | - | Option |
| Extra Stacking Options and Gain Functions | 10 Selectable Gain Settings from 1 to 8,000 | Auto Gain |
| Vectem 3 Interface Module (down-hole) | - | Option |
| Interface Options (third party devices) | - | Option |
| Dimensions: Console: 530 x 350 x 160 mm. 13 kg Battery Box: 280 x 250 x 180 mm. 12 kg. Operating Temperature: -10 to 40 degrees C. | | |

terraTX-50 External terraTEM Transmitter



Imagen 11. Equipo TerraTx-50 diseñado por Monex Geoscope



Este aparato es un complemento para dotarle de una mayor potencia al momento inductor. Se trata del transmisor para esta técnica más potente del mercado en la actualidad.

Technical Specifications

| | | | |
|------------------------|--|---|---|
| Output Voltage | 24, 36, 72 and 96 Volts DC-selectable | Data Visualisation and Processing in field | Standard Software |
| Output Current | 1 - 50 Amps | Display | Including Battery Voltage, Loop Current Warnings of Overheating and Short-circuit. |
| Waveform | Bipolar. 50% Duty Cycle. On time equals Off Time | Cooling | Convection by Heat-sink |
| Turn-off Time | Depending on Loop Inductance and Current. Only 35 usecs on a 100 m loop and 40 A. | Operating Temperature | -20 to +50 degrees C. |
| Repetition Rate | Controlled by terraTEM to be the same as terraTEM | Operational safety protection | Overvoltage and Short-circuit protection |
| Synchronisation | Cable or GPS Timing | Dimensions | 45 x 32 x 15 cm. |
| | | Weight | 10 kg. |



6.- SISTEMA VLF (VERY LOW FREQUENCY)

6.1.- Introducción

El sistema VLF (Very Low Frequency) es un sistema de investigación electromagnético basado en el análisis de las modificaciones que generan en las propiedades eléctricas del subsuelo las ondas de radio de baja frecuencia (Brereton et al., 1987; Kaikkonen y Sharma, 1997).

La idea de emplear señales de radio como fuente del campo primario no es nueva, ya que se conoce la existencia de ensayos realizados desde 1908 para distintas condiciones geológicas (Paterson and Ronka, 1971). Sin embargo, hasta 1964 no se desarrollan los primeros equipos de VLF, los cuales, trabajando en un rango de frecuencias comprendido entre los 10-30 KHz aprovechan como fuente de energía las señales procedentes de potentes emisoras militares.

El método VLF constituye un método rápido y económico para la realización de estudios de localización de fracturas (y por tanto, de posibles zonas con agua), localización de cavidades, estudios de contaminación y localización de cuerpos mineralizados.

6.2.- Principios

Las ondas de radio de baja frecuencia se generan en estaciones de radio con antenas transmisoras VLF, de 200 a 300 metros de altura, ubicadas en algunos puntos alrededor del planeta. A través de estas antenas, se hace circular una corriente alterna, generándose un campo electromagnético variable que se propaga en todas direcciones y que puede ser detectado a miles de kilómetros de distancia del punto emisor. Las ondas electromagnéticas irradiadas tienen frecuencias en el orden de 3 a 30 KHz.

Los transmisores VLF operan en un número de países. Algunas de las estaciones de transmisión más utilizadas son las que se indican en la tabla:

| LOCALIZACIÓN | DESIGNACIÓN | FRECUENCIA (kHz) | POTENCIA (kW) |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Bordeaux, Francia | FUO | 15.1 | 500 |
| Rugby, Gran Bretaña | GBR | 16 | 750 |
| Helgeland, Noruega | JXN | 16.4 | 350 |
| Gorki, URSS | ROR | 17 | 315 |
| Mosú, URSS | UMS | 17.1 | 1000 |
| Yosamai, Japón | NDT | 17.4 | 500 |
| Oxford, Gran Bretaña | GBZ | 19.6 | 550 |
| Annapolis, USA | NSS | 21.4 | 400 |
| Cabo Noroeste, Australia | NWC | 22.3 | 1000 |



| | | | |
|-------------------------|-----|------|------|
| Hauderfehn, Alemania | DMB | 23.4 | |
| Laulualei, Hawaii, USA | NPM | 23.4 | 600 |
| Buenos Aires, Argentina | LPZ | 23.6 | |
| Cutler, Maine, USA | NAA | 24 | 1000 |
| Seattle, USA | NLK | 24.8 | 125 |
| Aguada, Puerto Rico | NAU | 28.5 | 100 |

Tabla 2. Esquema de funcionamiento del sistema VLF.

Las señales generadas por las antenas emisoras están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético que oscila en la frecuencia de la antena elegida, los cuales se representan por vectores. En el caso del campo magnético, el vector es horizontal y se orienta perpendicularmente a la línea que une el punto de observación y el transmisor, mientras que en el caso del campo eléctrico, el vector es vertical y perpendicular a la dirección de propagación y al campo magnético primario.

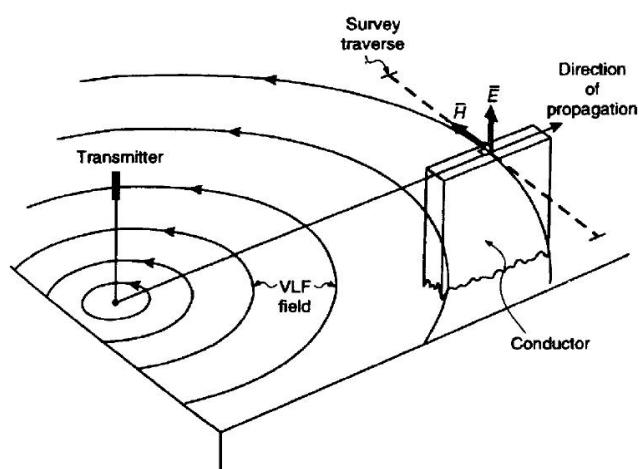


Figura 87. Esquema de funcionamiento del sistema VLF (Ogilvy y Lee, 1991).

Cuando un cuerpo conductor se encuentra inmerso en un campo electromagnético se inducirá en él una corriente eléctrica que generará, a su vez, un campo magnético secundario (Figura 88). Para cada punto del espacio éste estará orientado en una determinada dirección y tendrá un determinado desfase con respecto al campo primario. Debido a que ambas componentes del campo magnético difieren tanto en fase como en dirección, el campo magnético resultante cambia continuamente de dirección, realizando una evolución completa para cada ciclo. La resultante de dichos vectores (H_p y H_s) traza una elipse cuyo extremo estará muy alargado en la dirección del campo primario (por ello se dice que el campo está elípticamente polarizado).

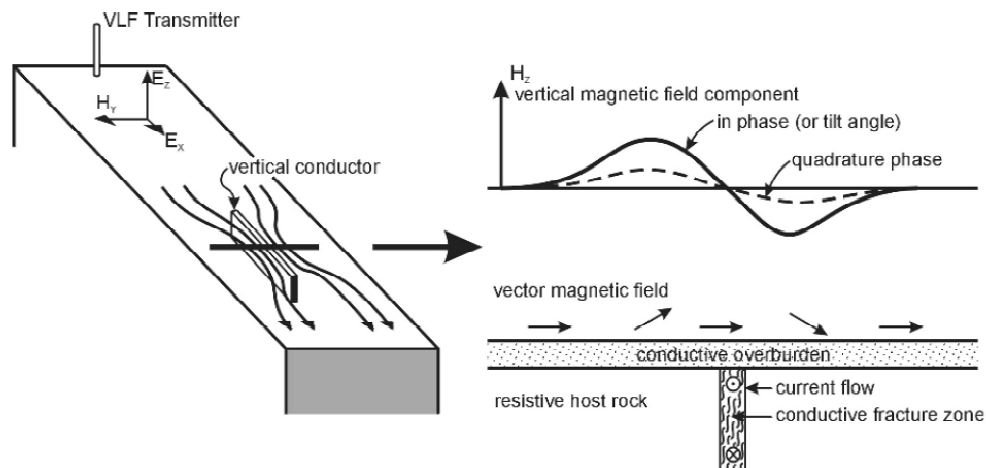


Figura 88. Izda. Componentes del campo EM de una emisora remota de VLF y corrientes eléctricas en la superficie. Derecha. Componentes del campo eléctrica a lo largo del perfil que cruza perpendicularmente la fractura (Ogilvy y Lee, 1991).

Los principales parámetros medidos en VLF son la inclinación del eje mayor de dicha elipse de polarización (α) y la elipticidad (ϵ), o lo que es lo mismo, la relación entre su eje mayor y menor (b/a).

6.3.- Profundidad de penetración

La *profundidad de penetración* P , se define como:

$$P = 500 \sqrt{\rho/f}$$

Donde ρ es la resistividad en Ohm-m y f la frecuencia en Hz.

La ecuación anterior puede emplearse para todos los casos prácticos supuestos en la totalidad de la banda de frecuencias VLF. Cuando las ondas electromagnéticas llegan a la profundidad P , pierden mucha energía para crear el efecto de inducción por lo que P es aproximadamente la profundidad de penetración.

Para poder detectar un cuerpo de interés (como por ejemplo una fractura) y siempre que el perfil pase perpendicularmente a la dirección del cuerpo, este ha de tener unas dimensiones mínimas y una resistividad suficientemente baja. Normalmente, la longitud de la estructura ha de ser superior a los 50 m y la profundidad debe exceder de los 10 m para que se produzca la inducción. En el caso de la potencia del cuerpo, esta debe ser superior a 1 m.

El equipo VLF registra la componente real e imaginaria estableciendo la relación (en %) entre. La desviación de la lectura normal se denomina anomalía. Las anomalías pueden ser complejas en función de las características geológicas y morfología del cuerpo.

El procesado de los datos permite aplicar filtros que convierten la anomalía en una anomalía mucho más clara e interpretable con un simple pico recto encima del conductor. Los Filtros permiten además determinar la posición e intensidad de la anomalía a diferentes profundidades permitiendo definir el buzamiento de las estructuras.



6.4.- Secciones de densidad de corriente

Tradicionalmente, la interpretación de las medidas VLF se ha basado en la obtención e interpretación de las curvas real e imaginaria (también llamadas ángulo de inclinación y elipticidad). Debido a la complejidad que pueden llegar a alcanzar dichas curvas debido, entre otros factores, al comportamiento antisimétrico, efectos topográficos, etc., se han venido desarrollando diferentes técnicas de filtrado para extraer la información de interés.

En el caso del filtro de densidad de corriente, el filtro obtiene como salida la densidad de corriente equivalente que se genera a una cierta profundidad en el suelo. La densidad de corriente se calcula de la siguiente forma:

$$I(0) = K (-0.102 H_3 + 0.059 H_2 - 0.561 H_1 + 0.561 H_1 - 0.059 H_2 + 0.102 H_3)$$

Donde K es una constante que depende de la distancia entre puntos (dx). H_i es el punto de medida detrás (-) o delante (+) del punto donde se realizan los cálculos.

El filtro puede utilizarse de forma separada para obtener las componentes en fase (real) y en cuadratura (imaginaria) de las anomalías, de forma que proporciona las componentes correspondientes a la densidad de corriente a una profundidad de interés. Aplicando el filtro en diferentes intervalos entre puntos (dx, 2dx, 3dx, etc.), podemos estudiar la variación de la trayectoria de la densidad de corriente con la profundidad obteniendo una sección 2D (figura 89).

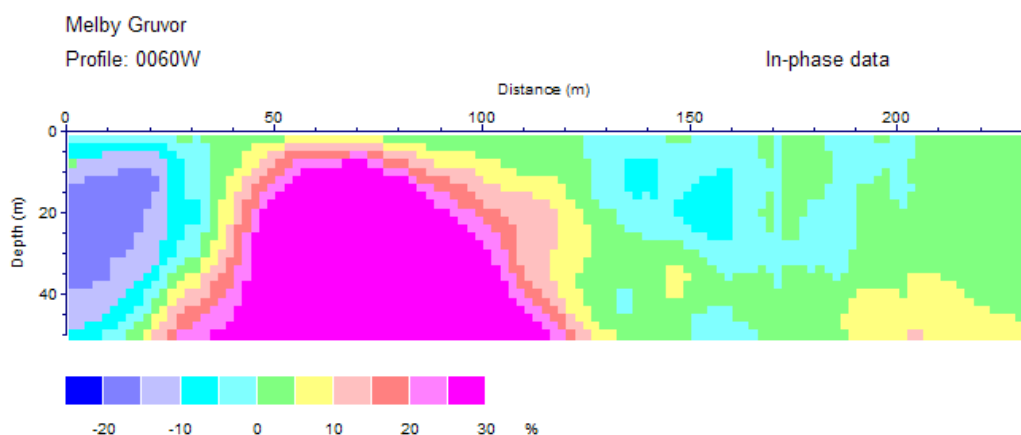


Figura 89. Sección de densidad de corriente de un perfil VLF.

6.5.- Toma de datos

El equipo VLF está formado por una unidad receptora en la banda VLF portátil. Los trabajos de campo comienzan con un reconocimiento previo para determinar la orientación de las estructuras a investigar, diseñando los perfiles de investigación de forma perpendicular a esta. Una vez definida la orientación de los perfiles de investigación, se escanean y selecciona la emisora apropiada de acuerdo a la orientación de los perfiles. El espaciado entre puntos de medida depende de la resolución y profundidad de estudio.

El equipo dispone de un display que permite previsualizar los resultados de los puntos de medida y del perfil de investigación en campo pudiendo controlar la correcta ejecución de las mediciones.



Imagen 12. Equipo VLF diseñado por la empresa Abem Wadi

6.6.- Limitaciones del método

El método VLF puede no ser aplicable en ciertas ocasiones como en el caso de zonas con estratificación subhorizontal sin cambios laterales y zonas muy poco fracturadas. Otra limitación importante se produce cuando existen capas superficiales eléctricamente conductoras (suelos salados y capas arcillosas). La topografía produce distorsiones en las medidas que han de ser tratadas durante el procesado de los datos.

6.7.- Aplicaciones

Dentro de las aplicaciones geológicas más comunes de este método se encuentran: la exploración minera, detección de aguas subterráneas y de fracturas pudiendo determinar la potencia y la profundidad de la zona anómala, así como, las características de los materiales que rellenan las fracturas o diques, permitiendo evaluar sus posibilidades desde el punto de vista hidrogeológico.

6.8.- Ejemplos de aplicación

6.8.1.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico en el T.M de Piedrahita (Ávila).

El estudio consistió en la realización de una serie de perfiles VLF para la detección de fracturas en granitos donde instalar sondeos de aprovechamiento. La imagen inferior (figura 90) muestra los resultados de uno de los perfiles de investigación aplicando el filtro para obtener la sección de densidad de corriente. El perfil se realizó tomando medidas cada 10 m.

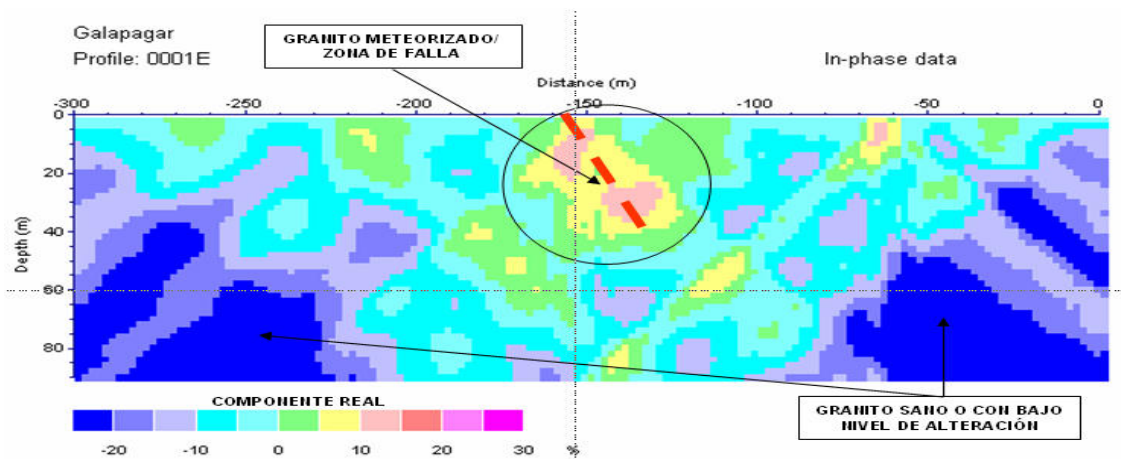


Figura 90. Sección VLF de investigación mediante el sistema MG.

La sección 2D muestra la existencia de una fractura en el centro del perfil la cual parece buzarse levemente hacia el sur.

6.8.2.- Detección de cavidades en el embalse de Santolea (Teruel).

El estudio consistió en la realización de un perfil de VLF y la repetición del mismo mediante Tomografía Eléctrica (TE) con el objetivo de detectar una serie de cavidades de origen kárstico que pueden afectar a la cimentación de una estructura. La imagen inferior (figura 91) muestra los conjuntamente del perfil VLF con un filtro para 20 m de profundidad y de Tomografía Eléctrica.

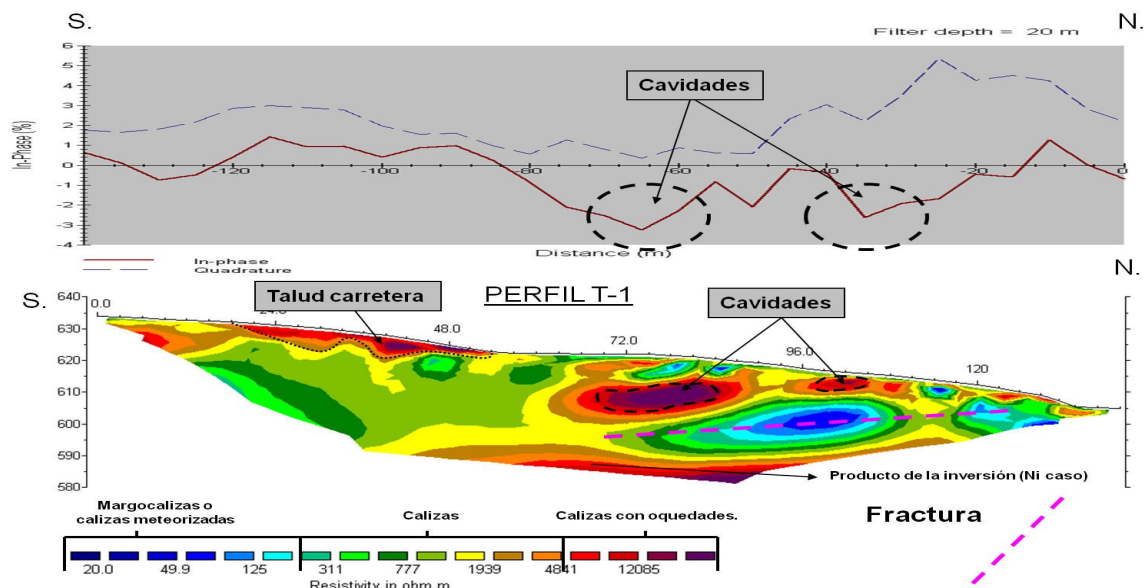


Figura 91. Perfil VLF (superior) y de Tomografía Eléctrica (inferior) para la detección de cavidades

El perfil VLF muestra dos anomalías en los metros 35 y 65 del perfil relacionables con la presencia de cavidades. El perfil de Tomografía Eléctrica muestra de forma coincidente con el perfil VLF la existencia de dos anomalías resistivas interpretadas como cavidades.



6.8.3.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico en el T.M de Santa María del Cubillo (Ávila).

Estudio para la detección de fracturas con objetivo hidrogeológico. La imagen inferior (figura 92) muestra los resultados de uno de los perfiles de investigación aplicando un filtro para obtener los datos a 20 m de profundidad y la sección de densidad de corriente. El perfil se realizó tomando medidas cada 10 m.

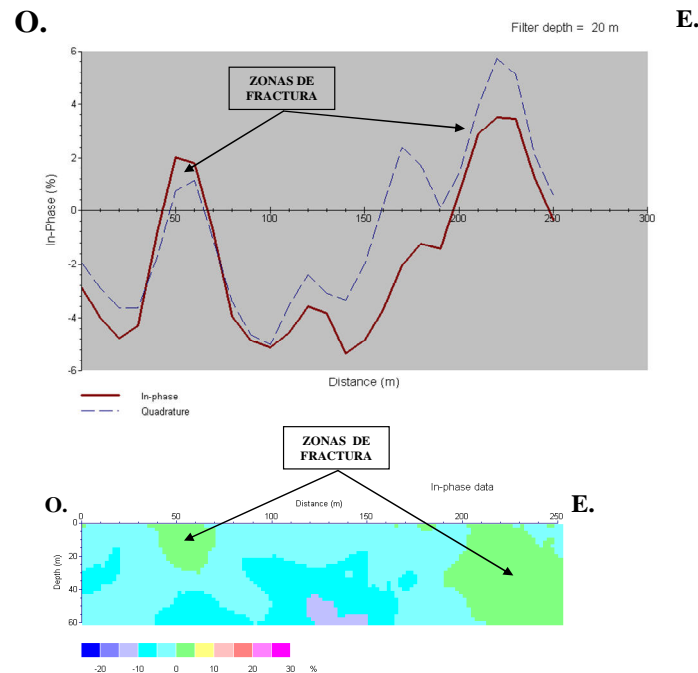


Figura 92. Perfil VLF con el filtro para 20 m de profundidad (superior) y sección de densidad de corriente (inferior).

El perfil con el filtro para 20 m de profundidad refleja dos anomalías relacionables con la existencia de dos fracturas siendo la segunda de ellas(al este), de mayor entidad. La sección de densidad de corriente ratifica los resultados del filtro para 20 m de profundidad identificando dos anomalías en los metros 50 y 220 siendo esta última de mayor profundidad y potencia y por tanto, más interesante desde el punto de vista hidrogeológico.

6.8.4.- Localización de fracturas para aprovechamiento hidrogeológico mediante la utilización de la tomografía eléctrica, el potencial espontáneo y el VLF en materiales graníticos en el T.M de Narrillos de San Leonardo (Ávila).

Estudio para la detección de fracturas con objetivo hidrogeológico. La imagen inferior muestra los resultados de cada una de las técnicas geofísicas que se utilizó. Las diferentes técnicas han llegado a determinar la misma localización para la fractura. Este ejemplo es una clara demostración de la importancia del uso de varias técnicas (diferentes parámetros) para la potenciación de la información y la resolución de problemas de origen geológico.

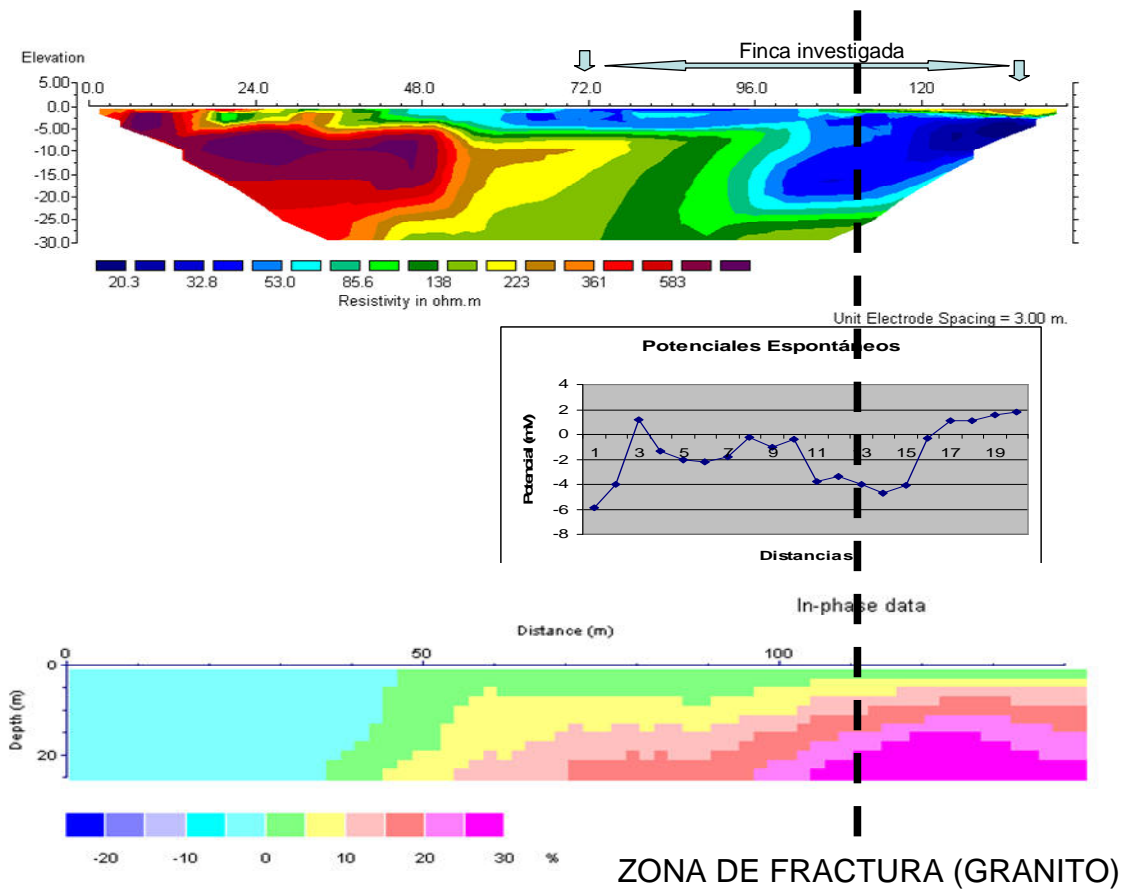


Figura 93. Perfiles de tomografía eléctrica, potencial espontáneo y VLF para determinación de una fractura en materiales graníticos para aprovechamiento hidrogeológico

6.9.- Equipo empleado

CARACTERISTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO ELÉCTROMAGNÉTICO DE MEDIDAS ABEM WADI



Imagen 13. Equipo VLF diseñado por Abem Wadi



TECHNICAL SPECIFICATION

Primary field

Magnetic components of the EM field emanating from regular VLF transmitters (or the portable TX-27)

Measured parameters

Vertical and horizontal in-phase and quadrature components

Displayed parameter

Vertical in-phase field expressed as percentage of the horizontal field and recalculated as "current density". Alternatively, any of the 4 measured parameters can be displayed

Station selection

Automatic (scans and tunes onto the most suitable station) or manual (station frequency entered from keyboard)

Frequency range

15-30 kHz in steps of 100 Hz

Display

Easy-to-read Supertwist LCD 150x40 mm

Languages

- English/Spanish
- English/French
- English/German
- English/Swedish
- English/Portuguese
- English/Finnish

Help key

Pressing this key together with any other key provides context-sensitive help

Diagnostics

Four-option service menu:

- Internal voltages check
- Change of language
- Memory test
- Inclinometer calibration

Inclinometer

Range -10° to $+10^{\circ}$

Precision 0.2 %

Field strength

100 nanoamp/m - 500 milliamp/m

Transmitter range:

WADI can normally be used at distances ranging from 75-100 km to about 10 000 km from a powerful transmitter

Memory capacity

Data from about 4000 measuring stations

Data output

Via RS 232C interface to serial dot matrix printer (PRINT F0 OR PRINT F1) or modem (SEND DATA)

Power

9 V from 6 standard D-cells or (optionally) rechargeable cells

Battery life

Approximately 2 weeks of field work

Ambient temperature

-20° C - $+50^{\circ}$ C (Built-in heater warms display at low temperatures)

Weight basic system

Hand-held controller unit 1.6 kg

Entire system 6 kg

Shipping weight 10 kg

(Freight cost is based on bulk weight 16 kg)

STANDARD BASIC SYSTEM

| Item | Description | Order Code | Qty |
|------|--|--------------|-----|
| 1 | WADI basic system Controller unit Antenna unit Measuring/battery unit Carrying belt Six 1.5 V batteries Instruction and interpretation manuals | 9133 0018 05 | 1 |

OPTIONAL EQUIPMENT

| | | | |
|-----|--------------------------|---------------------|---|
| 2 | Rechargeable batteries | 9139 0400 23 | 6 |
| 3.1 | Battery charger 220 V | 9133 0018 45 | 1 |
| 3.2 | Battery charger for 110V | 9133 0018 41 | 1 |
| 4 | Service kit WADI | 9133 0018 63 | 1 |
| 5 | SECTOR Software | (5 1/4" or 3 1/2") | |
| 6 | Cable WADI-to-PC | (9-pole or 25-pole) | |
| 7 | WADI-to-printer cable | 9136 0001 58 | 1 |
| 8 | Dot-matrix printer 80 c | 9139 9100 04 | 1 |
| 9 | Portable VLF transmitter | TX-27 | 1 |
| 10 | Generator for TX-27 | | 1 |



7.- MÉTODO DE EMISIÓN DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO (ECE)

A principios de los años 70 del siglo pasado se descubrió la existencia de numerosos campos electromagnéticos generados como resultado de las transformaciones mecanoeléctricas que se producen en los minerales y rocas de la corteza. Estos campos fueron denominados como “campo natural de impulsos electromagnéticos de la Tierra”.

7.1.- Principios teóricos

Consideremos una molécula de un mineral dieléctrico, vemos como dentro de la estructura cristalina, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas son coincidentes en ausencia de una influencia exterior, por lo que el momento dipolo de la molécula será igual a cero:

$$\bar{p} = q \cdot l$$

Donde:

q Magnitud de las cargas positivas o negativas iguales de la molécula; **l** Distancia entre los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas. Si aplicamos una deformación a la molécula, se produce una variación en la estructura atómica que varía los centros de gravedad de las cargas de los átomos, generando la aparición de un momento dipolo inducido el cual, es proporcional a la tensión de campo E:

$$\bar{p} = e_0 \cdot \alpha \cdot \bar{E} \quad (1)$$

Donde:

α coeficiente de polarización de la molécula; **e_0** constante eléctrica. Si analizamos la relación anterior, vemos como la polarización de una molécula depende únicamente de su volumen. De igual manera podemos ver como los minerales dieléctricos pueden polarizarse como consecuencia de la deformación de su estructura atómica o lo que es lo mismo, pasan a un estado en el que los momentos dipolo de cada volumen elemental ΔV son distintos de cero.

El efecto de la deformación o tensión mecánica sobre la estructura atómica de los minerales de la roca genera roturas y desplazamientos que rompen la neutralidad eléctrica de los dieléctricos sólidos (Warwick,1982). Este fenómeno es el causante de que estos dieléctricos sólidos sean capaces de concentrar cargas eléctricas y, con la deformación, emitir energía electromagnética, siendo esta, la principal fuente de impulsos electromagnéticos registrados con el sistema ECE.

Existen dos mecanismos de perturbación del estado eléctrico de los materiales dieléctricos: polarización eléctrica (aparición de un momento dipolo), y electrización (aparición de exceso de carga eléctrica). La aparición de momentos dipolares eléctricos en cristales dieléctricos está determinada por la migración de iones de la estructura cristalina en direcciones opuestas, al igual que ocurre en otro tipo de potenciales (potencial espontáneo, polarización inducida, etc.).

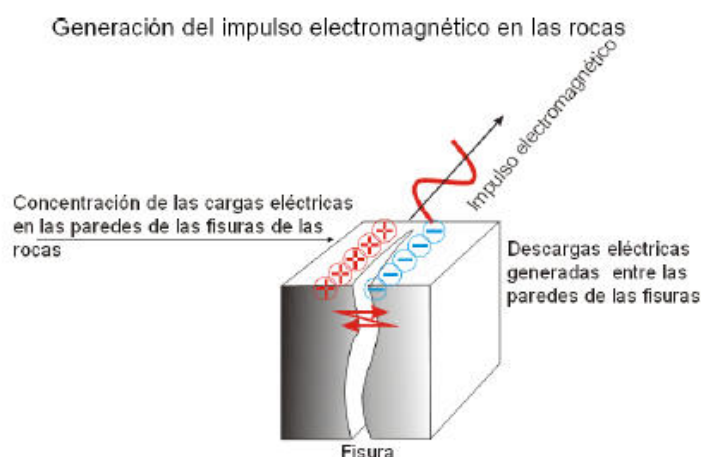


Figura 94. Fenómeno de polarización generado por fenómenos de deformación y rotura masiva de la estructura cristalina y partículas dieléctricas.

Este tipo de polarización se produce a parte de por fenómenos de deformación cristalina, a causa de (Warwick,1982):

- Deformación y rotura masiva de la estructura cristalina de partículas dieléctricas (Figura 94).
- Rotura de capilares llenos de líquido en los poros de los materiales.
- Fenómenos de filtración a través de capilares y flujo a través de los poros, el cual genera un potencial de electrofiltración.

Los procesos anteriores producen emisiones de tipo mecanoiónico (deformación y rotura de la estructura cristalina) y mecanoeléctricas (rotura de capilares y flujos de filtración en poros) que son registrables con el sistema ECE.

En condiciones naturales, la polarización y electrización de formaciones geológicas bajo fenómenos de deformación o tensión mecánica exterior depende de múltiples factores. Esta es la causa de que se considere que la estructura y naturaleza del campo electromagnético es compleja. Para la resolución del problema inverso, hemos de tener en cuenta que la señal registrada con el sistema ECE, es la sumatoria de la componente eléctrica y magnética del campo electromagnético.

En el caso de la componente eléctrica del campo secundario, esta se forma bajo la influencia de múltiples factores externos del medio (movimiento del aire, polvo, gotas de agua, hierba seca, etc.), muchos de los cuales, no están relacionados directamente con el campo de tensiones generado dentro del objeto emisor (anómalo). Esta influencia hace difícil la determinación de la señal útil respecto al fondo de interferencias existente dificultando la interpretación de las anomalías. Todo ello hace necesaria la aplicación de filtros que intenten eliminar o minimizar el efecto de estas interferencias (Glynn , 1987).

En el caso de la componente magnética del campo secundario, esta carece de la mayoría de interferencias que afectan al campo eléctrico lo cual, permite analizar las anomalías relacionadas con procesos tensodeformacionales del medio.



Por ello, el sistema ECE se basa el registro y análisis de la componente magnética del campo secundario de radiación electromagnética.

7.2 - Resolución del problema inverso

El potencial en una partícula dieléctrica polarizada uniformemente se determina a partir de la siguiente relación:

$$U = \int_V \frac{\rho}{r} dV + \int_S \frac{\sigma}{r} dS \quad (2)$$

Donde ρ y σ representan la densidad volumétrica y superficial de las cargas. Teniendo en cuenta las condiciones iniciales del problema (delimitación del volumen elemental dV), es necesario excluir el segundo sumando, el cual determina los procesos que tienen lugar fuera de los límites del foco emisor de impulsos electromagnéticos.

Por tanto, para la solución del problema inverso, se puede utilizar la integral que determina la suma de momentos dipolos elementales emisores dentro de un volumen limitado. Si tenemos en cuenta que la zona sometida a deformación ocupa un volumen V , para un determinado momento de tiempo dt , se puede determinar un sistema infinito de dipolos eléctricos elementales con los ejes de los momentos dipolares situados de forma regular.

Por lo tanto, $P \cdot dV$ es el momento bipolar del volumen infinitesimal dV . Para un instante determinado, el volumen del cuerpo polarizado es V y el vector de densidad de corriente es p , el cual se determina como dP . En este caso, el potencial U en punto M situado a una distancia r del volumen dV del cuerpo polarizado, se define como:

$$U_M = p \int_V \frac{\cos(\theta)}{r^2} dV \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo formado entre las direcciones del vector de densidad de corriente p y del radiovector r medido desde el centro de dipolo hasta el punto M en la superficie.

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (4)$$

Omitiendo las operaciones de la diferenciación particular de la función potencial en diferentes direcciones, pasamos a la componente del vector de tensión de la componente magnética de ECE. La diferenciación se realiza según las coordenadas de los puntos de observaciones (x, y, z) , y la integración según las coordenadas del cuerpo (x', y', z') . Por esta razón lo podemos resolver bajo una integral. En este caso, para objetos tridimensionales, obtenemos tres componentes de tensión de ECE:



$$\begin{aligned} H_x^E &= p_x \int_V \frac{2(x-x')^2 - (y-y')^2 - (z-z')^2}{r^5} dV + 3p_y \int_V \frac{(x-x') \cdot (y-y')}{r^5} dV + 3p_z \int_V \frac{2(x-x') \cdot (z-z')}{r^5} dV, \\ H_y^E &= p_y \int_V \frac{2(y-y')^2 - (x-x')^2 - (z-z')^2}{r^5} dV + 3p_x \int_V \frac{(x-x') \cdot (y-y')}{r^5} dV + 3p_z \int_V \frac{2(y-y') \cdot (z-z')}{r^5} dV, \\ H_z^E &= p_z \int_V \frac{2(z-z')^2 - (x-x')^2 - (y-y')^2}{r^5} dV + 3p_x \int_V \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{r^5} dV + 3p_y \int_V \frac{2(y-y') \cdot (z-z')}{r^5} dV. \end{aligned} \quad (5)$$

Para los cuerpos en dos dimensiones las formulas de tensión son:

$$\begin{aligned} H_x^E &= -2p_x \int_S \frac{(z-z')^2 - (x-x')^2}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS + 4p_z \int_S \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS, \\ H_z^E &= 2p_z \int_S \frac{(z-z')^2 - (x-x')^2}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS + 4p_x \int_S \frac{(x-x') \cdot (z-z')}{[(x-x')^2 + (z-z')^2]^2} dS. \end{aligned} \quad (6)$$

Actualmente, para el análisis de anomalías con el método de ECE, se emplea el equipo de registro (ADONIS 32M) que permite el registro simultáneo de la frecuencia de impulsos y la emisión máximas. La cantidad de impulsos ECE generados por unidad de tiempo es directamente proporcional a la tensión del campo electromagnético. La amplitud, tal y como se ve en las formulas anteriores (5 y 6), se determina a partir de la magnitud y dirección del vector de densidad de corriente generada a causa de los efectos mecanoeléctricos dentro de objetos anómalos sometidos a deformación. Los parámetros geométricos de la anomalía así como su relación con la distribución de dipolos elementales se describen con funciones integrales.

7.3 - Registro de Sondeos

El sistema permite, con ayuda de una sonda especial, testificar sondeos. Este tipo de mediciones son muy útiles, ya que permiten establecer la profundidad a la que se emplaza la superficie de rotura (deslizamiento): superficial, profundo, y a favor de varias superficies de rotura deslizamientos complejos). Además, se puede realizar un seguimiento de los mismos, lo cual permite caracterizar y determinar el proceso genético del macizo para prever el desarrollo y tomar medidas de protección.

En los gráficos inferiores (Figura 95) se muestra la distribución de los impulsos electromagnéticos en función de la profundidad, caracterizando de esta forma el grado de deformación de los materiales y las superficies de deslizamiento:

- Superficial,
- Profundo,
- Deformaciones complejas

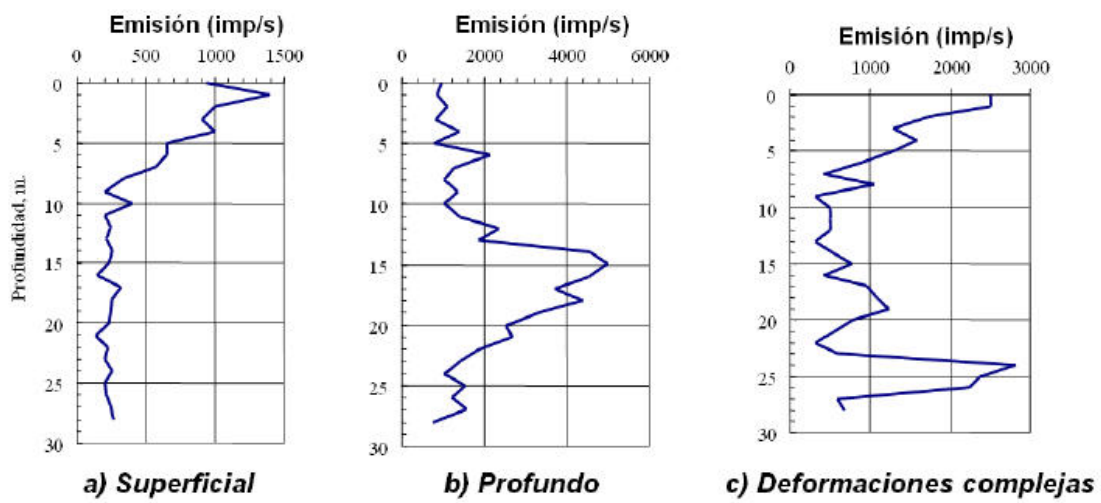


Figura 95. Testificación de sondeos. Distribución de impulsos electromagnéticos en función de la profundidad para diferentes tipologías de deslizamientos realizados en el embalse de Beninar (Almería)



8.- SOFTWARE

Los sistemas de información se han convertido en herramientas muy efectivas de la ingeniería y de las ciencias básicas. A lo largo de los años se han desarrollado infinidad de programas que nos permiten, manipular, organizar, analizar y referenciar datos de manera más fácil y eficiente, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son prueba de ello.

Los SIG son un tipo especializado de sistemas que se distinguen por su capacidad de manejar información espacialmente georeferenciable y que permiten además su representación gráfica.

La manera de almacenamiento de la información es fundamental, dicha información puede ser muy variada, pues toma en cuenta características del mundo real, permite disponer de información tanto de cuerpos y figuras regulares que son bien representados por la geometría tradicional, como información que no podrá ser representada de manera clara y trivial. Si se considera que la mayoría de la información geofísica no es regular, entonces, estos sistemas representan una manera eficiente de organizar, manejar y manipular ésta información.

A continuación se especifican las herramientas SIG (Software) utilizadas para la realización del proyecto:

8.1.- Rockworks

RockWorks es la última versión del buque insignia Rockware. Es un programa para el análisis y visualizado de datos del subsuelo, cartografía, geología, modelos de yacimiento, manipulación de datos de pozos, estructurales, estratigráficos, geofísicos y geoquímicos, útil para estudios geotécnicos, mineros, petrolíferos, etc, etc ...

RockWorks ha sido durante mucho tiempo la norma en los sectores del petróleo, ambientales, geotécnicos, la minería y las industrias de visualización de datos del subsuelo a causa de instrumentos populares, tales como mapas, los troncos, las secciones transversales, valla diagramas, modelos sólidos y volumétricos.

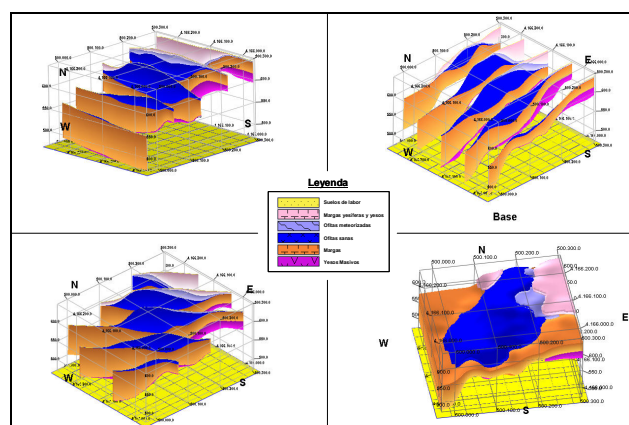


Figura 96. Visualización 3D de datos geológicos obtenidos mediante geofísica con Rockworks



8.2.- Surfer

Surfer es un programa diseñado por la empresa Golden Software para hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D para Windows únicamente. Con facilidad y rapidez, convierte los datos geofísicos en mapas con contorno, superficie, wireframe, vector, imagen y sombras. Virtualmente todos los aspectos de los mapas pueden ser personalizados para que produzcan exactamente la presentación que se desea.

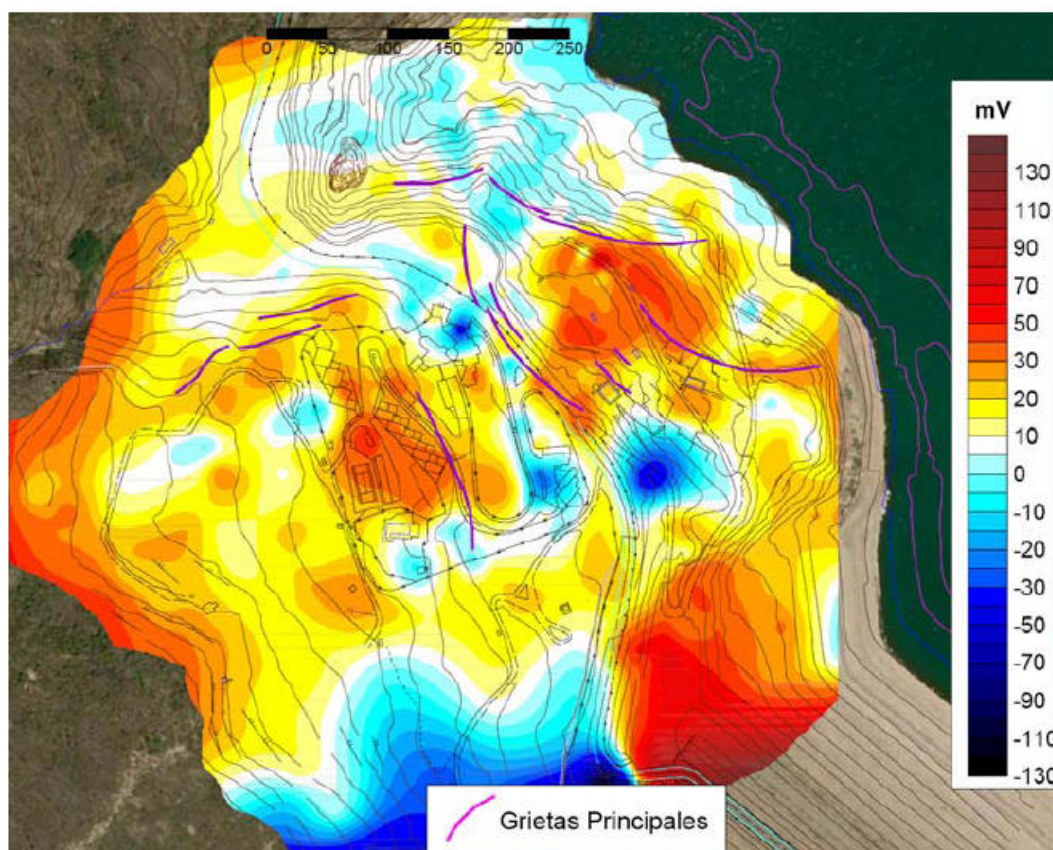


Figura 97. Mapa de contorno de PE creado con Surfer

8.3.- Voxler

Es un programa diseñado por la empresa Golden Software de gran alcance, rápido, con imágenes personalizadas en 3D de datos. Importa fácilmente datos en una multitud de formatos de archivo para crear impresionantes gráficos para explorar las relaciones en un conjunto de datos. Este robusto, pero fácil de usar programa da el poder para mostrar los datos en una variedad de formatos y colores.

Voxler toma los datos en bruto, complejos y los modela en un rico entorno interactivo y visual 3D. La versión actualizada permite visualizar rápidamente y examinar datos. Se Pueden filtrar anomalías, duplicados, o áreas que se desean eliminar.

Interactivamente permite manipular los datos al mismo tiempo que verse los resultados.

Las características incluyen: isosuperficies, los volúmenes prestados, contornos, campos de altura, líneas de flujo, diagramas de vectores, diagramas de dispersión, las imágenes orto y oblicua, aviones clip, anotaciones y texto, los ejes, la caja, grillado 3D, más operaciones de cálculo, añadiendo luz a una escena, importación / exportación de varios formatos de archivos, automatización, captura de vídeo, y mucho más.

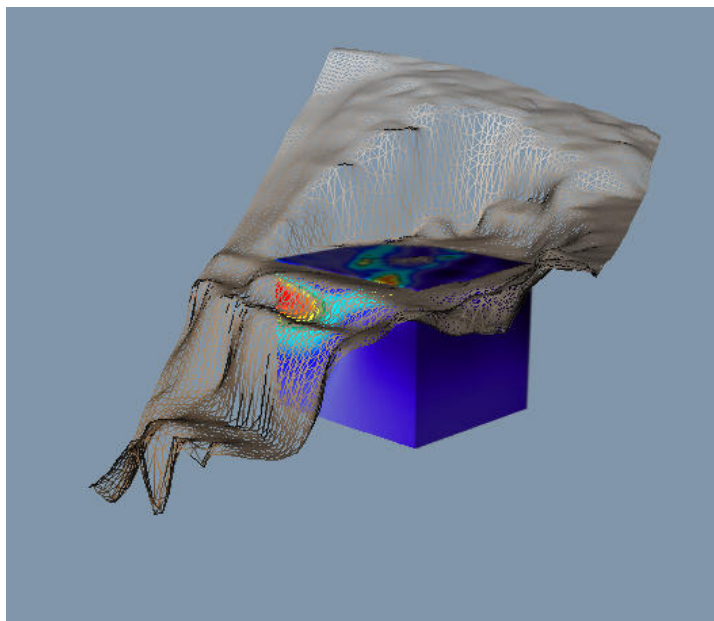


Figura 98. Bloque 3D creado a partir de datos de Tomografía eléctrica con Voxler para la localización de fugas

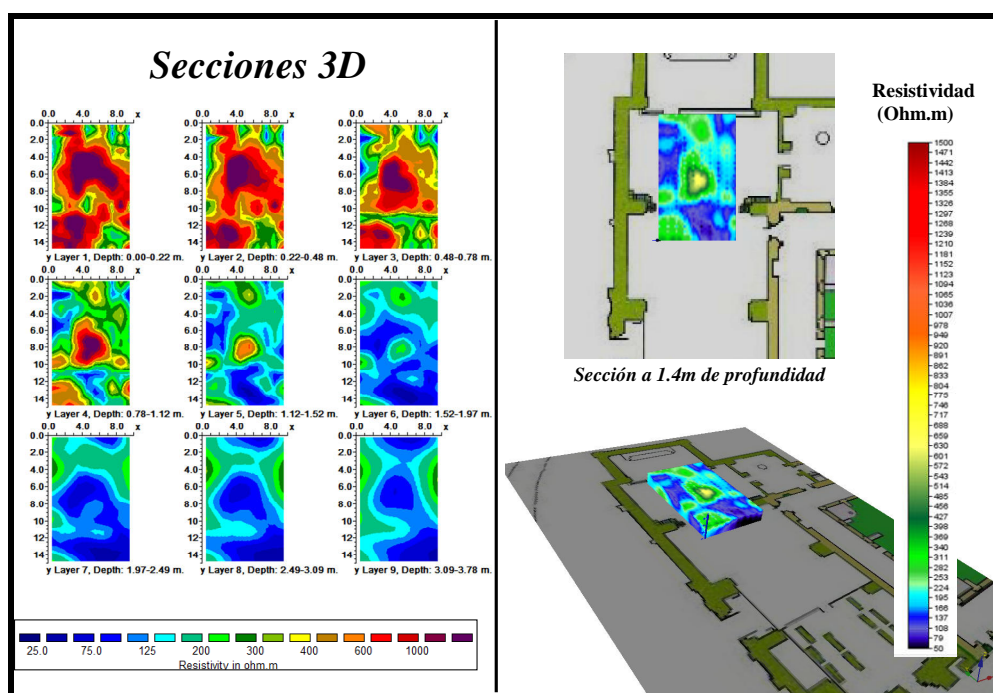


Figura 99. Bloque 3D creado a partir de datos de Tomografía eléctrica con Voxler para la detección de restos arqueológicos



8.4.- SketchUp

SketchUp es un programa informático de diseño y modelaje en 3D para entornos arquitectónicos, ingeniería civil, diseño industrial, GIS, videojuegos o películas. Es un programa desarrollado y publicado por Google.

Google SketchUp es un conjunto de potentes funciones y aplicaciones para profesionales del diseño y la ingeniería. Permite construir increíbles modelos 3D de forma sencilla y rápida. SketchUp permite exportar tus construcciones a distintos formatos gráficos como JPG, BMP, TIFF, PNG.

La aplicación está pensada para subir modelos a Google Earth y así compartirlos con el resto de usuarios de este programa.

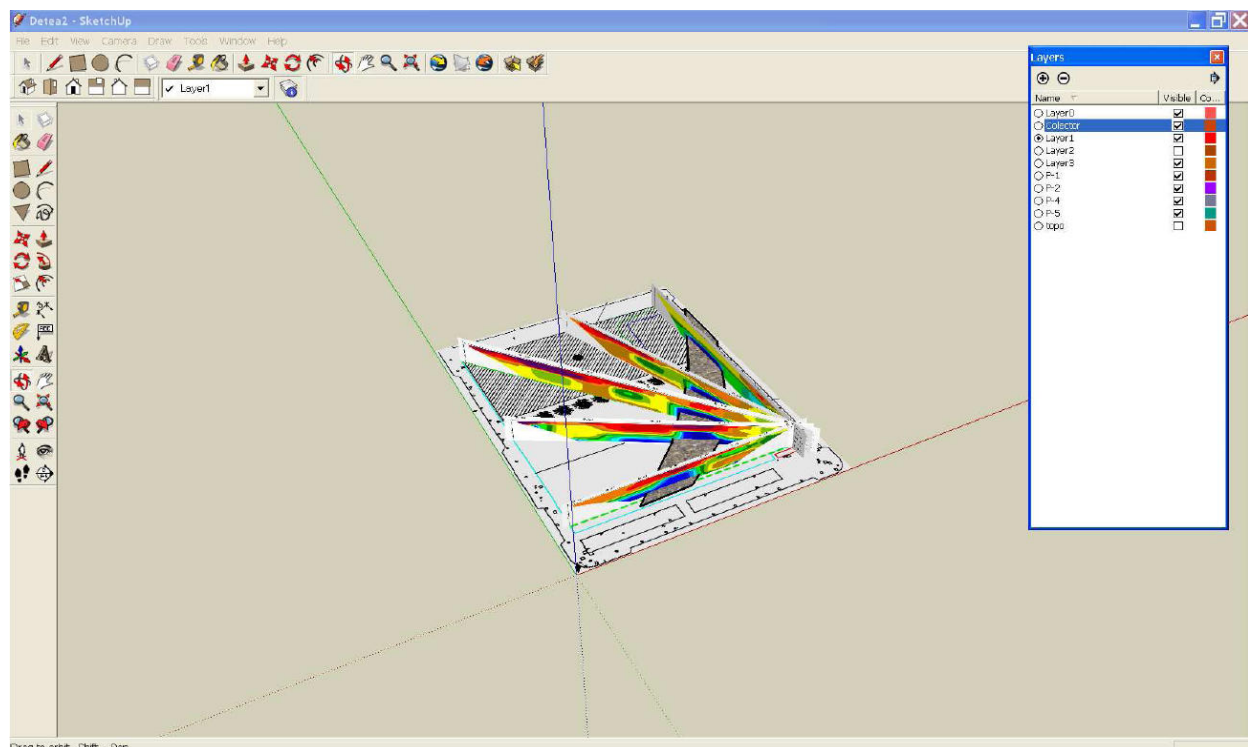


Figura 100. Modelo creado en SketchUp para la localización de un colector mediante tomografía eléctrica

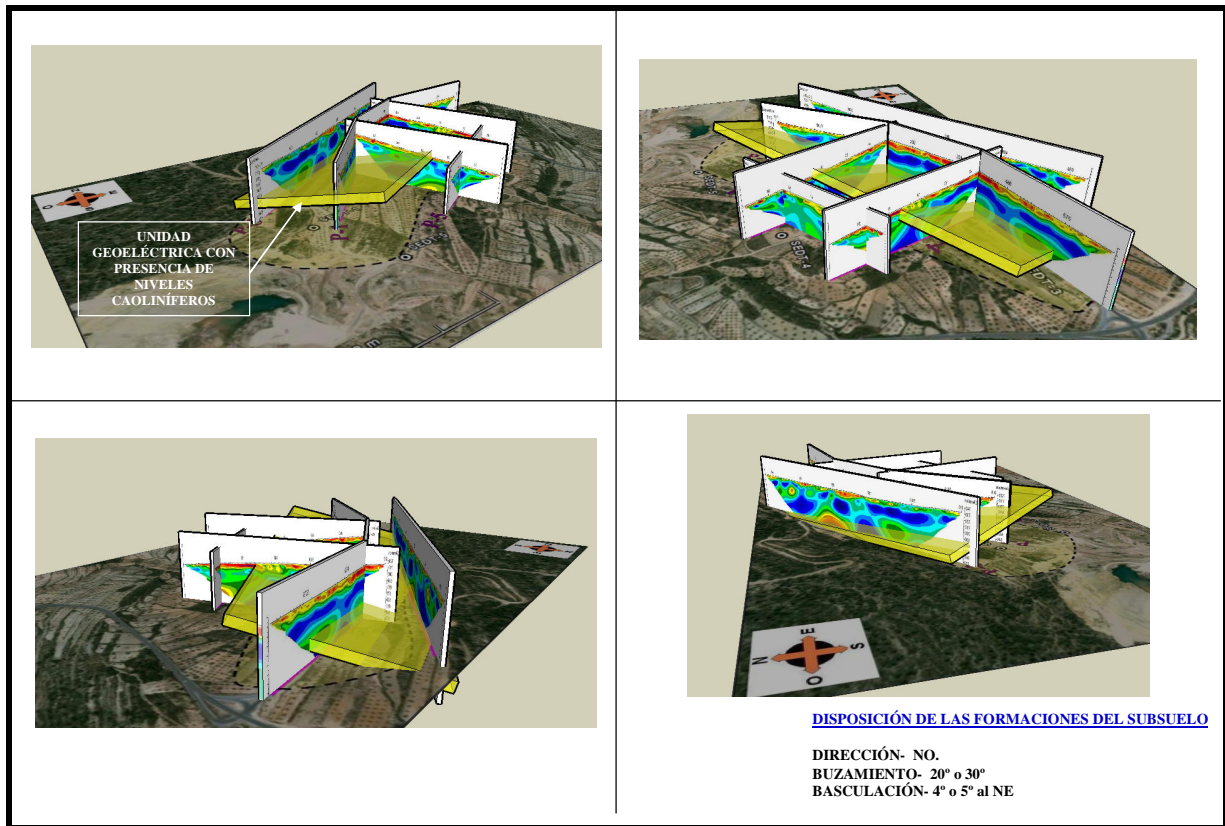


Figura 101. Modelo creado en SketchUp para la caracterización de un nivel con presencia de caolin.

8.5.- Google earth

Google Earth es un completísimo atlas interactivo en tres dimensiones. Las capas son el gran atractivo de Google Earth. Cada una añade a las imágenes del satélite una cantidad enorme de información: redes de carreteras, edificios en tres dimensiones, datos de tráfico y meteorología, lugares de interés e incluso fotografías de las calles en las ciudades donde Street View esté disponible. Además, permite la inclusión de tus propias capas.

No todo es explorar sin rumbo fijo. Google Earth puede guardar imágenes y marcadores para compartirlos en la red, así como imprimir lo que estés viendo. Con las herramientas de Google Earth, medir distancias o áreas es muy fácil. Además, es compatible con varios formatos de datos GPS. Además, en Google Earth hay incluso un sencillo simulador de vuelo.

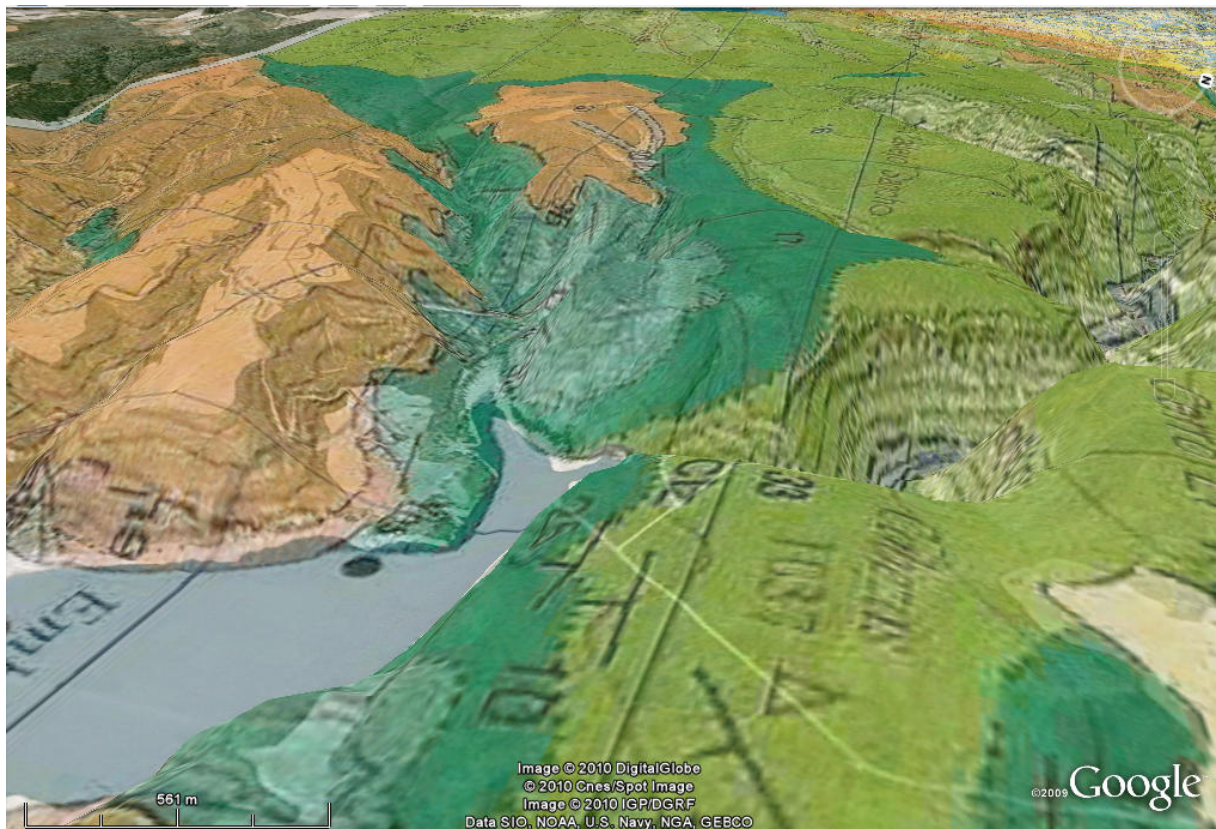


Figura 102. Visualización de capa geológica incluida en Google Earth.

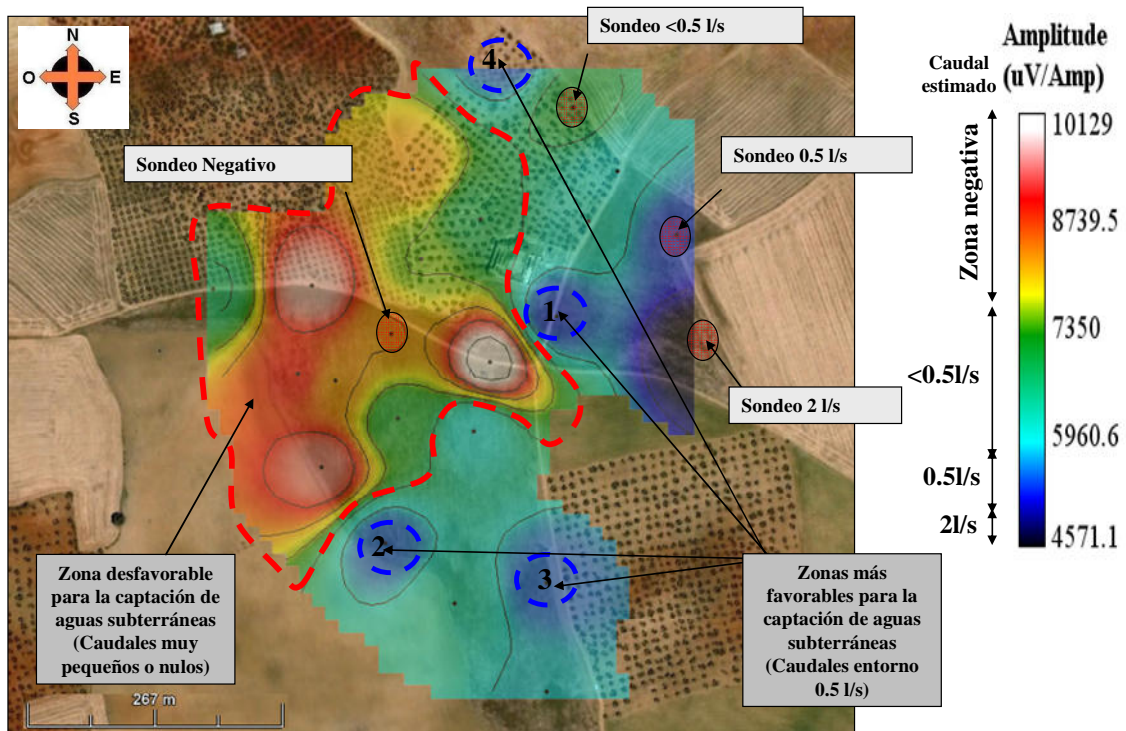


Figura 103. Planta de amplitudes superpuesta en Google Earth mostrando las zonas favorables para la ejecución de sondeos de extracción.



8.6.- ArcGIS

ArcGis es una serie integrada de software de Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un motor compilador de información geográfica alfanumérica (Bases de Datos) y gráfica (Mapas). El ámbito de acción de Arc Gis es muy amplio. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica.

En computadoras de escritorio, ArcGIS puede incluir:

- ArcReader, permite ver y consultar mapas creados con otros productos Arc.
- ArcView, permite ver datos espaciales, crear mapas en capas y realizar análisis espacial básico.
- ArcEditor, incluye herramientas más avanzadas para la manipulación de shapefiles y geodatabases.
- ArcInfo, incluye funcionalidades para la manipulación, edición y análisis de datos.

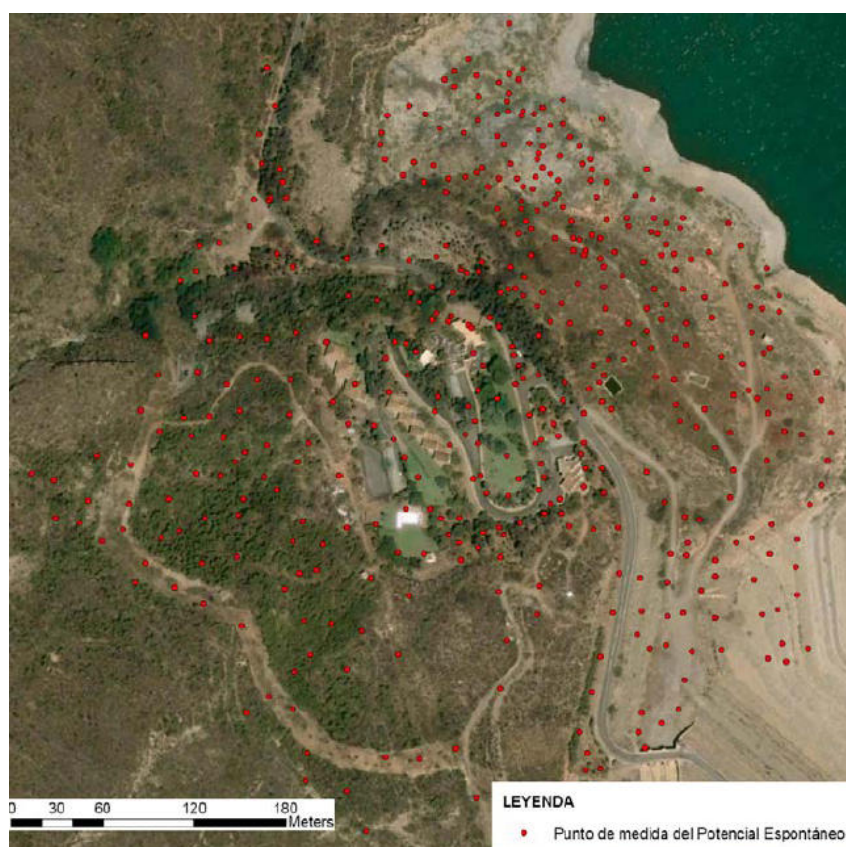


Figura 104. Visualización de los puntos de medidas reanalizados de Potencial espontáneo mediante programa ArcGis en una determinada zona de investigación.



8.7.- Autocad

Al igual que otros programas de diseño asistido por computadora, AutoCAD gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc) con la que se puede operar a través de una pantalla gráfica en la que se muestran éstas, el llamado editor de dibujo. La interacción del usuario se realiza a través de comandos, de edición o dibujo, desde la línea de órdenes, a la que el programa está fundamentalmente orientado. Las versiones modernas del programa permiten la introducción de éstas mediante una interfaz gráfica de usuario o en inglés GUI, que automatiza el proceso.

Como todos los programas y de DAC, procesa imágenes de tipo vectorial, aunque admite incorporar archivos de tipo fotográfico o mapa de bits, donde se dibujan figuras básicas o primitivas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.), y mediante herramientas de edición se crean gráficos más complejos. El programa permite organizar los objetos por medio de capas o estratos, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color y grafismo. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos.

Parte del programa AutoCAD está orientado a la producción de planos, empleando para ello los recursos tradicionales de grafismo en el dibujo, como color, grosor de líneas y texturas tramadas. AutoCAD, a partir de la versión 11, utiliza el concepto de espacio modelo y espacio papel para separar las fases de diseño y dibujo en 2D y 3D, de las específicas para obtener planos trazados en papel a su correspondiente escala. La extensión del archivo de AutoCAD es .dwg, aunque permite exportar en otros formatos (el más conocido es el .dxf). Maneja también los formatos IGES y STEP para manejar compatibilidad con otros softwares de dibujo.

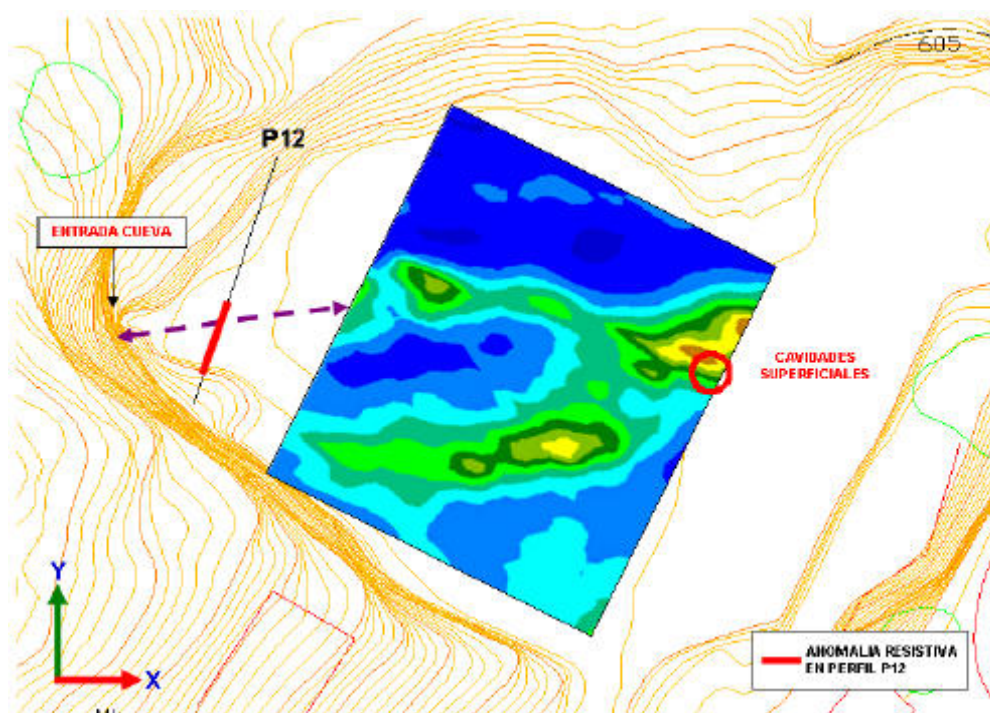


Figura 105. Georeferenciación de datos geofísicos mediante el programa Autocad



8.8.- Excell

Excel es una aplicación desarrollado por Microsoft y distribuido en el paquete Office para usarse en Windows y Macintosh. Excel se utiliza para la creación de hojas cálculo. El programa posee una interfaz intuitiva, con herramientas de cálculos y gráficos de muy fácil uso. Es uno de los programas más populares para realizar hojas de cálculos.

Sus trabajos son almacenados en archivos con extensión ".xls", aunque soporta otras extensiones como ".csv".

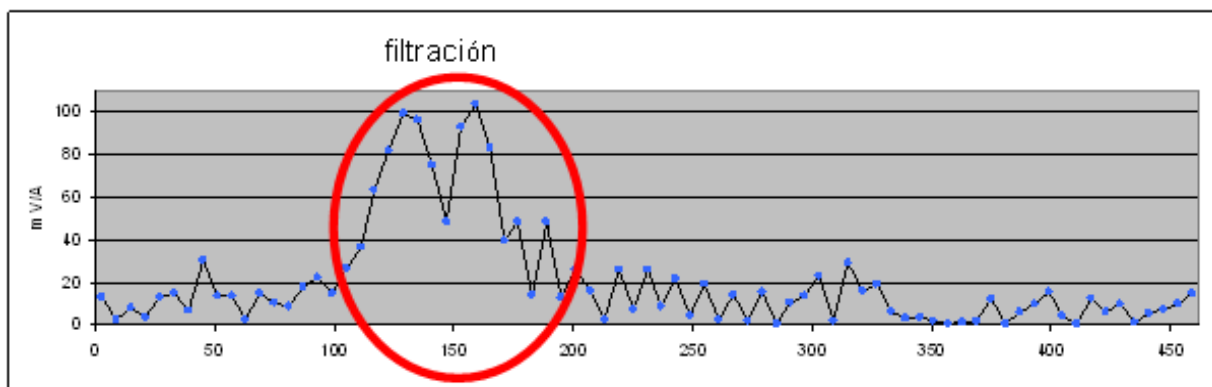


Figura 106. Creación de un perfil de la técnica misse a la msse (voltaje) mediante excell



**CAPÍTULO 3: INNOVACIÓN EN PROSPECCIÓN DE
ESTRUCTURAS HIDROGEOLÓGICAS PROFUNDAS Y
CARACTERIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE
ALMACENES GEOLÓGICOS DE CO₂ MEDIANTE LAS
TÉCNICAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
PROFUNDA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN
EL DOMINIO DEL TIEMPO.**



INDICE

CAPÍTULO 3: INNOVACIÓN EN PROSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS HIDROGEOLÓGICAS PROFUNDAS Y CARACTERIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE ALMACENES GEOLÓGICOS DE CO₂ MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PROFUNDA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

1.2.- Caracterización de almacenes geológicos de CO₂

1.2.1.- Almacenamiento Geológico de CO₂

1.2.2.- Selección de un almacenamiento en un acuífero salino

1.2.3.- Caracterización de un almacenamiento de CO₂

1.2.4.- Monitorización del CO₂

2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.- Fundamento teórico de la tomografía eléctrica

2.1.1.- Resistividad Aparente

2.1.2.- Dispositivos

2.1.3.- Resolución y profundidad de investigación

2.1.4.- Técnica de campo, procedimiento de medidas

2.1.5.- Pseudosección, procesado e inversión

2.1.6.- Equipo, dispositivo y material necesario

2.2.- Fundamento teórico del método electromagnético en el dominio del tiempo.

2.2.1.- Método de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo



2.2.2.- Fundamento básico del método SEDT

2.2.3.- Procesado de datos

2.2.4.- Equipo, dispositivo y material necesario

3.- REFLEXIONES FINALES

4.- EJEMPLOS DE PROSPECCIONES GEOFÍSICAS PROFUNDAD MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO. 150



1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

La demanda de agua en la sociedad moderna plantea la necesidad de explotar embalses subterráneos cada vez más profundos, debido a un proceso progresivo de sobreexplotación de los más superficiales y a fenómenos de contaminación derivados de la actividad industrial, ganadera, agrícola, etc. La localización de acuíferos profundos (1000 – 2000 metros) implica la realización de estudios hidrogeológicos exhaustivos previos a la delimitación del área de emplazamiento de las captaciones, habida cuenta del gasto económico que conlleva la realización de obras de estas características.

La tecnología constructiva de pozos ha avanzado considerablemente en los últimos años: es fácil en la actualidad encontrar máquinas que trabajan con rapidez y capacidad para efectuar sondeos de 1.000 metros de profundidad en medios detríticos o cársticos (Levante, Cuenca del Duero, Tajo, Guadalquivir, etc.), profundidades habitualmente demandadas. En este sentido la prospección hidrogeológica, en general, tiene que estar al día y particularmente la prospección geofísica, pues, en última instancia son los métodos geofísicos basados en el conocimiento geológico los encargados de establecer el modelo estructural y litológico para una determinada cuenca o zona en particular.

Dentro del ámbito de la prospección geofísica no abundan los métodos con capacidad resolutoria para realizar los estudios planteados. Por ello, se pretende destacar las técnicas de “Tomografía Eléctrica y Electromagnética” aplicada a la detección de estructuras profundas, detección y control de invasión salina, vulnerabilidad a la salinización, etc. Estas metodologías geofísicas son altamente resolutorias, rápidas y económicas comparándola con otros métodos, permitiendo solventar problemas con geología relativamente compleja. Obviamente, la calidad interpretativa de la sección (2D) o del bloque (3D) obtenidos en el procesado dependerá del nivel de conocimiento geológico-hidrogeológico de la zona.

1.2.- Caracterización de almacenes geológicos de CO₂

Como consecuencia de los informes del Panel Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (IPCC), de la Convención Marco de Naciones Unidas para el cambio climático y de la firma y ratificación del protocolo de Kioto, desde hace años se ha creado una conciencia social y política que ha llevado a los gobiernos a establecer políticas para disminuir las emisiones de CO₂.

Puede decirse que las empresas, y otras partes interesadas, han asumido la necesidad de luchar contra el Cambio Climático. A pesar del aparente fracaso de la cumbre de Copenhague, y de las crecientes preocupaciones por la crisis económica y el desempleo, siguen siendo claros los compromisos y las tendencias en el sector energético hacia una energía más limpia y baja en emisiones de CO₂.

En España nuestras actuaciones se enmarcan en las políticas comunitarias de los sucesivos paquetes comunitarios de energía. Es bien conocido el objetivo del triple veinte, 20% en mejoras en ahorro y eficiencia energética, 20% de energías renovables en energía primaria y 20% de reducción de emisiones de CO₂ donde se incluye la política



comunitaria sobre la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂.

Una panorámica del potencial de almacenamiento de CO₂, a escala europea, se llevó a cabo en el proyecto Geocapacity que realizó un primer análisis o filtrado de las formaciones posibles. España figura con un considerable potencial inicial en el contexto europeo para el almacenaje de CO₂.

En España existen varias iniciativas de empresas para el conocimiento de potenciales almacenamientos de CO₂ y su eventual desarrollo. También hay que mencionar los trabajos en el área de Hontomín, relacionado con el proyecto de Compostilla-Ciudad de la Energía (CIUDEN), los trabajos ya citados del proyecto Geocapacity y los que en la actualidad lleva a cabo el Instituto Geológico y Minero (IGME) para evaluar el almacenamiento de CO₂ en España.

1.2.1.- Almacenamiento Geológico de CO₂

El almacenamiento geológico de CO₂ es un método eficaz para limitar las emisiones de CO₂ de carácter industrial. El almacenamiento en acuíferos salinos es el método más adecuado en el caso español. El almacenamiento de CO₂ en estructuras geológicas consiste en inyectar CO₂ supercrítico (estado líquido) en los acuíferos profundos, rocas porosas y permeadas que contienen agua de alta salinidad. Para servir como almacén, estos acuíferos deben estar acotados superiormente por capas de roca impermeable que actúan como sello. Con el tiempo, el dióxido de carbono se disolverá en el agua de la formación almacén (salmuera), precipitará formando minerales y ocupará el espacio poroso.

1.2.2.- Selección de un almacenamiento en un acuífero salino

Las posibles formaciones almacén están constituidas por rocas porosas y permeables (para que sea fácil inyectar) que contienen un fluido salino, salmuera (si contuviesen agua dulce se podría estar arruinando un recurso potencial). Además, conviene que se encuentren estructuralmente aisladas (para dificultar el escape de CO₂) y a profundidades mayores que las formaciones que contienen agua dulce (para reducir el riesgo de contaminación).

También es necesario que la zona sea tectónicamente estable (para asegurar la estabilidad mecánica). Conceptualmente, el almacenamiento de CO₂ en este tipo de formaciones pretende reproducir las condiciones en las que de forma natural se almacenan los hidrocarburos y el propio CO₂, procedente de la actividad volcánica o de la maduración de carbón y otros compuestos orgánicos, en rocas sedimentarias.

Por tanto, la selección de una planta de almacenamiento de CO₂ en acuíferos salinos implica localizar formaciones geológicas que tengan dichas propiedades. Asegurarlo requiere estudios previos. En estos estudios previos es donde se enmarca la posible actuación de las técnicas geofísicas.



Las características deseadas del acuífero son las siguientes:

- Tener una porosidad y salinidad adecuadas (respectivamente, por encima del 10% y de 10 g/l).
- Existencia de una capa suprayacente, impermeable al paso del CO₂.
- Estar ubicadas en áreas geológicamente estables.
- Tener un tamaño (potencia y extensión) lo suficientemente grande como para almacenar la cantidad de CO₂ planeada.
- Estar a profundidad suficiente. Normalmente sólo las formaciones por debajo de los 800m permiten el almacenamiento de CO₂ en estado supercrítico.

De cara a la estimación de la salinidad del acuífero (> 10g/l), esta puede ser calculada mediante la utilización de las técnicas geofísicas de TE y SEDT mediante el parámetro resistividad tal y como se expone a continuación:

La resistividad de un acuífero depende de la resistividad del agua que contiene y su factor de formación de la siguiente forma:

$$\rho_0 = \rho_w \cdot F$$

Donde:

ρ ACUIFERO (ρ_0)
 ρ AGUA (ρ_w)

F (Factor de formación) $F = a \cdot \Phi^{-m}$

Donde:

a constante empírica
 Φ porosidad
m Factor de la cementación

Para una formación en concreto como somos capaces de medir su resistividad mediante TE o SEDT podemos conocer su salinidad. A continuación se expone una demostración teórica tomando como base que nuestra roca almacén se encuentra en la formación UTRILLAS:



| Parámetros UTRILLAS | | | | |
|--|----------------------|-----------------|---------------------------|------------|
| Φ_{MEDIA} 12.9% | | | | |
| Cálculo Factor de formación Utrillas | | | | |
| Φ | $F=0.62/\Phi^{2.15}$ | $F=0.81/\Phi^2$ | MEDIA | |
| 0.1 | 87.58 | 81.00 | 84.28866388 | |
| 0.122 | 57.11 | 54.42 | 55.7658148 | |
| 0.129 | 50.66 | 48.67 | 49.66506677 | |
| 0.137 | 44.51 | 43.16 | 43.83235915 | |
| 0.14 | 42.48 | 41.33 | 41.90482572 | |
| 0.15 | 36.63 | 36.00 | 36.31325265 | |
| Cálculo ρ ACUIFERO (ρ_0) de formación Utrillas | | | | $T^a = 74$ |
| Salinidad (g/l) | Salinidad (ppm) | ρ_w | $\rho_0 = \rho_w \cdot F$ | |
| 5 | 5005.70 | 0.49 | 24.33588272 | |
| 10 | 10011.40 | 0.27 | 13.16124269 | |
| 15 | 15017.10 | 0.17 | 8.194736017 | |
| 20 | 20022.80 | 0.14 | 6.853779214 | |
| 50 | 50057.00 | 0.06 | 3.128899206 | |
| 100 | 100114.00 | 0.04 | 1.787942404 | |
| 1 gr/l = 1001.14 ppm | | 1001.14 | | |

Figura 107. Calculo de las resistividades de la formación Utrillas para diferentes salinidades del acuífero a una temperatura de 74°C.

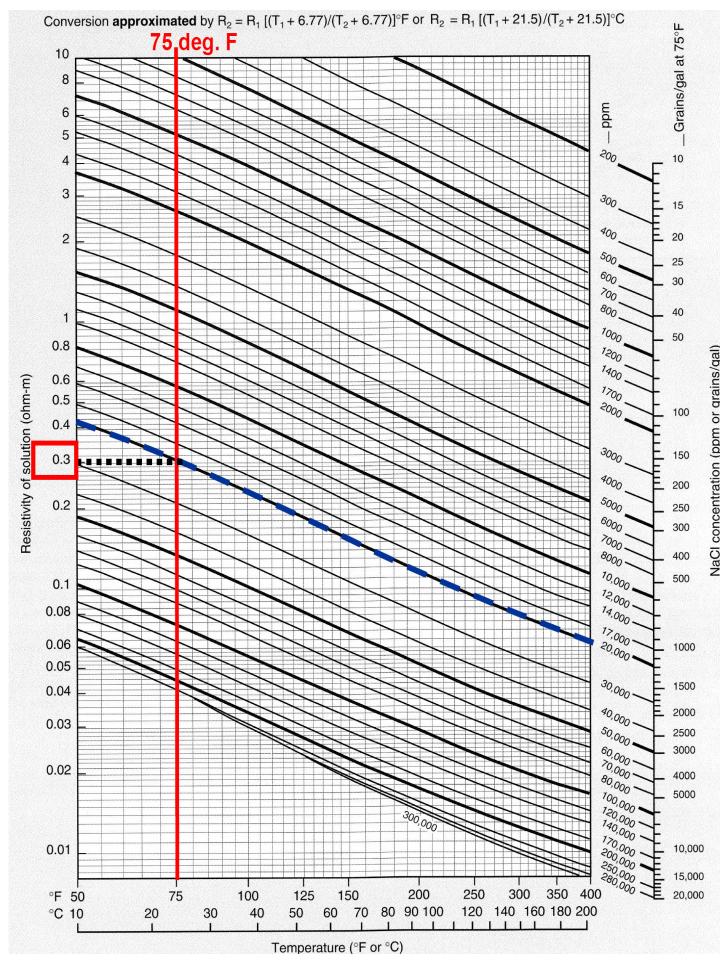


Figura 108. Gráfica que nos relaciona la Resistividad de la formación con su temperatura y su salinidad (<http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro05/Introduction/TermProjects/fortson.htm>)

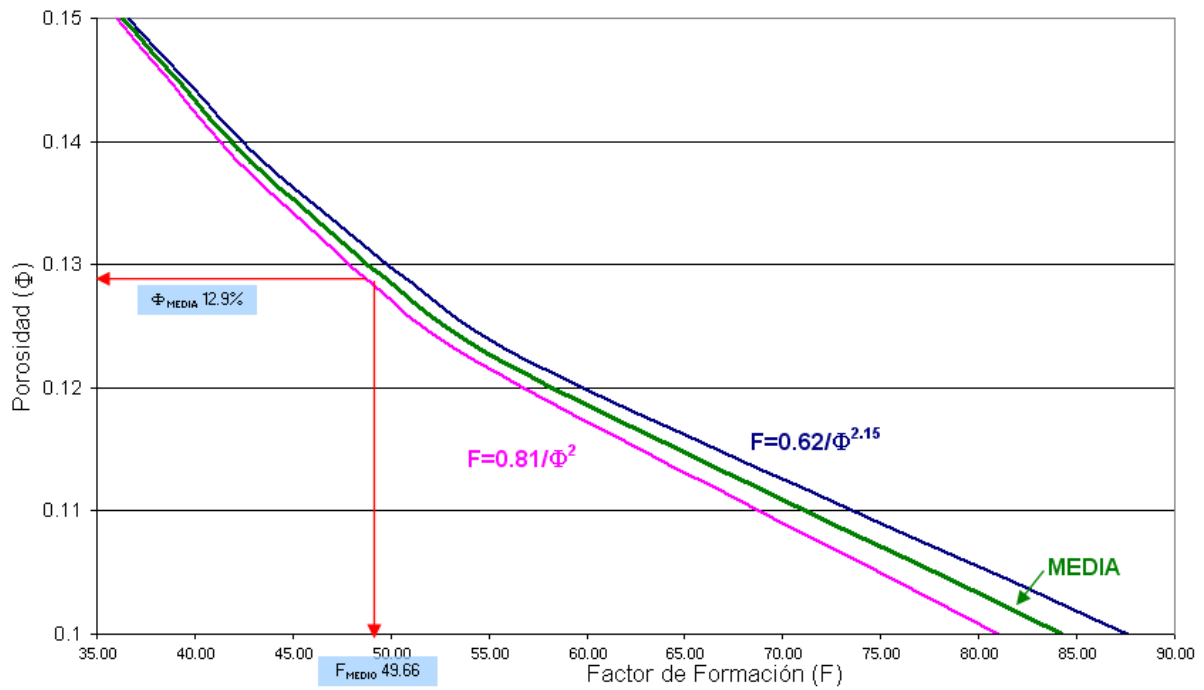


Figura 109. Grafica que representa el cálculo del factor de formación (Utrillas)

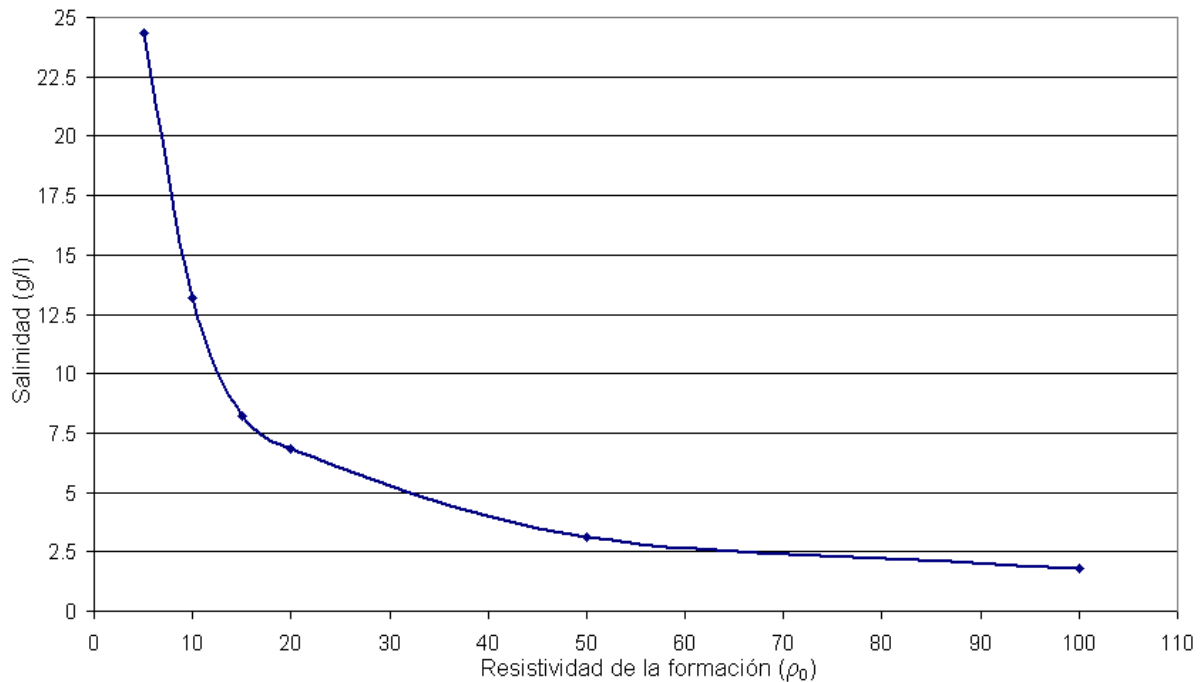


Figura 110. Grafica Salinidad vs Resistividad e la formación (Utrillas)

Como se puede observar el cálculo de la salinidad mediante el parámetro resistividad es perfectamente posible. Las mayores complicaciones se encuentran en la



estimación de las variables del factor de formación, que pueden llevarnos a obtener grandes errores en nuestros cálculos. Para evitarlo, se realizarán medidas en puntos donde los parámetros del acuífero son conocidos y así poder asegurar que las estimaciones son correctas en toda el área de estudio.

Este método para el cálculo de la salinidad de un acuífero es un sistema de trabajo "no invasivo y ambientalmente benigno" con el terreno que proporciona mucha información y costes despreciables si lo comparamos con los sondeos mecánicos, que se utilizan actualmente.

1.2.3.- Caracterización de un almacenamiento de CO₂

En general, los métodos y técnicas para la caracterización de un almacenamiento de CO₂ que se están utilizando actualmente son:

- Estudios geológicos de superficie: estructurales, petrológicos, sedimentológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, hidrogeoquímicos, de emisión de gases.

- Estudios Geofísicos. Las técnicas geofísicas representan una cartera de herramientas sofisticadas que pueden ser usadas para mapear propiedades físicas y químicas del terreno.

- Sondeos. Registros geológicos (testigos de sondeos y ripios de perforación)

En la presente tesis se ha ampliado la profundidad máxima de investigación de metodologías geofísicas electromagnéticas y eléctricas que permiten la caracterización de almacenamientos de CO₂ y su monitorización. Estos métodos son un sistema de trabajo "no invasivo y ambientalmente benigno" con el terreno que proporciona "muchísima información y costes más reducidos que los métodos sísmicos y sondeos mecánicos", que se utilizan actualmente.

1.2.4.- Monitorización del CO₂

Una vez comience la inyección del CO₂ se necesitará realizar un seguimiento del CO₂ en los acuíferos.

Mediante las técnicas geofísicas de TE y SEDT profundas se podría realizar la monitorización del CO₂ ya que cuando se produce un aumento de CO₂ bajo tierra, "se produce un aumento de la resistividad" del terreno. La resistividad (parámetro medido por estas técnicas) es "la oposición al paso de la corriente eléctrica" que tiene un elemento. Si aumenta el dióxido de carbono en una determinada zona, como por ejemplo, el lugar donde se va a inyectar para evitar su emisión a la atmósfera, el gas desplaza a otros componentes que se encontraban en el subsuelo, como puede ser una reserva acuífera. El agua es mejor transmisor de electricidad que el CO₂, por lo que analizando la capacidad del terreno para transmitir la corriente (resistividad), se puede deducir una mayor o menor presencia de dióxido de carbono.

A continuación se exponen ejemplos teóricos de la monitorización de almacenes geológicos de CO₂ mediante el parámetro resistividad:



Los sistemas electromagnéticos y eléctricos, son de utilidad en la detección del proceso de inyección y aumento de la saturación en gas en la formación de interés debido al cambio en la resistividad que se produce durante dicho proceso.

Se puede adaptar la Ley de Archie (relación entre la resistividad que presenta el agua del acuífero con la de la roca encajante en función de los parámetros de dicha formación (porosidad, cementación, etc.) para obtener la resistividad de la roca en función del grado de saturación en CO₂.

Ley de Archie adaptada (Berkeley National Laboratorio, California, USA):

$$\rho_{roca} = (1 - S_g)^{-2} * \Phi^{-2} * \rho_{agua}$$

Donde:

ρ resistividad

Φ es la porosidad

S_g es la saturación en gas

Tomando esta fórmula, podemos calcular los cambios en la resistividad de la roca almacén variando la porosidad y saturación en gas en el mismo.

Imaginemos que nuestro acuífero de inyección se encuentra en la formación UTRILLAS:

La grafica inferior muestra la variación en la resistividad de la roca almacén ($\Omega \cdot m$) en función de la variación en la saturación en gas (S_g) fijando la porosidad (Φ) en un 20% y la resistividad del agua en 0,35 $\Omega \cdot m$ la cual equivale a una salinidad de 10 g/l.

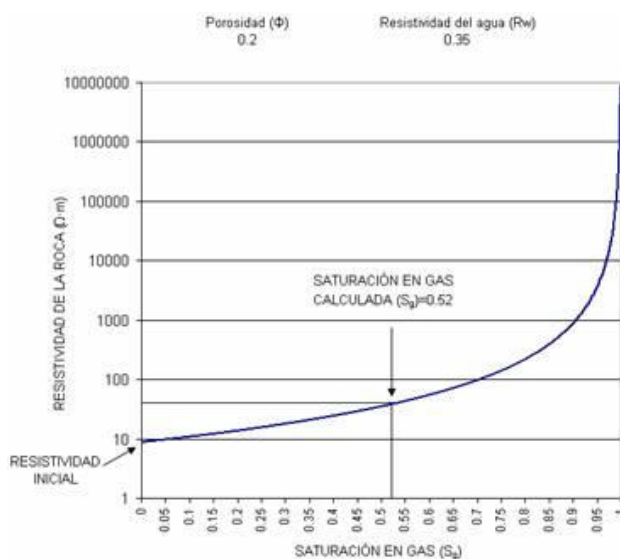


Figura 111. Variación en la resistividad de la roca almacén ($\Omega \cdot m$) en función de la variación en la saturación en gas (S_g) (F.Utrillas)



La resistividad que presentará la F.Utrillas inicial (sin CO₂) es de 8,75 $\Omega\cdot m$. SI inyectamos CO₂ hasta la saturación estimadas por nosotros (0,52) vemos que se producirá un aumento notable en resistividad de la formación alcanzando los 38 $\Omega\cdot m$.

Si repetimos este análisis variando la salinidad del agua de la formación, obtenemos los siguientes resultados:

| Salinidad (gr/l) | Resistividad del agua acuifero (R_w) en $\Omega\cdot m$ | Resistividad inicial de la formación (R_0) en | Resistividad de la formación (R_0) con una saturación en CO ₂ de 0.52 |
|------------------|---|---|--|
| 10 | 0.35 | 8.75 | 37.97 |
| 20 | 0.19 | 4.75 | 20.61 |
| 30 | 0.13 | 3.25 | 14.1 |
| 40 | 0.1 | 2.5 | 10.85 |
| 50 | 0.085 | 2.12 | 9.22 |

Tabla 3. Tabla de resultados (F.Utrillas)

Como podemos observar, los cambios en la resistividad que se producen con la inyección del CO₂ en la formación almacén son notables, cuadruplicando los valores de resistividad inicial.

En un segundo caso, nuestro acuífero de inyección se encuentra en la formación BOÑAR:

Aunque la ley de Archie no es directamente aplicable a carbonatos, podemos emplear la formulación anterior como aproximación, variando únicamente los valores de porosidad de este tipo de rocas. En este caso, suponemos una porosidad (Φ) en un 6.5 % y la resistividad del agua en 0,35 $\Omega\cdot m$ la cual equivale a una salinidad de 10 g/l.

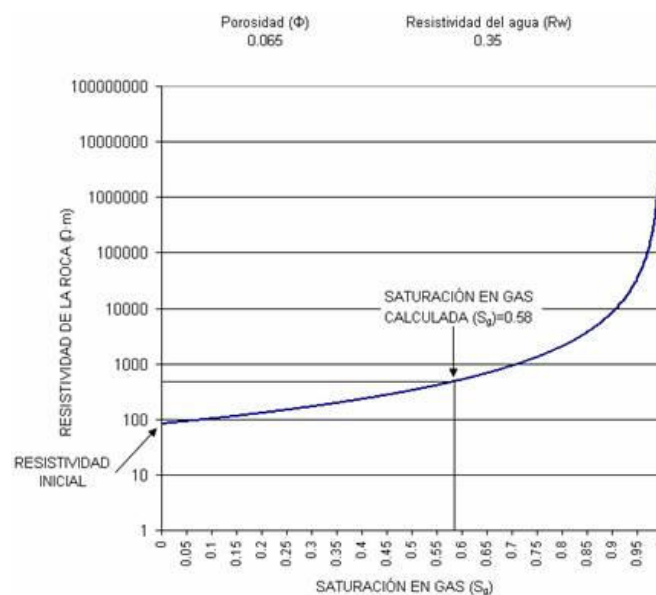


Figura 112. Variación en la resistividad de la roca almacenada ($\Omega\cdot m$) en función de la variación en la saturación en gas (S_g) (F.Boñar).



La resistividad que presentará la F.Boñar inicial (sin CO₂) será de 82,84 Ω ·m. SI inyectamos CO₂ hasta la saturación estimada por nosotros para esta formación (0,58) vemos que se producirá un aumento notable en resistividad de la formación alcanzando los 359,54 Ω ·m.

Si repetimos este análisis variando la salinidad del agua de la formación, , podemos obtener los siguientes resultados:

| Salinidad (gr/l) | Resistividad del agua acuifero (R_w) en Ω ·m | Resistividad inicial de la formación (R_0) en | Resistividad de la formación (R_0) con una saturación en CO ₂ de 0.52 |
|------------------|---|---|--|
| 10 | 0.35 | 82.84 | 359.54 |
| 20 | 0.19 | 44.97 | 195.18 |
| 30 | 0.13 | 30.76 | 133.54 |
| 40 | 0.1 | 23.66 | 102.7 |
| 50 | 0.085 | 20.11 | 87.32 |

Tabla 4. Tabla de resultados (F.Boñar)

Al igual que en el caso anterior, los cambios en la resistividad que se producen con la inyección del CO₂ en la formación almacén son notables, cuadruplicando los valores de resistividad inicial.

Los cambios en la resistividad debidos al proceso de inyección son elevados lo que permite emplear sistemas de investigación electromagnéticos y eléctricos como sistemas de análisis y monitorización.

2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las técnicas de tomografía eléctrica y electromagnética son metodologías prospectivas empleadas en la actualidad de forma habitual en la resolución de problemas ambientales, edificación, obra civil, arqueología e hidrogeología, entre otros campos, para profundidades de investigación inferiores a 200 metros. Sin embargo, con los equipos y dispositivos de campo adecuados se pueden llegar a resolver en la mayoría de los casos problemas geológicos profundos (> 1000 metros).

A continuación se exponen de forma breve los principios teóricos básicos de dichas técnicas, se describe el procesado e inversión de los datos de campo, y se concluye resumiendo las experiencias de una serie de trabajos realizados en diferentes ambientes.

2.1.- Fundamento teórico de la tomografía eléctrica

El método de la tomografía eléctrica en dos y tres dimensiones es una técnica de investigación basada en la medida de la resistividad para la caracterización del subsuelo, modelización estructural, localización de anomalías complejas, etc, donde el empleo de otras técnicas no permite obtener información de detalle en 2D y 3D (Griffiths y Barker 1993).



La Tomografía Eléctrica consiste en medir la resistividad aparente con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos denominada “a”, e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que el resultado final será una sección de resistividades aparentes a varios niveles “n” en profundidad; datos que posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión.

La Inversión de los datos de las medidas en campo nos da como resultado una “Imagen de resistividades y profundidades reales” y a través de la interpretación se puede llegar a establecer el modelo morfoestructural para una zona determinada. Lógicamente, la calidad interpretativa de la sección (2D) o bloque (3D) dependerá del nivel de conocimiento geológico-hidrogeológico.

2.1.1.- Resistividad Aparente

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en Tomografía Eléctrica y la que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.

Esta definida por la ecuación:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Donde K es la constante de normalización de cada dispositivo o factor geométrico, ΔV es la diferencia de potencial medido sobre el terreno e I la corriente inyectada al mismo.

2.1.2.- Dispositivos

Un dispositivo es una disposición de elementos formada por dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente continua al terreno, midiendo su intensidad, y a través del segundo par se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1P2. Existen dispositivos donde uno o dos electrodos se conectan a una distancia lo suficientemente grande (infinito), no incidiendo en el área de las medidas.

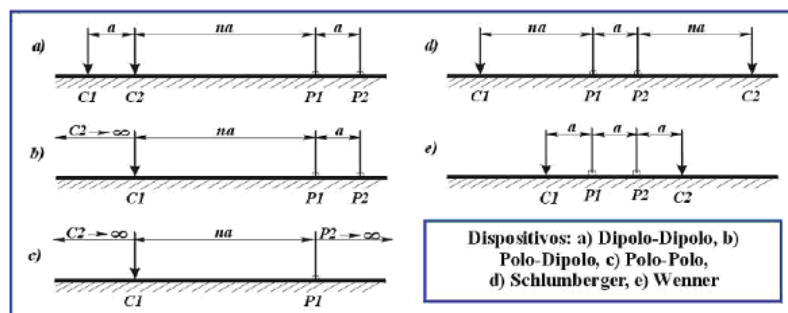


Figura 113. Diferentes dispositivos usados en Tomografía Eléctrica (Loke, 2002).



Los dispositivos más usados comúnmente para determinaciones de resistividad se muestran en la Figura 113.

En la práctica, los dispositivos más usados para la obtención de imágenes de Resistividad Eléctrica en 2D y 3D son a)Dipolo-Dipolo, b)Wenner-Schlumberger, c)Wenner, d)Polo-Polo y d)Polo-Dipolo.

Para la elección de un determinado dispositivo deben considerarse los siguientes factores: la profundidad de investigación, sensibilidad del dispositivo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad, densidad horizontal de datos y la relación señal ruido.

2.1.3.- Resolución y profundidad de investigación

La profundidad de investigación y la resolución buscada determinan la separación interelectrónica “a”, la cual puede variar por lo general desde fracciones de metro hasta 200 metros (o aún más en casos excepcionales). En aplicaciones profundas se toman distancias interelectrónicas de 50 a 100 metros, como medida más usual.

2.1.4.- Técnica de campo, procedimiento de medidas

La toma de medidas con el método de la Tomografía Eléctrica se efectúa comúnmente usando un número grande de electrodos, 25 o más, conectados a un cable multi-conductor (Figura 114) unido al equipo que de forma automática selecciona los cuatro electrodos correspondientes para cada medida.

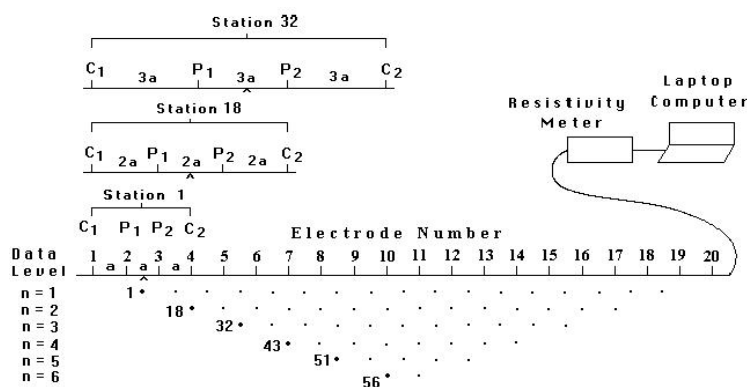


Figura 114. Dispositivo para prospecciones eléctricas 2-D y secuencia de medidas (Loke, 2002).

2.1.5.- Pseudosección, procesado e inversión

Los datos obtenidos de la toma de medidas en campo es un conjunto de 200 a 1.000 datos (o aún más), que una vez procesados se representan en forma de pseudosecciones de resistividades aparentes, conformando de este modo una malla en dos dimensiones.



Una pseudosección constituye una sección con curvas de iso-resistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado.

Con estos datos de resistividad aparente se lleva a cabo el procesado “modelizando” una sección 2D por medio de un programa de inversión. La inversión de los datos devuelve como resultado una “Imagen de Resistividades y profundidades reales” que se interpreta y correlaciona en base a la información geológica de la zona.

Uno de los programas mejor diseñados para inversión y que se utiliza a nivel mundial es el Res2dinv, este programa informático utiliza la técnica de inversión por mínimos cuadrados con restricción de suavizado (Groot-Hedlin y Constabe 1990, Sasaki 1992). El método de mínimos cuadrados con restricción de suavizado está basada en la siguiente ecuación:

$$(J^T J + uF)d = J^T g$$

Donde $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$

f_x = filtro de alisado horizontal , f_z = filtro de alisado vertical , J = matriz de derivadas parciales , J^T = transpuesta de J , u = factor de amortiguamiento, d = vector del modelo de perturbación , g = vector de discrepancia

Una de las ventajas de este método es que el factor de amortiguamiento y los filtros de alisado pueden ser ajustados para satisfacer diferentes tipos de datos. También puede usarse el método convencional de Gauss-Newton, el cual recalcula el Jacobiano de la matriz de derivadas parciales después de cada iteración. Esto es mucho más lento que el método quasi-Newton, pero en áreas con gran contraste de resistividad mayor que 10:1, da resultados ligeramente mejores (Loke y Dahlin, 2002). El modelo 2D usado por este programa divide el subsuelo en un número de bloques rectangulares (figura 115). El propósito de este programa es determinar la resistividad real de los bloques rectangulares que producirían una pseudosección de resistividades aparentes como la medida en campo.

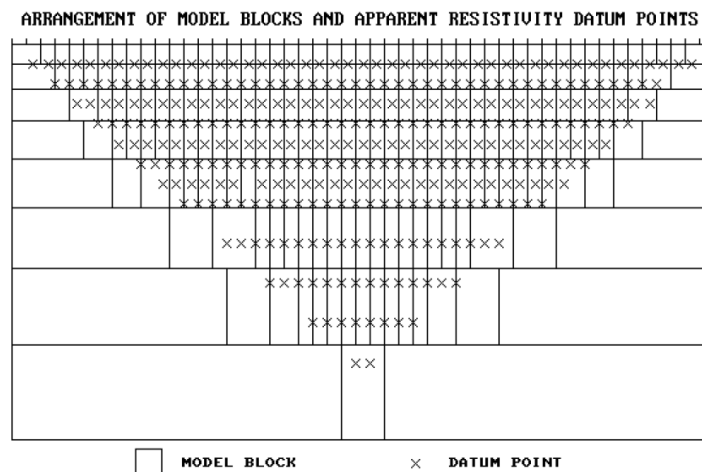


Figura 115. Modelo de bloques y datos de la resistividad aparente (Loke, 2002)



El método de optimización intenta reducir por medio de iteraciones la diferencia entre la resistividad aparente calculada y la medida por adecuación de la resistividad del modelo de bloques, expresándose la diferencia en forma de error RMS. No obstante, para una sección el valor más bajo obtenido puede, en ocasiones, mostrar grandes y no realistas variaciones en el modelo de resistividad y puede no ser siempre el “mejor” modelo desde la perspectiva geológica. En general la aproximación más prudente es elegir el modelo para una iteración, después del cual el RMS no cambia significativamente. Esto usualmente ocurre entre las iteraciones cuarta y quinta.

El resultado obtenido mediante la Técnica de Tomografía Eléctrica es una imagen Geoeléctrica o Sección de Resistividad de Alta Resolución con una muy buena aproximación del modelo de resistividades y profundidades reales del subsuelo.

2.1.6.- Equipo, dispositivo y material necesario

La toma de datos en campo con fiabilidad para la realización de tomografías eléctricas que permitan investigar a grandes profundidades de 500-1.000 metros obliga a disponer de equipos y accesorios adecuados a las características de las mediciones. En estos casos la calidad de los datos está supeditada por tres condicionantes fundamentalmente: resistividad del medio, ruido y resistencia de contacto. Los dos primeros se pueden solventar trabajando con un resistivímetro con potencia suficiente¹⁰, y el tercero dependerá de la resistividad de la capa más superficial y obligará en la mayoría de los casos a colocar picas más profundas, varias en serie, o aplicar agua con sal a las tomas, hasta que la resistencia esté por debajo de 1,0 Kohmio.

Convertidor 1200 W AC DC

Este equipo es un complemento del Syscal Pro para dotarle de una mayor potencia necesaria para los estudios de Tomografía eléctrica profunda.



Imagen 14. Equipo 1200 W AC DC converter diseñado por Iris Instruments

En aplicaciones profundas habrá que tomar distancias interelectródicas de 50 a 100 metros, como medida más usual. El dispositivo recomendado es el Wenner-Schlumberguer por

¹⁰ Convertidor 1200W AC DC de la casa Iris-Instruments



su versatilidad¹¹ aunque en los casos donde se requiera alcanzar una profundidad mayor se puede utilizar el dispositivo Polo-dipolo. El dispositivo Polo-polo se ha descartado por a causa de la gran distancia existente entre los electrodos P1 y P2, que hacen de la implantación del dispositivo algo extremadamente laborioso y puede generar un importante nivel de ruido telúrico que puede degradar en gran medida la calidad de las medidas.



Imagen 15. Toma de datos de campo con tomografía eléctrica profunda en Baza (Granada).

Los mayores problemas a la hora de realizar la tomografía eléctrica profunda se encuentran en la implantación del dispositivo de medida¹². Estos problemas son derivados de la cantidad de cable hay que transportar, emplazar y recoger. Para solucionarlos, las claves están en la utilización de caminos que nos hagan el trabajo algo más fácil, en la buena distribución de los cables en diferentes carretes y en un equipo de trabajo numeroso y bien preparado.

2.2.- Fundamento teórico del método electromagnético en el dominio del tiempo.

El método Electromagnético en Dominio del Tiempos en su variante de sondeos electromagnéticos o calicatas electromagnéticas, constituyó a principio de los años ochenta una innovación muy relevante en el ámbito de la Geofísica aplicada. En estos años la aplicación del método ha permitido acumular una notable experiencia respecto a la capacidad real de esta técnica en investigaciones Hidrológicas, Mineras, Contaminación Ambiental Subterránea, Arqueología, Geotecnología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas por lo general subsuperficiales, tanto geológicas como antrópicas. Además en estos años se han podido observar, sus ventajas respecto a otros métodos, limitaciones y ámbitos de aplicación. La

¹¹ El dispositivo es sensible tanto a estructuras horizontales como verticales

¹² Wenner-Schlumberguer o Polo-Dipolo



experiencia recogida unida a la mejora de los dispositivos hace de este método uno de lo más eficaces de la geofísica actual.

Con este método se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen de la disposición de las unidades en el subsuelo. En las secciones geoelectricas es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies, salinización, fracturación de la roca, etc.

2.2.1.- Método de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo

El método del sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (SEDT) es una técnica de exploración geofísica usada para medir la resistividad o conductividad eléctrica del subsuelo.

Los SEDT son realizados con una unidad trasmisora unida a un bucle (espira grande ó bobina) que recibe y manda la señal a una unidad receptora. Entonces al inyectar una corriente constante en el bucle transmisor se produce un campo magnético primario estable en el subsuelo. Cuando se corta de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisor (por tanto se corta a su vez el campo magnético existente) se produce por ley de Faraday, una inducción electromagnética de corrientes eléctricas (parásitas EMF) en el subsuelo (ver figura 116). Estas corrientes, fluyen en trayectorias cerradas en el subsuelo y migran en profundidad y lateralmente, mientras que su intensidad disminuye conforme pasa el tiempo, lo que genera a su vez un campo magnético secundario transitorio decreciente en la superficie (McNeill; 1980b).

Este campo secundario induce un voltaje variable en tiempo en el receptor. La forma en que decae el voltaje contiene la información sobre la resistividad del subsuelo, puesto que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas dependen de la resistividad. El carácter migratorio en profundidad, es decir, los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad somera, mientras que los tiempos largos pertenecen a resistividades de mayor profundidad (Sheriff, 1989).

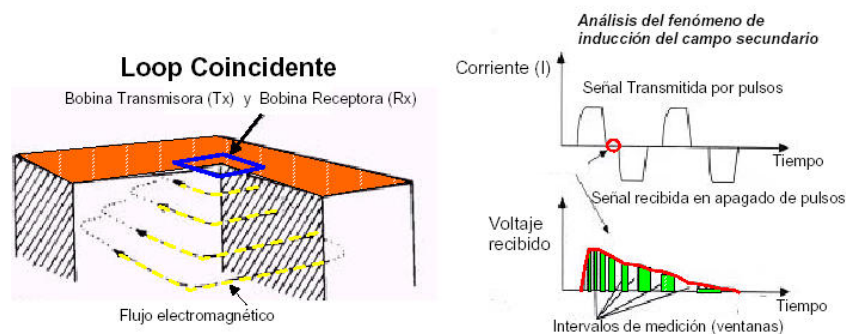


Figura 116. Dispositivo general de un sondeo electromagnético (Navarro Luna, 2006).



Podemos decir entonces, que el proceso de funcionamiento es el siguiente:

1. La corriente que circula por la espira transmisora crea un campo magnético primario, variable con el tiempo.

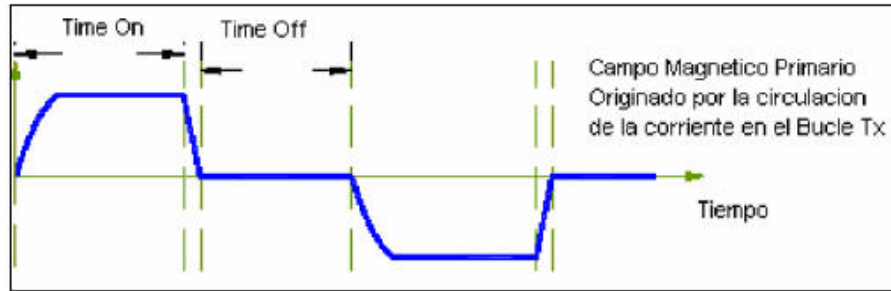


Figura 117. Campo magnético primario (Navarro Luna, 2006).

2. Según la ley de Faraday, una disminución rápida de la corriente transmitida, y por lo tanto, del campo magnético primario induce una fuerza electromotriz (emf) en el subsuelo.

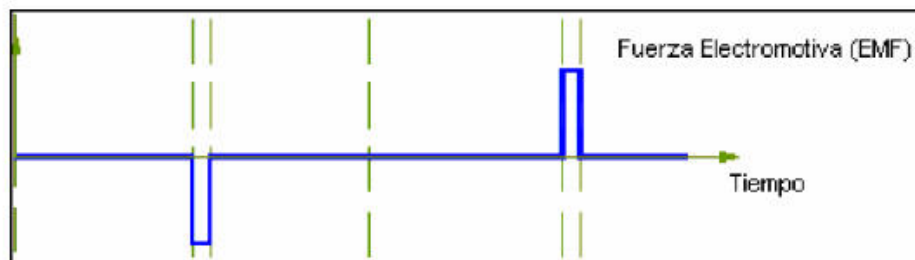


Figura 118. Fuerza electromotriz (Navarro Luna, 2006).

3. Estas corrientes inducidas generan, a su vez, un campo magnético secundario, del que se mide su variación con el tiempo en la bobina receptora, mientras el transmisor no esté emitiendo.

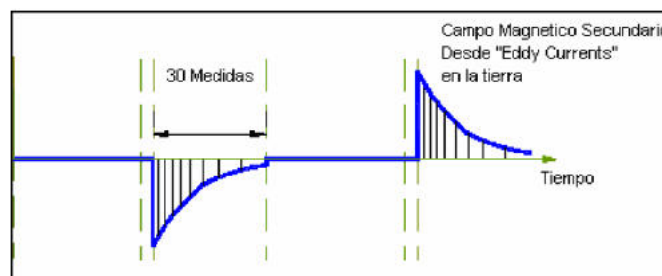


Figura 119. Campo magnético secundario (Navarro Luna, 2006).

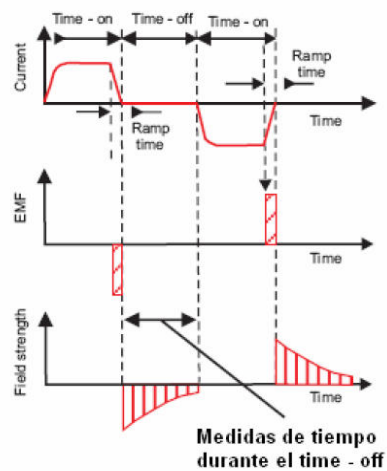


Figura 120. Diagrama de tiempo en el que se realizan las medidas por el receptor (Navarro Luna, 2006).

Al medir el campo secundario, en ausencia del campo primario, el método SEDT es mucho menos sensible a errores debidos a la geometría Transmisor/Receptor que todos los demás métodos eléctricos y EM, por lo que la separación T/R juega un papel mucho menos significativo, en la profundidad de investigación, del que tiene en los otros métodos convencionales de campo artificial.

Por esto, el SEDT es el único método de prospección eléctrica que puede operar con una separación T/R menor que la profundidad de la estructura buscada, esta circunstancia mejora mucho la resolución lateral del método. Sin embargo, en la práctica, la consideración del ruido hace que la distancia T/R sea mayor para investigaciones más profundas, lo cual es particularmente cierto en la configuración de espira normal más utilizada (Fitterman y Stewart, 1986).

Esquemas de la distribución de las corrientes inducidas en el subsuelo:

1. Inmediatamente después del corte de corriente

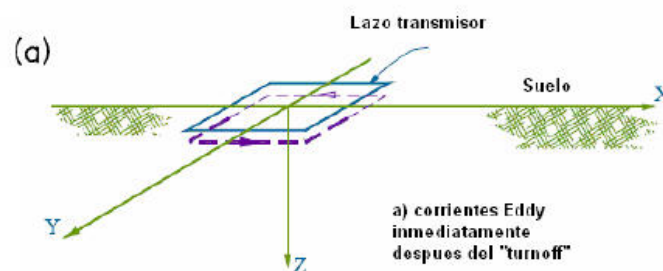


Figura 121. Distribución de corrientes tras el corte de la corriente en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006).



2. Transcurrido un cierto tiempo.

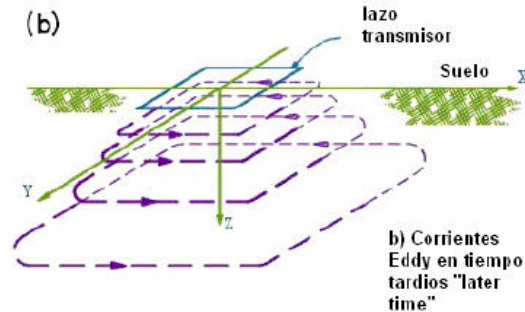


Figura 122. Distribución de corrientes transcurrido un tiempo desde el corte de la en el bucle emisor (Navarro Luna, 2006).

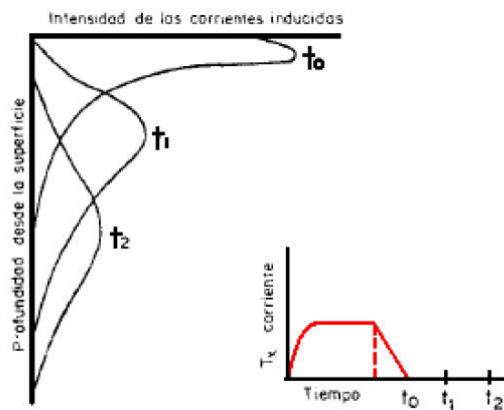


Figura 123. Densidad de la corriente en función de la profundidad, para diferentes tiempos (Navarro Luna, 2006).

2.2.2.- Fundamento básico del método SEDT

Como se menciono en la sección anterior, la medida TEM se hace midiendo la amplitud de la señal transmitida con respecto al tiempo. Por ley de faraday al variar un campo eléctrico se induce un campo magnético y viceversa.

$$\nabla \times e = - (\partial b / \partial t)$$

Donde e es igual al campo eléctrico y b es la inducción magnética



Esto significa que una corriente directa que corre de una bobina induce un campo magnético estático, el campo primario. Este campo no contiene información de la tierra, pero es proporcional al momento magnético, M:

$$M = InA_{loop}$$

Siendo I la corriente directa, n el número de vueltas y Aloop es el área del bucle.

Después de un periodo de tiempo, la corriente es volteada abruptamente y el campo primario comienza a decaer, causando un campo eléctrico a ser inducido y corrientes de Foucault que empiezan a correr en el suelo cerca de la bobina. Debido a la pérdida óhmica estas corrientes rápidamente comienzan a decaer, induciendo así, un campo magnético secundario. Inmediatamente después de que las corrientes han sido apagadas, las fuerzas de los campos primario y secundario son iguales. El decaimiento de estas corrientes es función de la conductividad en la tierra. El decaimiento del campo magnético secundario induce una fuerza electromotriz en la bobina receptora.

Con el tiempo cerca, las corrientes de Foucault se difunden hacia abajo y hacia fuera en un ángulo aproximado de 30° a través del suelo. La profundidad de penetración, Z_d, en un momento dado, t, es dado por:

$$Z_d = (2t/\mu\sigma)^{1/2}$$

Dónde μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad del medio. La profundidad máxima al cual podemos medir se obtiene a través de Z_{last}, donde no es solo función del momento sino también del nivel de ruido, V_{noise}

$$Z_{last} = (2/25\pi^3)^{1/10}(M/\sigma V_{noise})^{1/5}$$

En esta profundidad las medidas están influenciadas por el ruido, siendo así, insatisfactorias. Según Christensen (1998) un límite común es cuando el cociente señal – ruido, S/N, es igual a 1. Como podemos ver la máxima profundidad de penetración decrece cuando incrementa la conductividad.

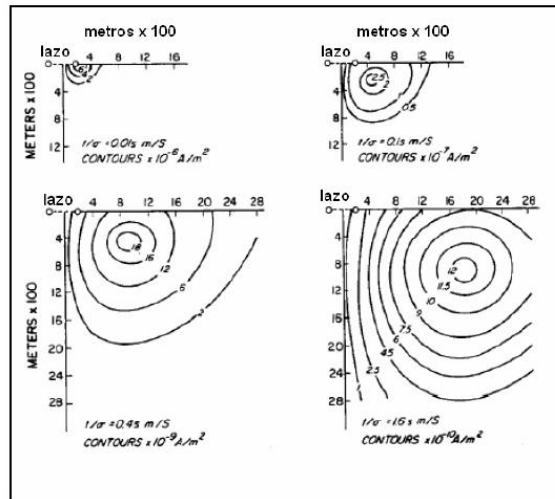


Figura 124. Profundidades de penetración para diferentes conductividades (Navarro Luna, 2006).

Podemos decir que la máxima profundidad de penetración esta ligada directamente con el momento magnético. Zlast es proporcional a $M^{1/5}$, haciendo así, que un incremento en el momento magnético es necesario para aumentar la máxima profundidad de penetración.

En cualquier caso, la profundidad de investigación en el método SEDT se determina, en principio, no por la separación T/R (transmisor- receptor), sino por el tiempo que transcurre desde que el transmisor deje de emitir y el momento magnético asociado.

Para explorar a mayores profundidades, es necesario por tanto recoger la señal en tiempos posteriores. Obviamente, con tiempos cortos, debido al efecto skin, las corrientes de Foucault (Eddy) se concentran en los estratos superficiales. Como consecuencia, las primeras medidas de la emf, serán más sensibles a la resistividad de los estratos superiores. Según transcurre el tiempo, la intensidad de corriente alcanza profundidades mayores y la emf medida está más influida por dichas profundidades.

Además, la densidad de corriente disminuye en los estratos superiores y por tanto, las resistividades eléctricas de estos estratos tienen una influencia pequeña en la emf medida en tiempos prolongados. Esto ayuda a eliminar el efecto de las variaciones de resistividad cerca de la superficie, que es la causa de la pérdida de calidad de los datos obtenidos por otros métodos de prospección eléctrica.

2.2.3.- Procesado de datos

El tratamiento informático de los datos tomados en campo es doble. Por un lado, se realiza el modo tomografía electromagnética que consiste en el procesado global de las mediciones de campo relativas al perfil tomado mediante el algoritmo de Spiker que transforma los datos de los transitorios (voltajes en función del tiempo) para cada punto de medidas en



conductividades aparentes. Los resultados se representan en forma de sección de conductividades aparentes (mS/m) - profundidades. El programa utilizado es el TEM plotting. Un segundo tratamiento permite procesar los datos de forma individual para cada sondeo electromagnético (SEDT), se emplean técnicas similares a los de los demás métodos de prospección eléctrica. La emf medida, como función del tiempo, se convierte en resistividad aparente, y ésta se introduce en un programa de inversión, que calcula la estratificación de resistividades, con el mejor ajuste posible a la curva de resistividades aparentes observadas.

El programa utilizado es el TEMIX 1XID, el cual permite la transformación del transitorio en resistividades aparentes en función del tiempo, realizando un cálculo del modelo geoelectrico y su ajuste matemático posterior en base al modelo geológico, construyendo la sección geoelectrica más probable en profundidad para el área investigada.

2.2.4.- Equipo, dispositivo y material necesario

La toma de datos en campo con fiabilidad para la realización de sondeos electromagnéticos profundos que permitan investigar a grandes profundidades de 2000-3000 metros obliga a disponer de equipos y accesorios adecuados a las características de las mediciones. La profundidad alcanzada con esta técnica dependerá: de la resistividad del medio, del ruido electromagnético de la zona, del área, el número de vueltas e intensidad del bucle transmisor y del área y número de vueltas de bucle receptor. Los dos primeros son constantes y no podemos influir en ellos, sin embargo el área, el número de vueltas y la intensidad del bucle transmisor y el área y número de vueltas del bucle receptor son parámetros donde podemos influir.

Para la realización de sondeos electromagnéticos profundos habrá que:

- Emplazar bucles transmisores de gran tamaño (mayores de 500 x 500) para aumentar el área: Para esto se utilizarán caminos en la medida de lo posible que nos permitirán desplazarnos en todoterreno. Como contrapartida, la utilización de caminos no suele permitir emplazar bucles perfectamente cuadrados o circulares pero esto no es un problema, ya que los voltajes medidos en el bucle receptor no estarán muy distorsionados. Sin embargo hay que ser especialmente cuidadoso en dos puntos: usar el área real del bucle emplazado al interpretar los datos y colocar el bucle receptor lo más cercano posible al centro del bucle
- No usar más de una vuelta en el bucle transmisor: El bucle transmisor no tendrá más de una vuelta ya que en bucles de gran tamaño no se gana prácticamente momento magnético. A la dificultad añadida que tendría emplazar un bucle



transmisor de gran tamaño con más de una vuelta, hay que sumar que lo ganado multiplicando el momento magnético por dos se perdería al aumentar la resistencia total del bucle y por tanto obteniendo una menor intensidad.

$$M = InA_{loop}$$

Siendo **I** la corriente directa, **n** el número de vueltas y **Aloop** es el área del bucle.

- Aumentar la intensidad del bucle transmisor: Se utilizará cable con la mayor sección posible (dentro de los límites de la operatividad) para bajar así su resistencia y con un mismo voltaje obtener una mayor intensidad. Se utilizará un transmisor potente que permita utilizar altos voltajes e intensidades.



Imagen 16. Equipo TerraTx-50 diseñado por Monex Geoscope

Terra TX50

Este aparato es un complemento para dotarle de una mayor potencia al momento inductor. Se trata del transmisor para esta técnica más potente del mercado en la actualidad.



Technical Specifications

| | | | |
|------------------------|--|---|---|
| Output Voltage | 24, 36, 72 and 96 Volts DC-selectable | Data Visualisation and Processing in field | Standard Software |
| Output Current | 1 - 50 Amps | Display | Including Battery Voltage, Loop Current Warnings of Overheating and Short-circuit. |
| Waveform | Bipolar. 50% Duty Cycle. On time equals Off Time | Cooling | Convection by Heat-sink |
| Turn-off Time | Depending on Loop Inductance and Current. Only 35 usecs on a 100 m loop and 40 A. | Operating Temperature | -20 to +50 degrees C. |
| Repetition Rate | Controlled by terraTEM to be the same as terraTEM | Operational safety protection | Overvoltage and Short-circuit protection |
| Synchronisation | Cable or GPS Timing | Dimensions | 45 x 32 x 15 cm. |
| | | Weight | 10 kg. |

- Aumentar la intensidad del bucle transmisor: Se utilizará cable con la mayor sección posible (dentro de los límites de la operatividad) para bajar así su resistencia y con un mismo voltaje obtener una mayor intensidad. Se utilizará un transmisor potente que permita utilizar altos voltajes e intensidades.
- Aumentar el área y número de vueltas del bucle receptor:

El potencial inducido en el bucle receptor depende de una constante, el área y el número de vueltas del bucle. Siendo K una constante que depende del campo electromagnético creado en el subsuelo por el bucle transmisor.

$$fem = K \times A \times n$$

Se emplazará un bucle receptor con la mayor área posible en el interior del bucle transmisor con dos o tres vueltas. El cable podrá tener cualquier sección ya que esta no influye en la fem inducida.

Obtener una fem más alta en el bucle receptor nos permitirá obtener datos de mayor calidad y datos pertenecientes a zonas más profundas del subsuelo.

Sin embargo, para que el equipo TerraTem pudiera admitir estos voltajes se mantuvieron conversaciones con el fabricante para la creación de un prototipo. Este prototipo consistía en un dispositivo de protección externa que nosotros hemos evaluado y que actualmente es el único en el mundo. Este dispositivo hace



de filtro ante altos voltajes inducidos en el bucle receptor que podrían dañar la unidad TerraTem.



Imagen 17. Dispositivo de protección externa del equipo TerraTem diseñado por Mones Geoscope.

3.- REFLEXIONES FINALES

La tomografía eléctrica y los sondeos electromagnéticos se muestran como una técnica prospectiva eficaz y representa un avance significativo en la exploración de estructuras geológicas profundas, caracterizando los estratos para profundidades > 1.000 metros. La resolución del método decrece exponencialmente con la profundidad, pero no la precisión; por ello se plantea la prospección de estructuras y no la (prospección) de niveles litológicos concretos.

Esta técnica permite la inversión 2D y 3D de perfiles, posibilitando la modelización estructural mediante herramientas de gestión de información espacial de Cuencas o Subcuencas hidrogeológicas, ayudando a planificar de forma más rigurosa el emplazamiento de futuras obras de explotación o inyección, recargas, evolución de la calidad química, control de invasión salina, vulnerabilidad a contaminaciones, etc.

Dichas metodologías, aplicadas convenientemente permiten de forma rápida el barrido de grandes áreas, con gran precisión y economía si se las compara con otros métodos (sísmica de reflexión). En una jornada de trabajo en zonas de fácil acceso se puede obtener un perfil de 2 a 4 Km., dependiendo de la profundidad de investigación. No obstante, áreas de difícil acceso o vegetación densa dificultan los trabajos de tendido del dispositivo bajando el rendimiento. Otra ventaja importante es la de poder trabajar en zonas de elevado ruido ambiental, presencia de líneas de alta tensión, etc., donde la aplicación de otras técnicas sería inviable.

A continuación se exponen una serie de ejemplos donde se efectuaron prospecciones hidrogeológicas por medio de las técnicas descritas.



4.- EJEMPLOS DE PROSPECCIONES GEOFÍSICAS PROFUNDAD MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA Y SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.

4.1.- Ejemplo nº 1 (Cuenca del Duero, Los Arenales (Segovia))

En este ejemplo se exponen los resultados obtenidos en la investigación realizada en la Cuenca del Duero (Área de los Arenales), en la provincia de Segovia. En esta zona la litología típica en el conjunto de materiales terciarios es una alternancia de arcillas y arcillas arenosas con niveles de arenas, arenas arcillosas, gravas, conglomerados, etc., donde son habituales los cambios de laterales de facies y la distribución lentejona.

Observando el corte adjunto se aprecian ligeras variaciones de resistividad que ponen en evidencia la presencia de potentes lentejones de arenas arcillosas y arenas alternando con arcillas, áreas donde se prevé mayor permeabilidad.

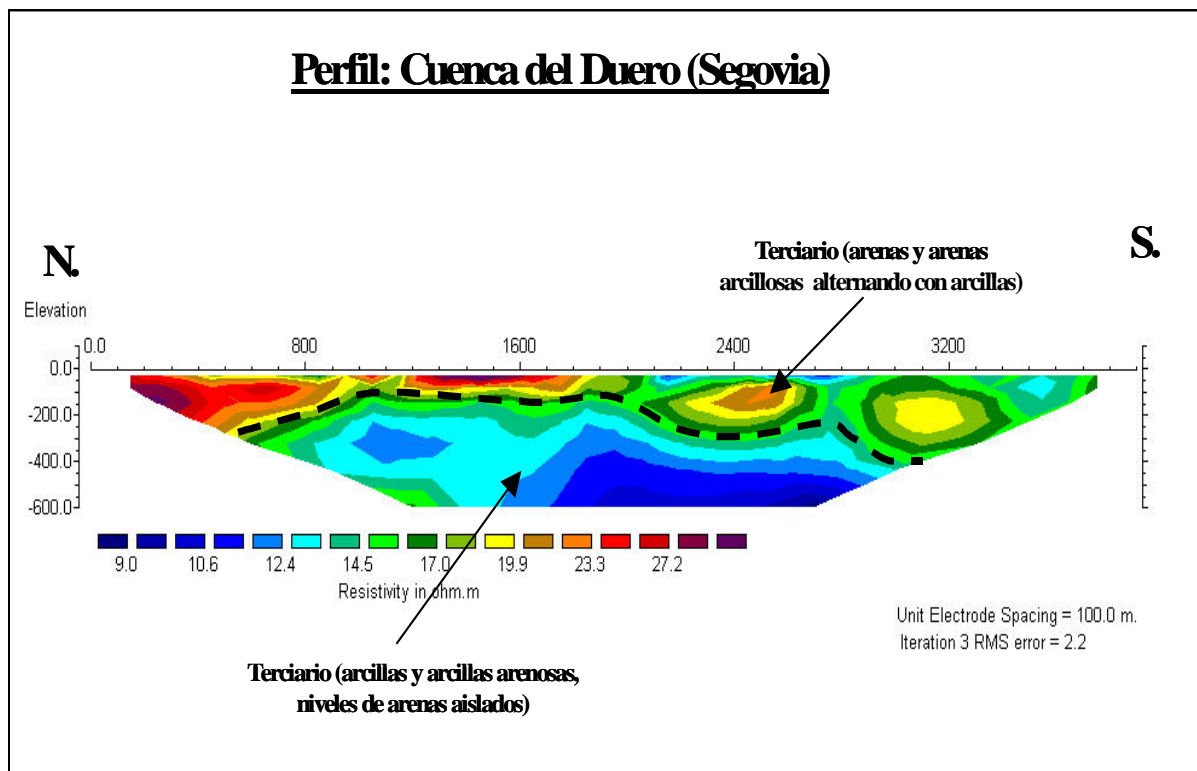


Figura 125. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en la Cuenca del Duero (Segovia)



4.2.- Ejemplo nº 2 (Área de Albacete).

Se muestra la sección obtenida en la prospección realizada en la provincia de Albacete con el fin de abastecer de agua a un núcleo urbano. En el municipio existen varios sondeos que explotan acuíferos calcáreos asociados al Cretácico. Sin embargo, la creciente demanda obliga a captar un mayor caudal, planteándose la localización de las calizas-dolomías del Jurásico, acuífero de gran potencial. Para tal fin se realizaron varios perfiles, adjuntándose el más significativo por detectar la unidad Jurásica calcáreo-dolomítica a partir de 300 metros de profundidad.

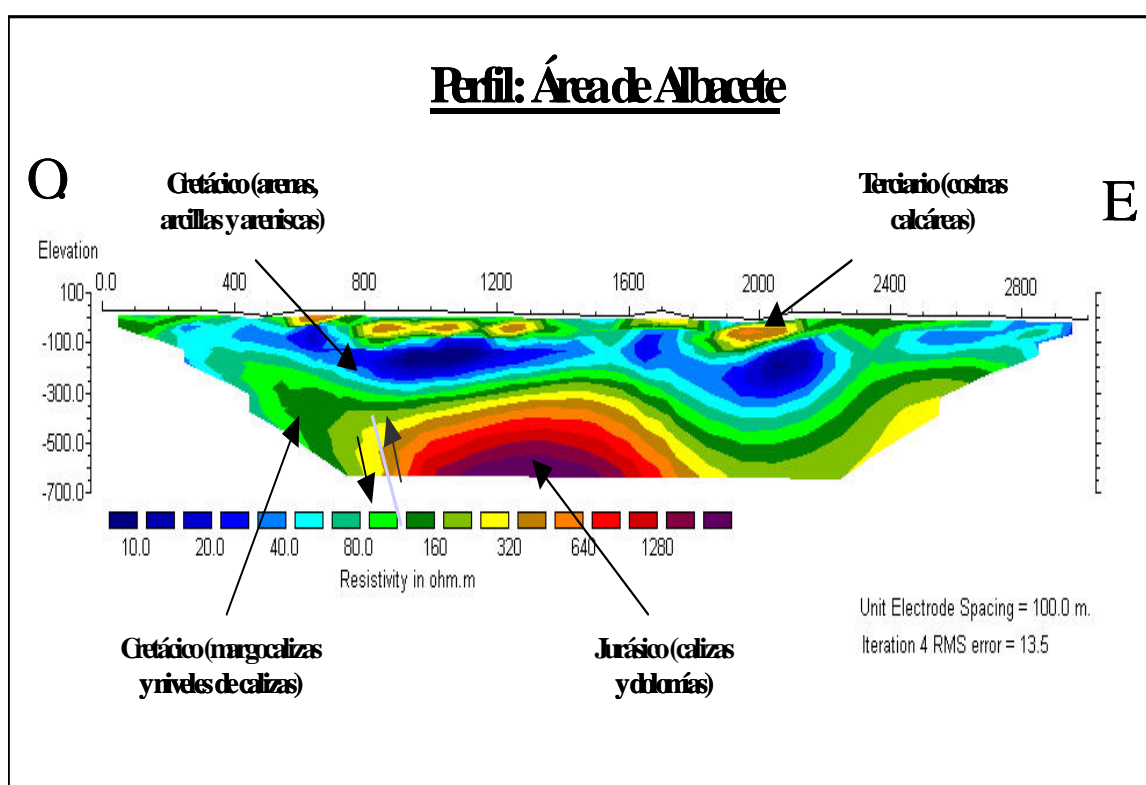


Figura 126. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en el área de Albacete



4.3.- Ejemplo nº 3 (Borde de la Cuenca del Duero)

Con este trabajo se pretendía controlar la situación del zócalo paleozoico en el borde Oeste de la Cuenca del Duero, en la provincia de Zamora. El objetivo es detectar la máxima potencia de materiales detríticos para emplazar sondeos. Se realizaron varios perfiles paralelos y perpendiculares al borde, con separación de electrodos de 50 metros. Se muestra uno de ellos donde se detecta la presencia de una fractura que condiciona una mayor subsidencia hacia el Este.

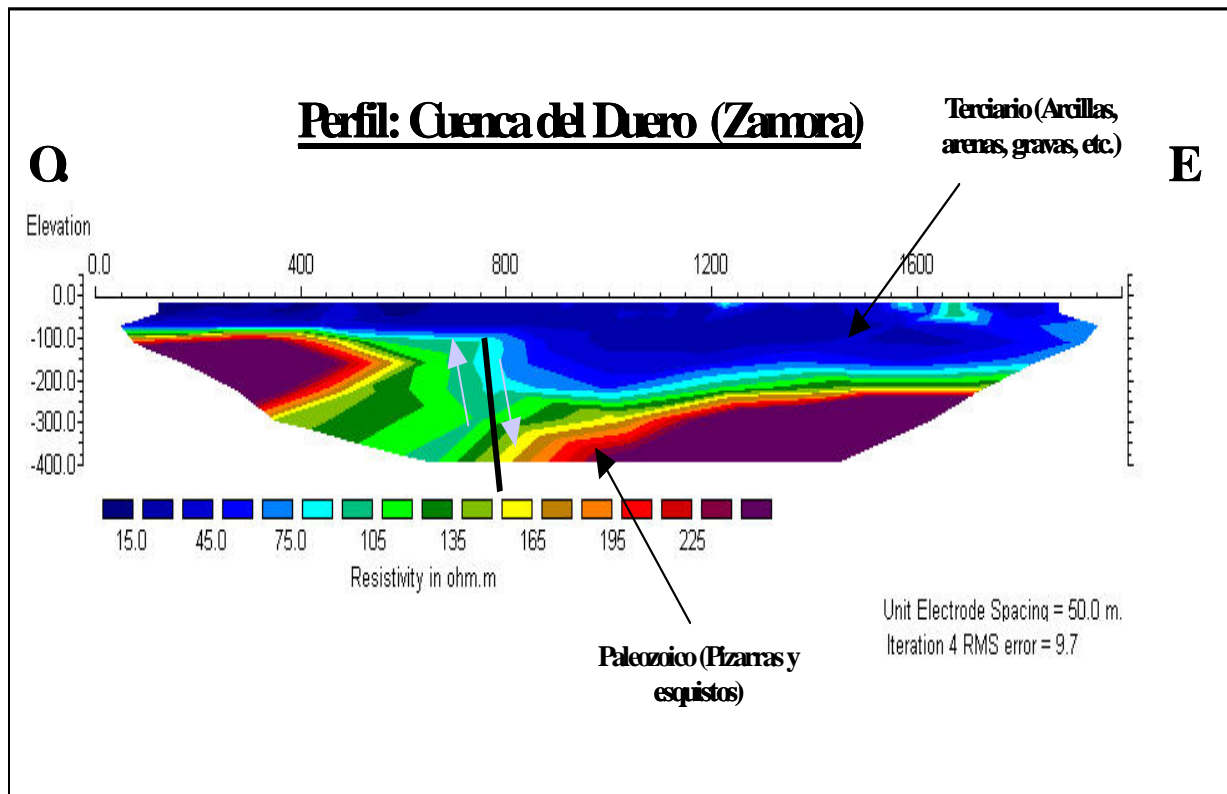


Figura 127. Perfil de Tomografía eléctrica profunda en la Cuenca del Duero (Zamora)



4.4.- Ejemplo nº 4 Guadix (Granada)

Se trataba de optimizar la zona y profundidad para emplazar un sondeo donde varias perforaciones anteriores dieron resultados negativos. En este caso se pretendió controlar la estructura asociada a la formación calizo-dolomítica ligada al complejo Alpujarride localizada a muro del Terciario, unidad hidrogeológica más importante.

La sección obtenida pone de relieve la presencia de una importante falla que afecta al complejo calcáreo-dolomítico, mostrando la zona Sur del perfil de mayor interés por su proximidad a la superficie. El sondeo efectuado obtuvo resultados satisfactorios.

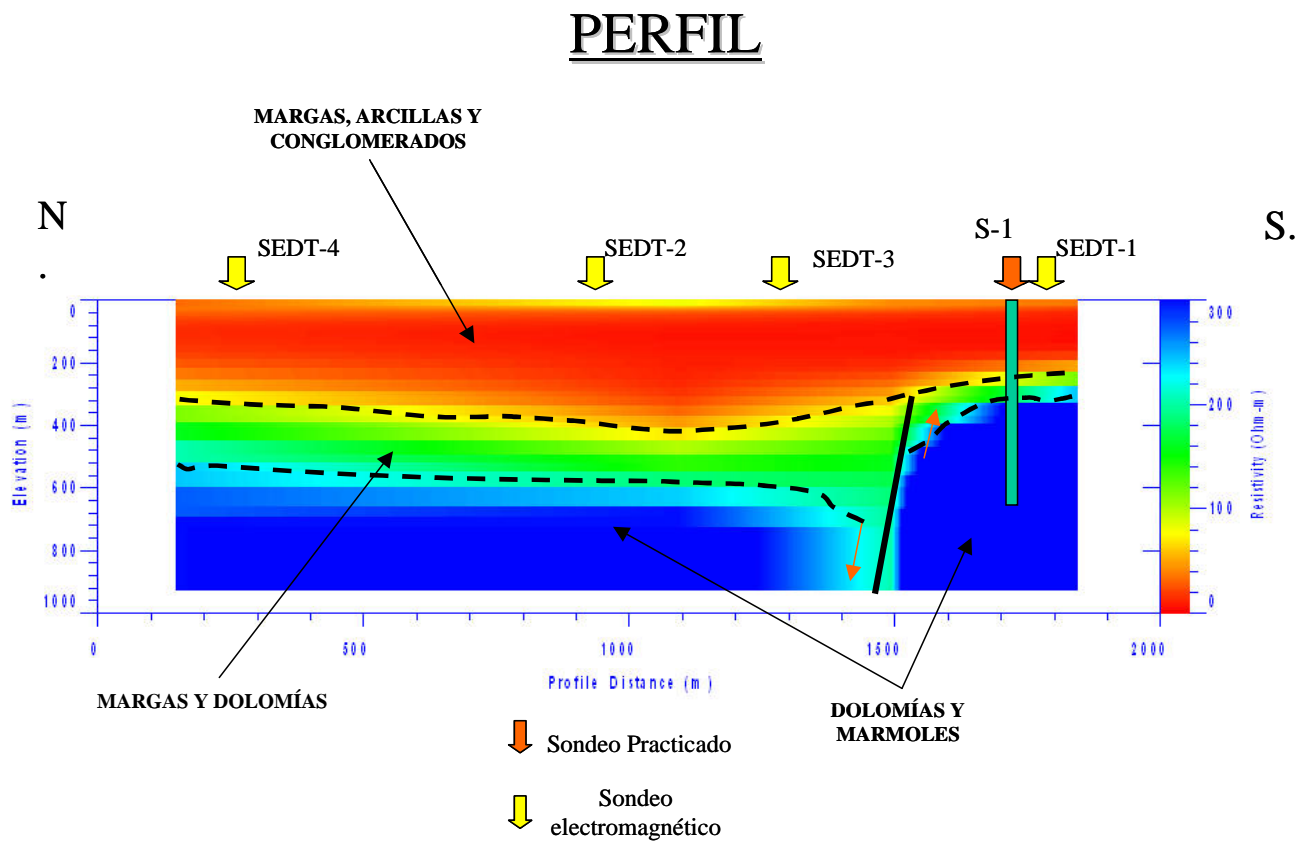


Figura 128. Perfil electromagnético realizado en Guadix (Granada)



4.5.- Ejemplo nº 5 Cuenca del Duero (Ávila)

Este estudio se realizó con la finalidad de investigar la posibilidad de explotar energía geotérmica asociada a acuíferos profundos de baja entalpía dentro del paquete terciario del Neógeno. Los resultados obtenidos ponen de relieve la presencia de acuíferos interesantes por su profundidad entre 400 y 800 metros, baja resistividad (7-8 ohm.m.) indicativo de aguas con elevadas concentraciones de sales y proximidad del zócalo paleozoico. Se preveía la extracción de aguas con temperaturas > de 30 ° C., lo cual fue comprobado con la realización de un sondeo.

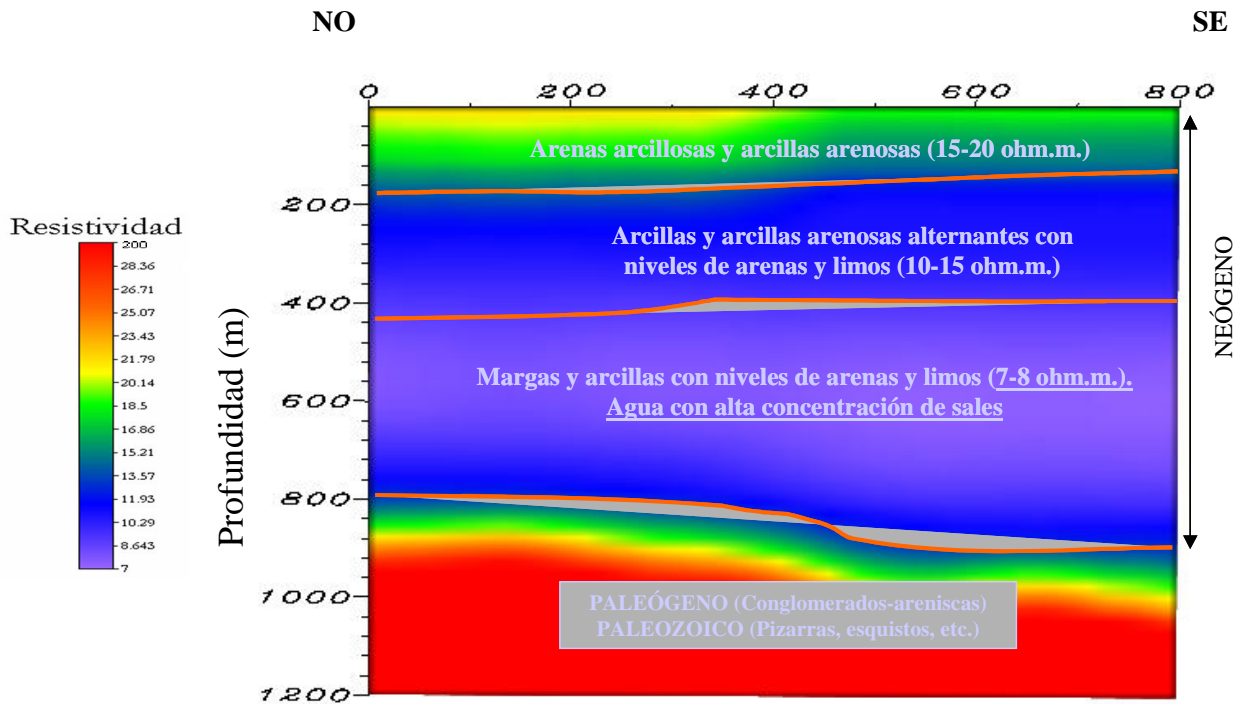


Figura 129. Perfil de Tomografía electromagnética realizado en la Cuenca del Duero (Ávila)



4.6.- Ejemplo nº 6 Elaboración de un Modelo 3 D. Borde Sur de la Cuenca del Duero: Comarca de La Moraña (Ávila)

Partiendo de una serie de sondeos electromagnéticos estratégicamente ubicados se puede establecer el modelo geométrico de una Cuenca o Subcuenca hidrogeológica. En este ejemplo se selecciono un área confeccionando el modelo hasta alcanzar el zócalo paleozoico.

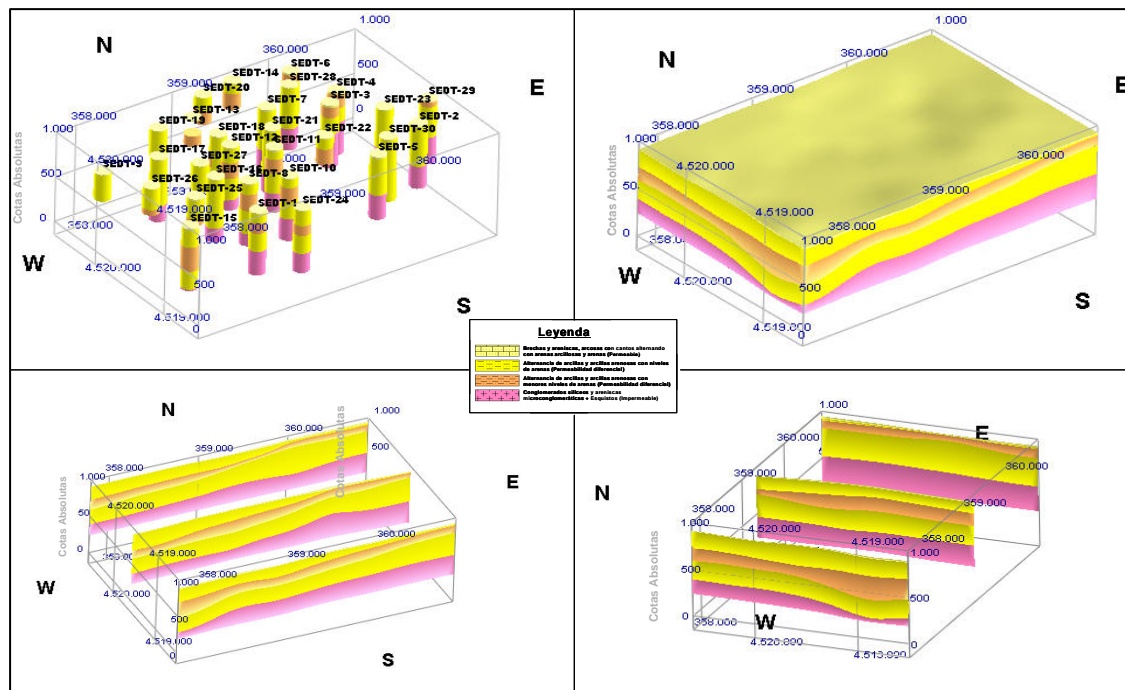


Figura 130. Modelo 3D realizado mediante programa Rockworks partiendo de datos de SEDT en Pozanco (Ávila).



4.7.- Ejemplo nº 7 Prospección para optimizar la zona y profundidad de sondeos

Este corte se obtuvo en la zona de La Herrera y su fin era optimizar la ubicación y profundidad de futuros sondeos de captación.

Se puede observar la evolución de la estructura determinada por la unidad Jurásica (calizas dolomíticas, dolomías, margas, etc.), unidad hidrogeológica de mayor interés en la zona.

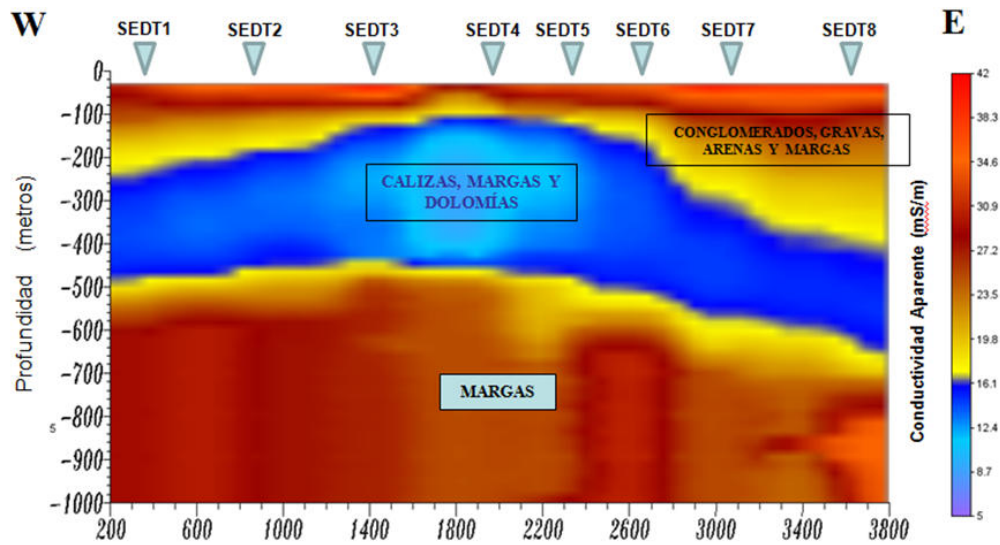


Figura 131. Pseudosección (resistividades aparentes) de una finca en la Herrera (Albacete).

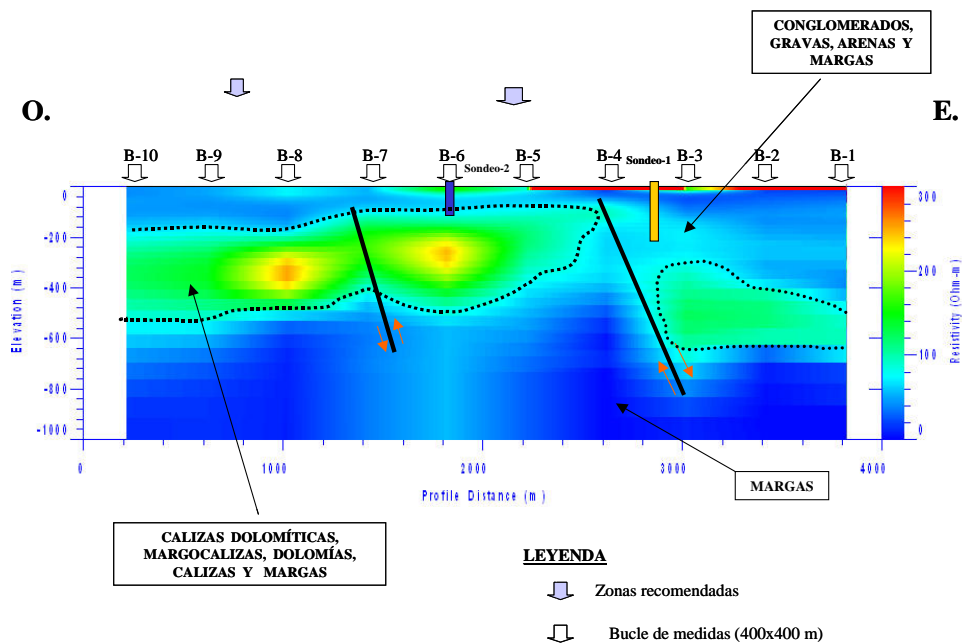


Figura 132. Sección procesada (resistividades reales) de una finca en la Herrera (Albacete).



4.8.- Ejemplo nº 8 Estudios estructurales mediante tomografía eléctrica profunda

En estos ejemplos se exponen los resultados obtenidos en investigación realizadas para caracterizar la estructura geológica del subsuelo.

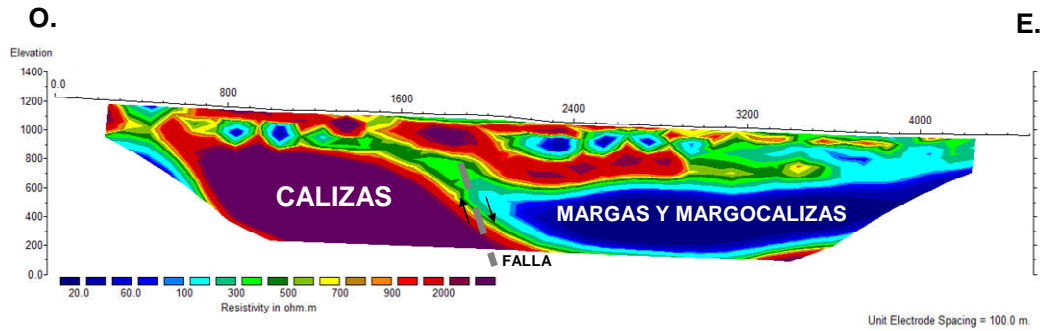


Figura 133. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Baza (Granada).

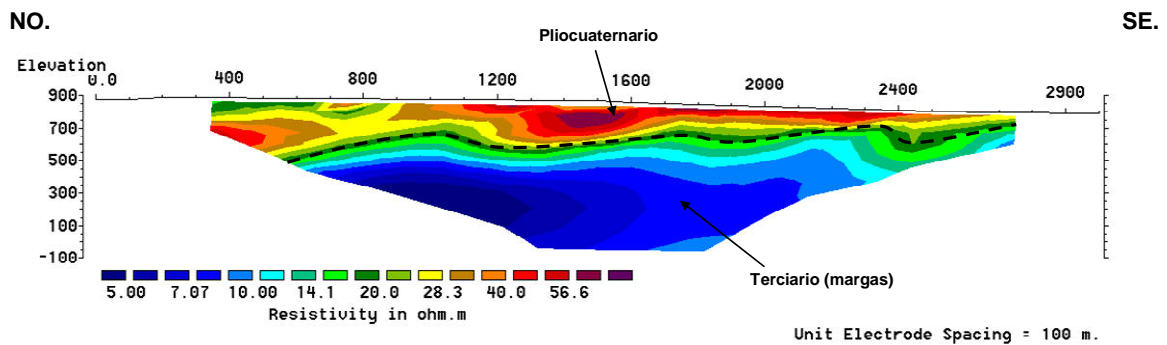


Figura 134. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Baza (Granada).

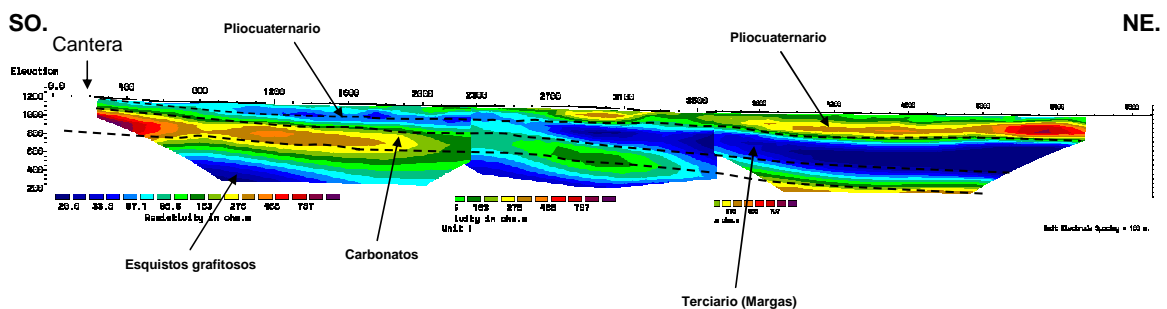


Figura 135. Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica profunda realizado en Guadix (Granada).



4.9.- Ejemplo nº 9 Determinación de la estructura, extensión lateral y potencia de los materiales salinos de interés de un complejo olistostrómico

Realización de una investigación tridimensional para obtener la estructura y continuidad lateral de materiales de naturaleza carbonatada. La malla está compuesta por un total de 16 SEDT de 400x400 m (coincident loop). Los bucles se procesaron de forma individual y posteriormente, se realizó una interpolación 3D para obtener el bloque 3D.

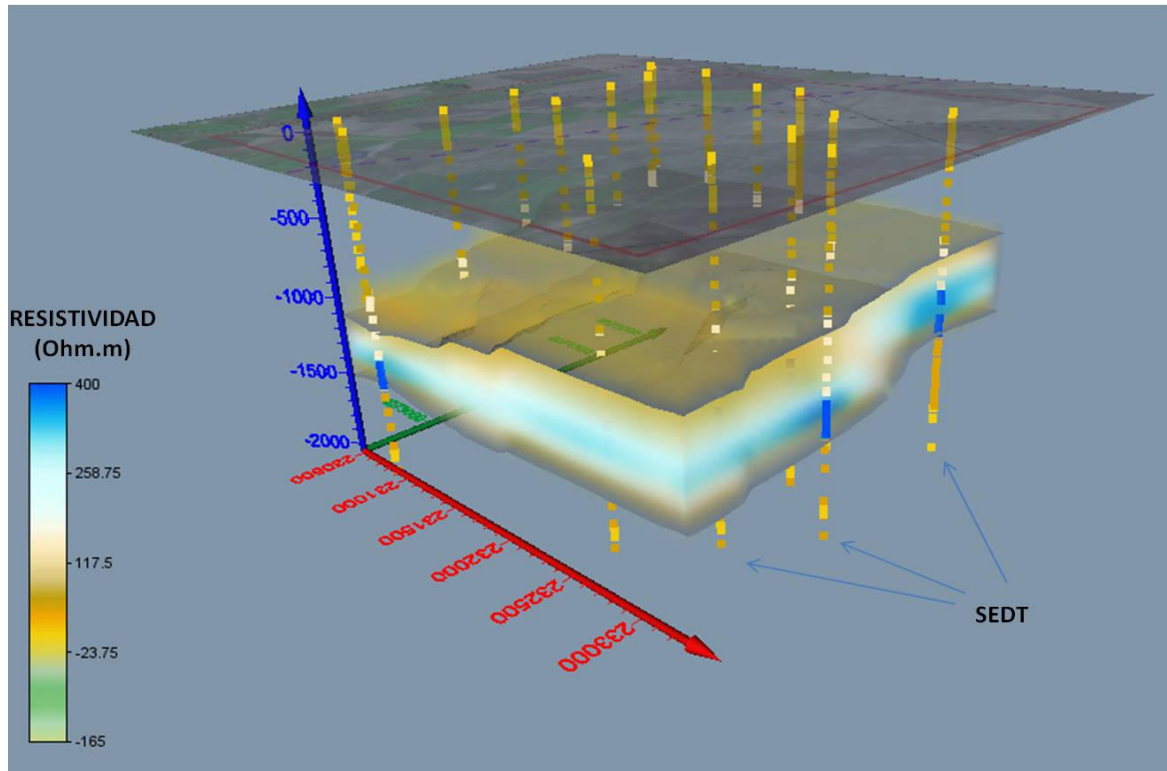


Figura 136. Bloque 3D generado a partir de datos de SEDT de una zona del T.M de Las Cabezas de San Juan (Sevilla). Visualización con Software Voxler.

La figura superior muestra el bloque 3D generado a partir de los datos 1D de cada SEDT (columnas de cuadros). Se ha aislado y representado la zona de interés la cual presenta resistividades $> 150 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ correspondientes a los materiales permeables de interés. El estudio tridimensional permite obtener secciones 2D de interés mostrando la estructura de los materiales de interés. En este caso, se ha determinado que en los límites de la zona de estudio los materiales de interés se emplazan entre las cotas - 800 y -1.500 m.s.n.m. y que presentan una potencia que oscila entre los 500 y 700 m de potencia



4.10.- Ejemplo nº 10 Estudio de la estructura y salinidad de la formación Utrillas mediante SEDT para la caracterización de un almacenamiento de CO₂

Realización de una investigación para obtener la estructura y salinidad de la formación Utrillas. Se realizaron un total de 10 SEDT de 500x500 m (inloop). Los bucles se procesaron de forma individual.

Como punto de partida se realizaron dos SEDT paramétricos. La realización de puntos de investigación paramétricos es fundamental en estudios geofísicos ya que disminuyen el principio de equivalencia y permiten mejorar la precisión en las determinaciones. Mediante los sondeos paramétricos se pudo comprobar que la estimación de las variables del factor de formación fue la correcta y la metodología propuesta permitía la determinación de la salinidad en el permiso de investigación.

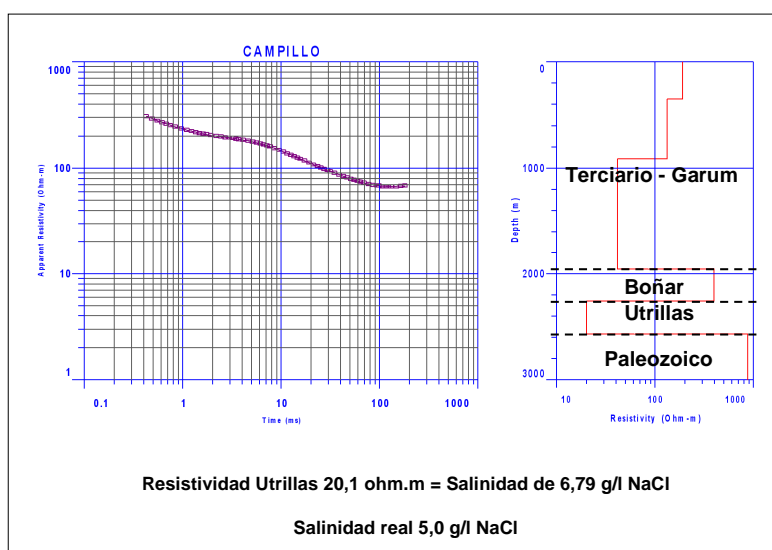


Figura 137. SEDT paramétrico para la determinación de la resistividad en la formación Utrillas realizado en el sondeo Campillo

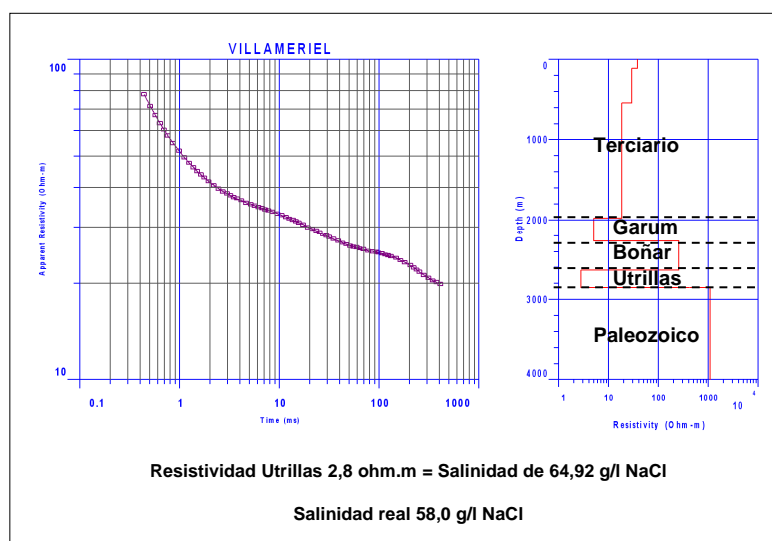


Figura 138. SEDT paramétrico para la determinación de la resistividad en la formación Utrillas realizado en el sondeo Villameriel



4.11.- Ejemplo nº11 Determinación de la posición de materiales salinos dentro de un permiso de investigación (Estudio estructural)

El trabajo se basó en el diferente comportamiento geoelectrico que presentan los materiales margosos (conductores) y los salinos (resistivos) objeto de la investigación. La investigación se llevó a cabo a partir de la ejecución de un total de 15 SEDT con dispositivo Coincident Loop y 500 m de tamaño.

Como punto de partida se realizó un SEDT para métrico. LA realización de puntos de investigación paramétricos es fundamental en estudios geofísicos ya que disminuyen el principio de equivalencia y permiten mejorar la precisión en las determinaciones.

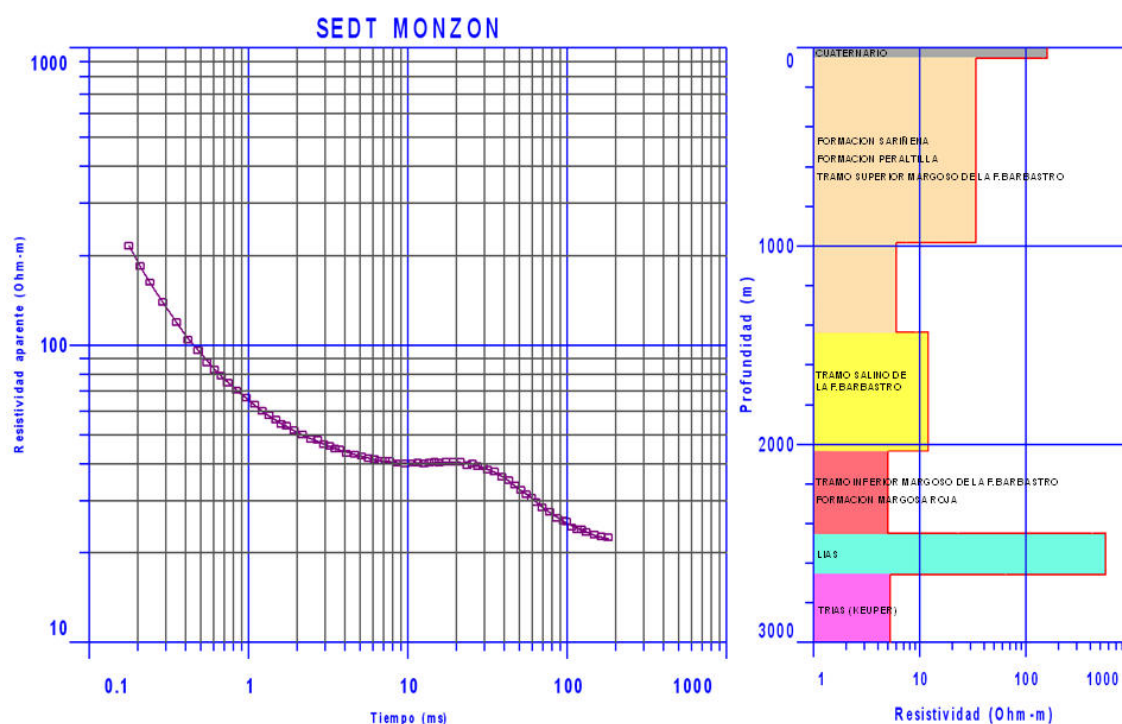


Figura 139. SEDT profundo realizado sobre el Sondeo Monzón.

La figura superior muestra la curva SEDT obtenida en el punto paramétrico realizado sobre un sondeo de investigación preexistente. El modelo geológico se ha obtenido fijando la profundidad a la que se emplazan las formaciones según el sondeo y obteniendo las resistividades de las formaciones.

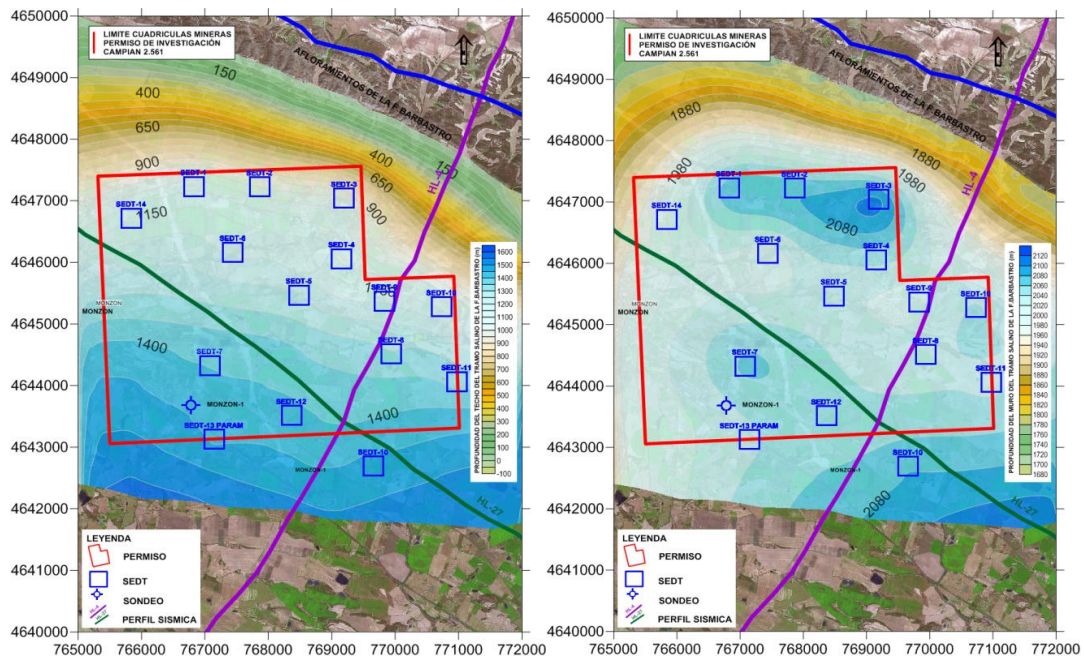


Figura 140. Techo (Izda) y muro (Dcha) de la capa de interés obtenido a partir de los SEDT ejecutados en la zona de estudio.

La aplicación de software de tratamiento permite la obtención de superficies 3D de interés. En este caso, la figura superior muestra la profundidad de emplazamiento del techo (Izda) y muro (Dcha) de los materiales de interés dentro de los límites de la zona de estudio. A partir de estas superficies ha sido posible la obtención de la potencia así como la cubicación del yacimiento.

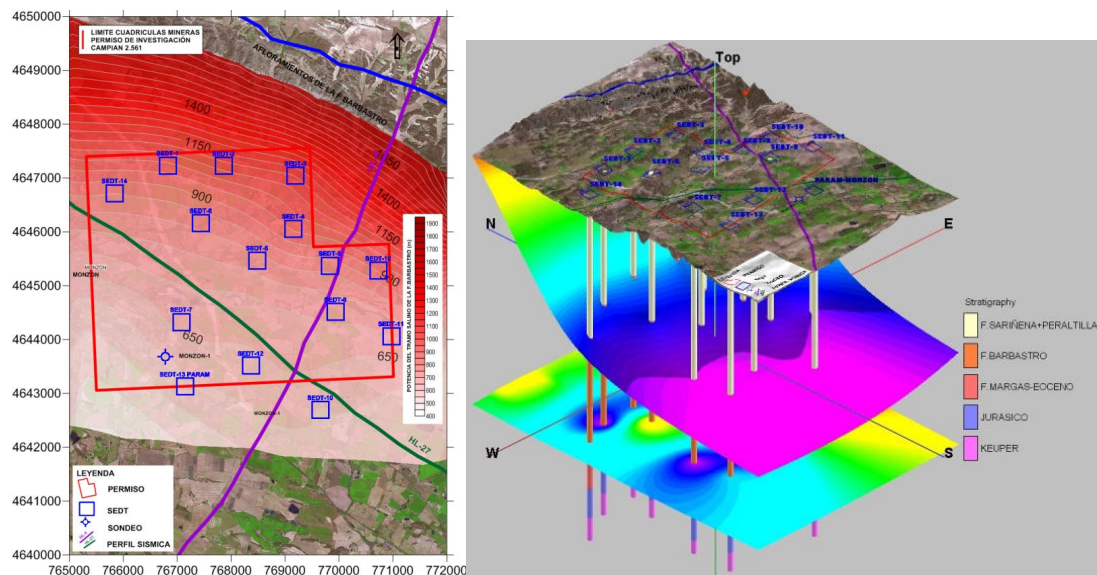


Figura 141. Potencia de los materiales de interés (Izda) y bloque 3D (Dcha) mostrando el techo y muro de los materiales de interés así como los resultados de los SEDT del estudio.



CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA



ÍNDICE

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

1.- INTRODUCCION

2.- INFORMACIÓN SOBRE LA ZONA DE TRABAJO

3.- SELECCIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO

4.- CAMPAÑA DE ADQUICISIÓN DE DATOS

5.- PROCESADO DE LOS DATOS

6.- INTEGRACIÓN DE TODA LA INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

7.- REDACCIÓN DEL INFORME FINAL



1.- INTRODUCCION

La metodología utilizada para las campañas geofísicas de esta tesis doctoral ha seguido una serie de etapas:

- En primer lugar, el planteamiento o la definición del problema geológico que quiere investigarse. En este sentido, hay que recordar que la Prospección Geofísica es una herramienta de la Geología con una capacidad mucho mayor para corroborar o refutar hipótesis que para establecerlas; por otra parte, sólo a preguntas concretas pueden darse respuestas concretas. En esta fase de planteamiento debe recopilarse la información geológica y geofísica disponible sobre el área
- Establecido el problema, puede pasarse a la etapa de planificación de la campaña geofísica; para ello se comenzará por traducir a términos geofísicos el problema planteado, lo que implica elaborar el modelo del subsuelo cuya realidad quiere comprobarse además de los datos geométricos del modelo, que serán fruto de la hipótesis y/o conocimiento previo que se tenga sobre la geología del área, es de fundamental importancia conocer el valor más probable de las propiedades físicas de las rocas involucradas; a partir de este modelo, y con un buen conocimiento de las bases teóricas en que se fundamentan los diferentes métodos geofísicos, podrá seleccionarse el método más adecuado para la resolución del problema planteado; el uso de técnicas de cálculo de las anomalías geofísicas teóricas que cabe esperar, puede ser de gran ayuda en esta etapa, debiendo tenerse en cuenta además el relieve topográfico, ruidos culturales, etc. Una consideración adicional a la hora de esta planificación es que la utilización de más de un método es altamente recomendable, ya que ello no significa adicionar información, sino potenciarla, siendo por tanto las probabilidades de éxito de la campaña geofísica mucho mayores. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la selección del método incluye la definición del dispositivo y parámetros de toma de datos adecuada (tiempo de registro, distancia entre mediciones, dimensiones de las antenas, etc), sin lo cual, puede suceder que aunque el método en si mismo resulte apto para la resolución del problema, los datos de campo obtenidos no lo sean.
- La siguiente etapa la constituye la toma de datos sobre el terreno o la etapa de medición, que quizá sea confundida en algunas ocasiones como la parte esencial o incluso única de la Prospección Geofísica, cuando en realidad no es así. Esta etapa puede ser llevada a cabo por personas distintas a las que realizan las restantes etapas, requiriéndose en algunos métodos un mayor especialización en cuestiones instrumentales que en Geología, aunque la evolución de la Geofísica está conduciendo a la paradoja de que mientras que para el manejo de la nueva instrumentación no es siempre imprescindible tener una alta cualificación técnica, la complejidad de la toma de decisiones en campo por la mayor sofisticación de los métodos utilizados, suele requerir profundos conocimientos geofísicos.



- Una vez obtenidos los datos, es necesaria una etapa, más o menos importante según el método utilizado, de proceso de los mismos, a fin de convertirlos en un documento que es el que finalmente va a ser utilizado para la interpretación de los resultados. Como parte intrínseca de dicho proceso debe considerarse la forma de representar los resultados mediante herramientas de gestión de información espacial. Las bases de esta etapa pertenecen al dominio de la Física y de las Matemáticas, auxiliadas por el Cálculo, llevado a cabo actualmente casi de manera exclusiva por procedimientos informatizados, pero en los que el geofísico debe aportar normalmente algunas decisiones; no debería de olvidarse que los ordenadores no tienen más inteligencia que su usuario, por mucha rapidez que tengan en efectuar complicadísimos cálculos.
- Finalmente podrá llevarse a cabo la interpretación, es decir, la formulación de la respuesta al problema planteado. Para ello, el documento geofísico debe ser convertido en un documento con expresión geológica; hay que tener en cuenta que los instrumentos geofísicos miden magnitudes relacionadas con las propiedades físicas de las rocas, pero no saben nada sobre la litología, la estratigrafía, la tectónica, etc., que son o no posibles en el lugar de las mediciones. Proceso de datos e interpretación forman en muchas ocasiones una pareja inseparable; el proceso puede aportar diversas soluciones compatibles desde el punto de vista físico-matemático con las medidas tomadas, debiendo darse mayor prioridad en la elección a la viabilidad geológica de la interpretación que al menor error numérico del proceso. Conviene recordar que los ordenadores no realizan interpretaciones, siendo esta actividad hoy por hoy coto reservado del cerebro humano. En cualquier caso, el termino interpretación lleva ya implícito su carácter subjetivo.

2.- INFORMACIÓN SOBRE LA ZONA DE TRABAJO

Esta fase constituye, lógicamente, la primera de todas y es aquella en la que se indaga en las “bases de datos” de un área determinada con el propósito de obtener un primer conocimiento de las características de la zona donde se tiene que realizar el trabajo. Estas características que deben conocerse son muy variadas y podrían diferenciarse en características de tipo logístico y de tipo geológico.

Desde el punto de vista logístico, no se deberá descuidar nunca la labor de reconocimiento general de la zona que pretende investigar, es decir, conocer si hay accesos y cómo son; ver si el terreno es abrupto o es practicable; ver si hay vegetación que impida el emplazamiento de los dispositivos o si esta vegetación es lo suficientemente dispersa como para poder transitar entre ella.

Desde el punto de vista geológico, se tiene un trabajo muy importante: intentar conocer cuáles son los principales rasgos geológicos de la zona de estudio ya que es muy importante saber en qué rango de profundidades se encuentra el objetivo, si existe fracturación u otra serie



de aspectos que deban tenerse en consideración a la hora de plantear los dispositivos, como es la dirección preferente de esa fracturación así como de la estratificación y del plegamiento. Para ello, deberá hacerse una recopilación de la documentación existente lo más exhaustiva posible. Esta fase puede llevar un cierto tiempo pero no cabe duda que la información que es capaz de aportar va a ayudar tanto que la duración de esta primera etapa no deberá preocupar si se extiende mucho. Lógicamente, una vez recopilado todo lo necesario deberá realizarse un análisis de toda esa información.

3.- SELECCIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO

Consiste en la selección del método o de los métodos geofísicos que se consideran más adecuados para cubrir el objetivo. Lo más lógico y habitual es que esta fase de trabajo se pueda realizar pero, en numerosas ocasiones, el método prospectivo viene solicitado por el cliente lo cual implica una ventaja y un inconveniente. La ventaja se debe a que no hay que dedicar tiempo a esta fase pues ya viene cubierta por el cliente al ser éste el que propone o solicita directamente el tipo de investigación que desea para cubrir el objetivo. El inconveniente, sin embargo, radica en la dificultad o imposibilidad de cambiar el método solicitado por otro método geofísico distinto que se acomode mejor a las necesidades del objetivo o a las características de la zona de trabajo.

En cualquier caso, es conveniente que se analicen las características del objetivo perseguido y determine cuál es el método o los métodos más adecuados para alcanzarlo, bien por el tipo de objetivo, bien por la profundidad a la que se espera encontrarlo o bien por las dimensiones del mismo o, incluso, por el presupuesto disponible para abordar los trabajos.

4.- CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Esta etapa podría considerarse como la de mayor importancia al ser el momento en el cual se procede a la obtención de los datos de campo que, tras su procesado, permitirá informar acerca de las características del subsuelo. Para la realización de esta campaña de adquisición de datos en campo, se deberá realizar una serie de tareas complementarias, como es el caso, a veces de la solicitud y gestión de los permisos necesarios para poder realizar los trabajos en la zona de estudio. Aunque simplemente sean permisos de paso, en numerosas ocasiones se tiene que notificar su intención de hacer una serie de trabajos para evitar prohibiciones de ejecución de medidas que, con los equipos desplazados e, incluso, los dispositivos implantados en el terreno, a veces el geofísico se ve obligado a acatar. Si se trata de propiedades privadas, tendrá que comentar las intenciones con el propietario; si son públicas, con el ayuntamiento implicado. Si se trata de pasar o atravesar carreteras, en ocasiones deberá notificarlo al ayuntamiento, a la diputación o a la comunidad autónoma pertinentes. En definitiva, las gestiones administrativas no se escapan del ámbito de trabajo.



Otra de las etapas complementarias, pero que también hay que realizar de forma previa a los trabajos de adquisición de datos, es el desbroce de la maleza que, a veces de forma muy densa, cubre las zonas por donde hay que realizar las medidas, para lo cual habrá que realizar la apertura de vías de paso con las dimensiones suficientes como para permitir el paso del personal y los equipos.

La tercera actividad que se tiene que ser consciente que deberá realizar de manera complementaria es la señalización de los trabajos realizados en campo. Si bien actualmente hay una serie de herramientas que facilitan esta labor, muchas veces es recomendable, además, señalar las medidas realizadas (puntos de medida, comienzos y finales de perfiles, etc.) directamente en el terreno, como es el caso de las marcas con pintura reflectante y biodegradable, así como con cinta de obra. Las herramientas anteriormente indicadas que facilitan la señalización de la situación de los trabajos son, por ejemplo, los equipos portátiles receptores de señal GPS para obtención de las coordenadas más o menos exactas de los puntos medidos. También es posible indicarlo en mapas de diferentes escalas y, lo que suele ser más interesante, en fotografías aéreas.

La señalización lo más exhaustiva posible de la posición de los trabajos realizados es, por tanto, una labor fundamental, en tanto que unos buenos datos y unos buenos resultados carecerían de valor si no se encuentran referenciados correctamente.

Por lo que respecta a la medición de datos en campo propiamente dicha, que es lo que constituye la actividad principal en esta fase del estudio, habría que destacar una serie de facetas importantes como son la calibración de los aparatos, la implantación de los dispositivos, la medición y la comprobación. Es lógico pensar que, para obtener buenas medidas en campo, es decir, medidas coherentes y reales, los aparatos de registro deberán estar calibrados, actividad esta que deberá hacerse de forma regular con el fin de mantener los sensores acordes con las prescripciones técnicas del fabricante.

Con los equipos calibrados, la actividad siguiente es la implantación de los dispositivos, es decir, situar sobre el terreno el aparato emisor, el receptor y los sensores de medida. Para ello, la base geológica es fundamental para determinar las características geológicas del terreno y condicionar, con ello, la disposición sobre el terreno según un criterio geológicamente correcto, que deberá primar siempre sobre el criterio topográficamente más cómodo, ya que hay numerosas ocasiones en que lo geológicamente correcto es incompatible con lo topográficamente deseable. Los cambios bruscos de pendiente, los escarpes, etc., son ejemplos de terrenos que deben evitarse para no introducir posibles elementos de error en los programas de procesado. Según estas indicaciones, se deberá tener siempre bien claro cuáles son las limitaciones de cada método, las circunstancias óptimas de cada dispositivo y las características de cada terreno y de cada objetivo con el fin de analizar, a veces directamente en campo, cómo realizar esa implantación de aparatos, cables y sensores.

5.- PROCESADO DE LOS DATOS

En esta etapa, se suele llevar un ordenador portátil al campo con el fin de realizar un primer procesado y comprobar, en una primera inspección, si los datos registrados son de



buena calidad o han sufrido alteraciones de algún tipo que hayan causado la obtención de ficheros aparentemente erróneos. En este caso, este primer procesado consiste, realmente, en una revisión de la calidad de los datos geofísicos obtenidos. Una vez confirmado que los ficheros son aceptables, se archivarán para su posterior tratamiento en gabinete en lo que constituye el procesado final.

Este procesado requiere la aplicación de diferentes programas informáticos (en la actualidad resulta impensable la actividad manual de procesado de datos, fase que antiguamente llevaba mucho tiempo por la necesidad de comparar los datos con tablas, gráficos, etc.). Estos programas suelen ser específicos de cada aparato o, en ocasiones, de aplicación más generalista.


6.- INTEGRACIÓN DE TODA LA INFORMACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La interpretación, es decir, la formulación de la respuesta al problema planteado. Para ello, el documento geofísico debe ser convertido en un documento con expresión geológica y de representación y recopilación de todos los datos geofísicos mediante herramientas de gestión de información espacial; hay que tener en cuenta que los instrumentos geofísicos miden magnitudes relacionadas con las propiedades físicas de las rocas, pero no saben nada sobre la litología, la estratigrafía, la tectónica, etc., que son o no posibles en el lugar de las mediciones. Proceso de datos e interpretación forman en muchas ocasiones una pareja inseparable; el proceso puede aportar diversas soluciones compatibles desde el punto de vista físico-matemático con las medidas tomadas, debiendo darse mayor prioridad en la elección a la viabilidad geológica de la interpretación que al menor error numérico del proceso. Conviene recordar que los ordenadores no realizan interpretaciones, siendo esta actividad hoy por hoy coto reservado del cerebro humano. En cualquier caso, el termino interpretación lleva ya implícito su carácter subjetivo.

7.- REDACCIÓN DEL INFORME FINAL

La labor de la redacción del informe final no debe ser considerada como la menos importante pues deberá tener la suficiente soltura como para poder expresar cuáles han sido los trabajos realizados, describir la metodología empleada, desarrollar el capítulo correspondiente a los resultados obtenidos y expresar de forma clara y concisa las conclusiones a las que se ha llegado.

Todo esto en sí parece una obviedad pero es importante que se haga un esfuerzo por cuidar tanto la redacción como la presentación de los resultados. Para comprender y valorar estas indicaciones basta con no olvidar que la redacción del informe final constituye la exposición de todo el trabajo realizado en las fases anteriores.



**CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANALISIS
DE LAS INVESTIGACIONES
REALIZADAS**



ÍNDICE

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANALISIS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).

2.1.- Introducción

2.2.- Objetivos

2.3.- Justificación de los trabajos realizados

2.4.- Resultados obtenidos

2.4.1.- Bloque 3D

2.4.2.- Los perfiles 1,2,3, y 4

2.4.3.- Perfiles complementarios

2.5.- Análisis de la investigación

3.- CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENINAR. T,M. BERJA (ALMERÍA).

3.1.- Introducción

3.2.- Potencial Espontáneo (P.E.)

3.2.1.- Interpretación

3.3.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

3.3.1.- Interpretación

3.4.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SED T)

3.5.- Emisión de campo Electromagnético (ECE)



3.5.1.- Trabajos en superficie

3.5.2.- Interpretación de los resultados

3.6.- Trabajos en sondeos

3.6.1.- Resultados.

3.6.2.- Sondeo S2 – Inclínómetro I11

3.6.3.- Sondeo S9 – Inclínómetro I18

3.6.4.- Sondeo S11 – Inclínómetro I20

3.7.- Análisis conjunto de resultados

3.7.1.- Estudio tridimensional de la masa deslizada

4.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES (SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO.

4.1.- Antecedentes

4.2.- Geología e hidrogeología

4.2.1.- Encuadre Geológico

4.2.2.- Hidrogeología

4.3.- Trabajos realizados

4.3.1.- Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)

4.3.2.- Tomografía Eléctrica

4.4.- Método electromagnético V.L.F

4.5.- Creación de Modelo 3D mediante el programa SketchUP

4.6.- Resultados



5.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)

5.1.- Introducción y objetivos

5.2.- Marco geológico

5.3.- Investigaciones geofísicas

5.3.1.- Justificación de los trabajos

5.3.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

5.4.- Análisis de la investigación

6.- PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

6.1.- Introducción y objetivos

6.2.- Marco geológico e hidrogeológico

6.3.- Reconocimiento geológico de detalle

6.4.- Análisis de las filtraciones

6.5.- Investigaciones geofísicas

6.5.1.- Justificación de los trabajos

6.5.2.- Potencial Espontáneo (PE)

6.5.3.- Tomografía Eléctrica (TE)

6.5.4.- Puesta Masa (PM)

6.5.5.- Interpretación conjunto de los perfiles de TE y medias de PM

6.6.- Análisis de la investigación

6.7.- Recomendaciones y propuestas de actuación

6.8.- Actuaciones realizadas



7.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

7.1.- Introducción y objetivos

7.2.- Marco geológico

7.3.- Antecedentes históricos

7.4.- Reconocimiento geológico de detalle

7.5.- Ensayos con trazador salino

7.6.- Investigaciones geofísicas

7.6.1.- Potencial espontáneo

7.6.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

7.6.3.- Potencial Inducido (P.I.)

7.6.4.- Interpretación 2D conjunta de los perfiles de investigación de TE y PI

7.6.5.- Interpretación bidimensional de los resultados de PI

7.7.- Análisis de la investigación

8.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)

8.1.- Introducción

8.2.- Método del Potencial Espontáneo (PE)

8.2.1.- Trabajos relacionados con la zona inundada del embalse

8.2.2.- Trabajos relacionados con la zona no inundada del embalse

8.2.- Método del Potencial Inducido (PI)

8.3.- Método de Tomografía Eléctrica (TE)

8.4.- Análisis conjunto de resultados (TE)

8.5.- Análisis de la investigación



9.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS DE MAMÍFEROS MIOCENOS DEL CERRO DE LOS BATALLONES. T.M DE TORREJÓN DE VELASCO (MADRID).

9.1.- Introducción

9.2.- Aspectos Geológicos del Cerro Batallones

9.2.1.- Unidades Litoestratigráficas

9.2.2.- Las trampas de vertebrados y sus rellenos

9.3.- Prospección Geofísica en el cerro Batallones

9.3.1.- Perfiles realizados de tomografía eléctrica 2D durante las campañas de campo del 2002 al 2013

9.3.2.- Tomografía Eléctrica 3D

9.3.3.- Creación de un Modelo 3D mediante el programa SketchUP

9.4.- Análisis de la investigación y mejoras



1.- INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo las investigaciones propuestas en este proyecto, se realizaron ocho campañas de prospección geofísica en diferentes lugares de la geografía española, donde la problemática estaba perfectamente caracterizada. En algunos casos, se realizaron las pruebas necesarias (en forma de sondeos mecánicos) para la corroboración de la información refrendada en esta tesis doctoral.

En estas campañas, se aplicaron las metodologías geofísicas que más se adaptaban a la problemática encontrada. Posteriormente se introdujeron los datos en programas de gestión de información espacial para modelar, visualizar rápidamente y examinar los datos geofísicos de forma global. El objetivo fue siempre la de caracterizar el problema de la forma más detallada posible.

Las siete campañas geofísicas realizadas fueron las siguientes:

1º REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).

2º CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENÍNAR. T.M. BERJA (ALMERÍA)

3º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRANEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES (SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO

4º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)

5º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

6º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

7º CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)

8º PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS FÓSILES MIOCENOS DE BATALLONES (Torrejón de velasco, madrid).



2.- REALIZACIÓN DE UNA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D PARA LA LOCALIZACIÓN DE CAVIDADES EN EL EMBALSE DE SANTOLEA (TERUEL).

2.1.- Introducción

El presente informe recoge los resultados obtenidos en la campaña de investigación geofísica mediante Tomografía Eléctrica 3D (en adelante TE3D) realizada en el estribo izquierdo de la presa de Santolea. El objetivo de la investigación ha sido la caracterización de los materiales que conforman la cerrada tratando de localizar la posible existencia de una serie de fracturas y/u oquedades geológicas, que afectando a los materiales carbonatados aflorantes, pueden condicionar el recrecimiento de la presa de Santolea (Teruel).

El embalse de Santolea se encuentra emplazado sobre materiales carbonatados del Cretácico inferior (Figura 142).

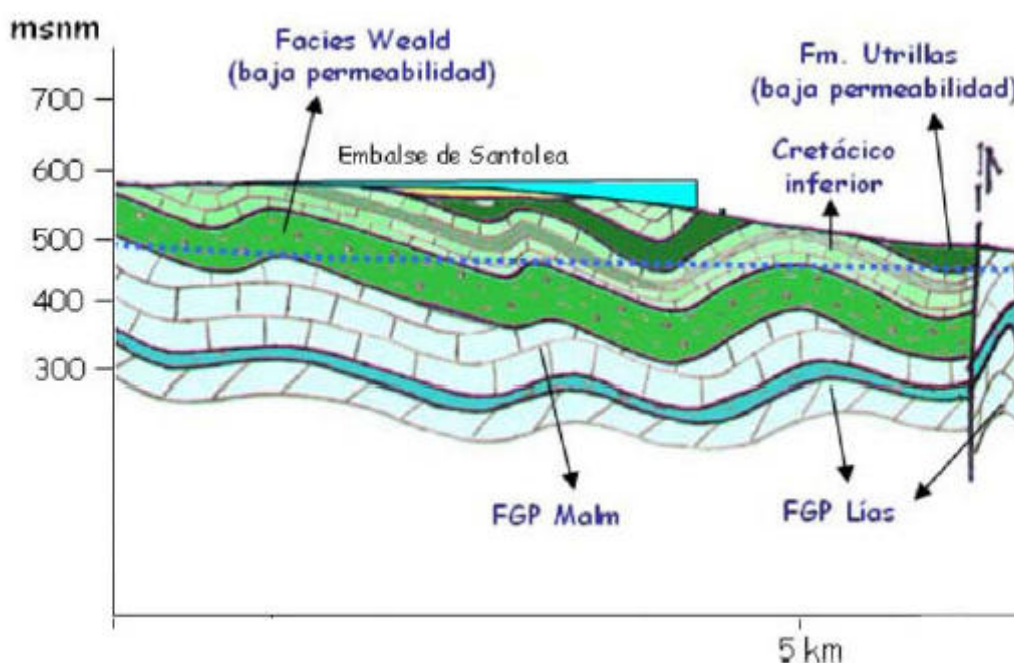


Figura 142. Corte geológico esquemático del emplazamiento del mismo.

Durante las obras de recrecimiento ha aparecido una importante cavidad en el estribo izquierdo de más de 100 m de longitud asociado a formaciones calcáreas del cretácico inferior que se sitúa a cota del futuro nivel de embalse, así como pequeñas faltas en la recuperación de testigo en los sondeos de reconocimiento que ponen de manifiesto la posibilidad de existencia de fenómenos de fracturación y/o karstificación que, afectando a los materiales carbonatados, pueden suponer un problema para las obras de recrecimiento de la presa y su futura gestión. En noviembre de 2009 se realizaron una serie de trabajos geofísicos de caracterización de ambas



márgenes que pusieron de manifiesto la existencia de cavidades en la zona del estribo izquierdo. Tras estos resultados, se ha decidido estudiar con grado de detalle superior la zona que será objeto de las obras de recrecimiento con el objetivo de localizar las posibles cavidades y/o fracturas que puedan afectar a las obras en esta zona.

2.2.- Objetivos

El objetivo de la investigación propuesta será la detección de fracturas y/u oquedades dentro de los materiales carbonatados cretácicos que constituyen la cerrada actual de la presa y que serán objeto de los trabajos de recrecimiento de la misma.

Las investigaciones realizadas han consistido en la realización de un estudio geofísico mediante la técnica de Tomografía Eléctrica y su representación mediante los programas Voxler, SketchUp y Autocad.

La campaña de investigación geofísica ha sido planificada teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Existen evidencias de la existencia de una cavidad de dirección norte - sur de gran dimensión (mas de 100 m de largo) junto al estribo izquierdo de la presa.
- Es preciso alcanzar profundidades de investigación que superen los 15m de profundidad.
- Se pretenden localizar anomalías relacionables con la existencia de fracturas y/u oquedades de gran tamaño (superiores al 1 m³ de volumen).
- La zona de estudio comprende la explanada ocupada por la cantera que sirvió para la construcción de la presa original.

Considerando estos condicionantes previos así como los requerimientos de resolución del estudio, espacio disponible y metodología de toma de datos, los trabajos realizados han sido los siguientes:

- Ejecución de 11 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 33 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Dados los requerimientos de resolución y penetración necesarios, se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.
- Elaboración de 4 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 47 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Al igual que en el caso anterior se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.
- Realización de 2 perfiles de investigación complementarios de 24 m de longitud con separación interelectrónica de 1 m empleando también los dispositivos Polo – Dipolo y Polo – Polo.



2.3.- Justificación de los trabajos realizados

El empleo de las técnicas de Tomografía Eléctrica 3D responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad del parámetro registrado (resistividad) a la existencia de discontinuidades geoelectricas en los mismos (fracturas, rellenos, oquedades, etc.).
- Obtención de secciones de resistividad bidimensionales y tridimensionales mediante programas de representación que permitirán determinar la posición de las posibles fracturas y/u oquedades dentro de los materiales carbonatados cretácicos. El estudio permite cartografiar en 3D la ubicación de las fracturas, grandes oquedades, zonas de alteración, etc. en caso de existencia dentro de la zona de estudio.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente, dado el numero de perfiles ejecutados, separación de los mismos y espaciado interelectródico.

2.4.- Resultados obtenidos

Los trabajos de investigación geofísica han consistido en la realización de 17 perfiles de investigación (figura 143) con objetivos diferenciados:

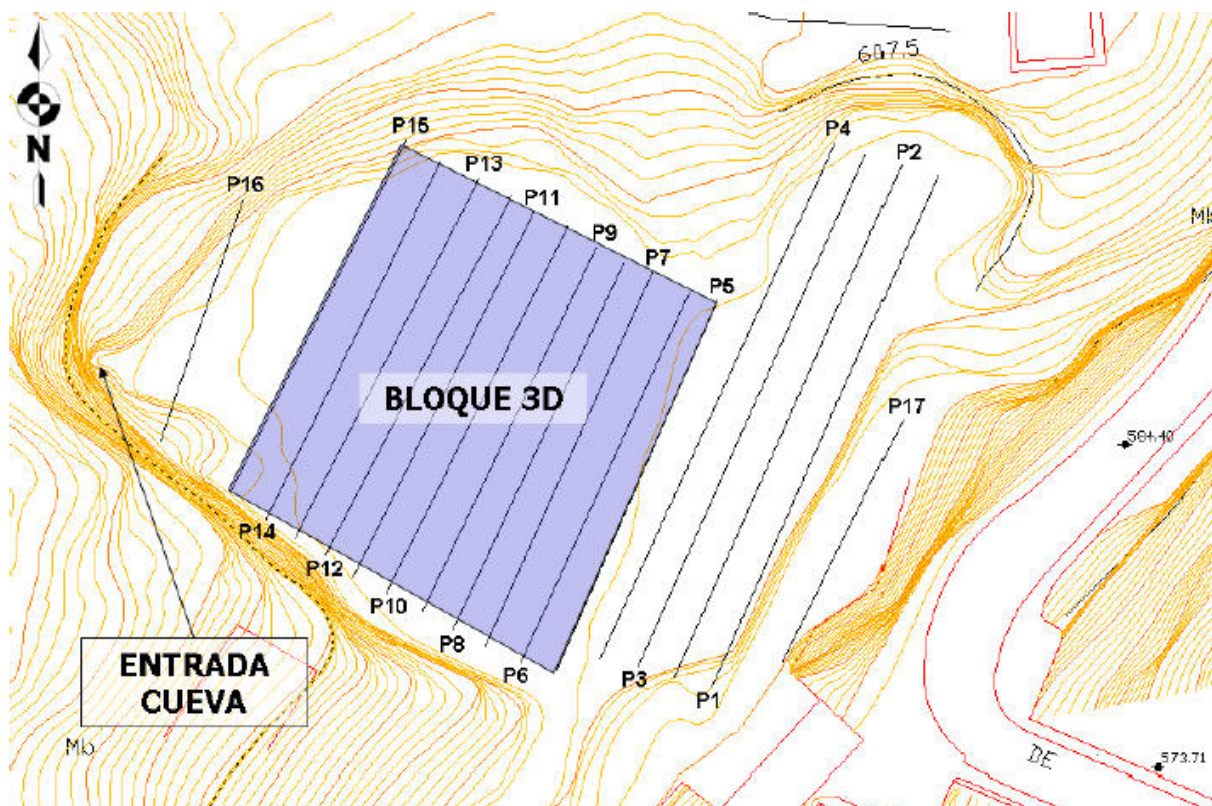


Figura 143. Plano de situación de los perfiles de investigación realizados en la zona de estudio.



– Ejecución de un 11 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 33 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Dados los requerimientos de resolución y penetración necesarios, se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo. Dichos perfiles se han procesado en 3D para localizar con alta resolución, las posibles oquedades y/o fracturas existentes en esta zona.

– Realización de 4 perfiles de TE con espaciado interelectrónico de 1 m, 47 m de longitud y separación entre los mismos de 3 m. Al igual que en el caso anterior se han registrado dos dispositivos, Polo – Dipolo y Polo – Polo.

– Elaboración de 2 perfiles de investigación complementarios de 24 m de longitud con separación interelectrónica de 1 m empleando también los dispositivos Polo – Dipolo y Polo – Polo. El primero de ellos (Perfil 12) se localiza entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la relación entre los resultados del estudio 3D y la cueva. El segundo de ellos (perfil 13) se ha realizado en el extremo sureste de la explanada con idea de analizar también la continuidad de los resultados del estudio 3D y los 4 perfiles de mayor longitud (perfiles 1, 2, 3 y 4) con la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa de Santolea.

De cara a la interpretación se ha tomado como referencia y con carácter paramétrico los resultados de los perfiles de investigación N°5 y 6 pertenecientes al bloque 3D, los cuales cortan una zona en la que son visibles la existencia de cavidades que afloran en superficie. Los valores de resistividad que se obtengan en estas zonas serán los que se empleen como referencia a la hora de establecer la posible existencia de oquedades en el resto de la zona de estudio

2.4.1.- Bloque 3D

El bloque 3D realizado en la zona del estribo izquierdo se ha realizado a partir de la ejecución de 11 perfiles de tomografía eléctrica (perfiles 5 a 15) de 33 m de longitud separados 3 m entre sí. El espaciado interelectrónico en cada uno de los perfiles ha sido de 1 m y se han empleado los dispositivos de registro de Polo – Dipolo y Polo – Polo, dada la necesidad de profundidad de investigación necesaria (más de 22 m de profundidad). El bloque 3D generado presenta unas dimensiones de 33 m de ancho por 30 m de largo y 25 m de profundidad.

De cara a facilitar la interpretación, se ha incluido el modelo topográfico de la zona de estudio (Figura 144).

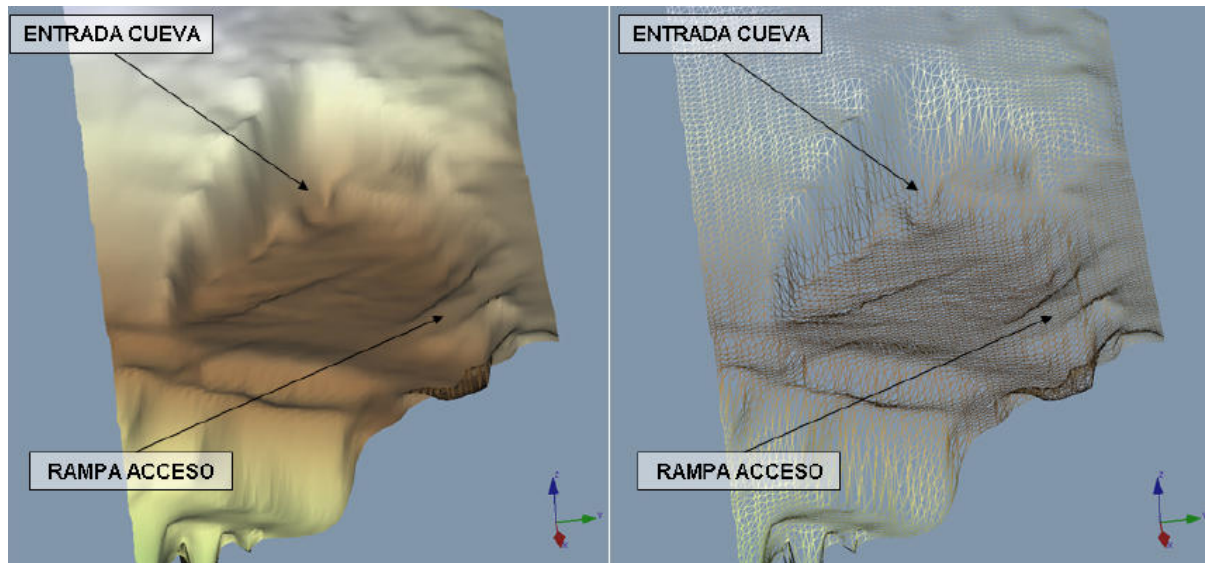


Figura 144. Modelo topográfico de la zona de estudio empleado en la modelización 3D (Software Voxler).

La inversión de los datos permite obtener el bloque 3D de resistividades del subsuelo (Figura 145).

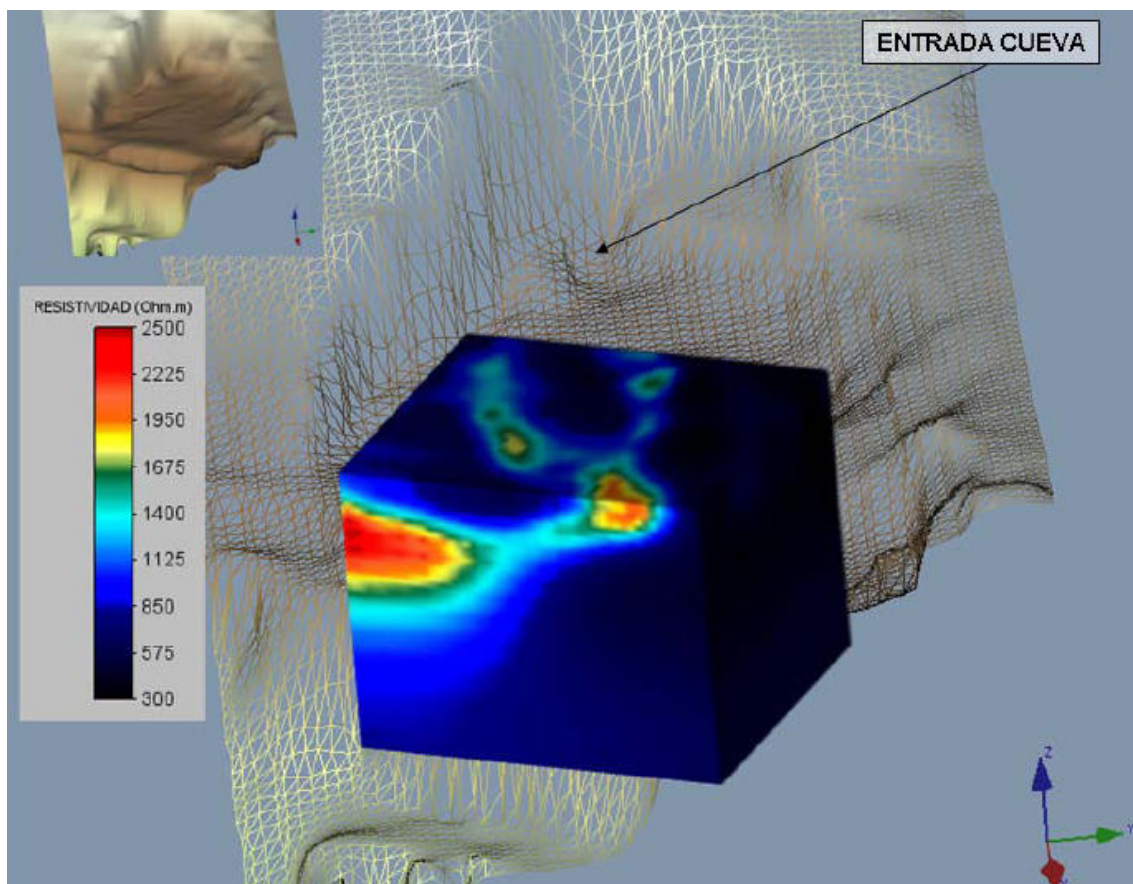


Figura 145. Bloque 3D de resistividades (Software Voxler).



Un primer análisis de los resultados obtenidos en el bloque 3D de resistividades nos permite observar como en general, los materiales en la zona de estudio se presentan de manera homogénea desde el punto de vista geoelectrico (tonos azulados) y con ausencia de alteraciones yo posibles cavidades Únicamente cabe destacar la existencia de dos bandas de anomalía de naturaleza resistiva (líneas verdes discontinuas que unen zonas de tonos amarillos y rojos) que aparecen en superficie con cierta alineación con la entrada a la cueva existente al fondo de la explanada (Figura 146). Dichas zonas resistivas pueden indicar la presencia de zonas de fracturación y oquedades.

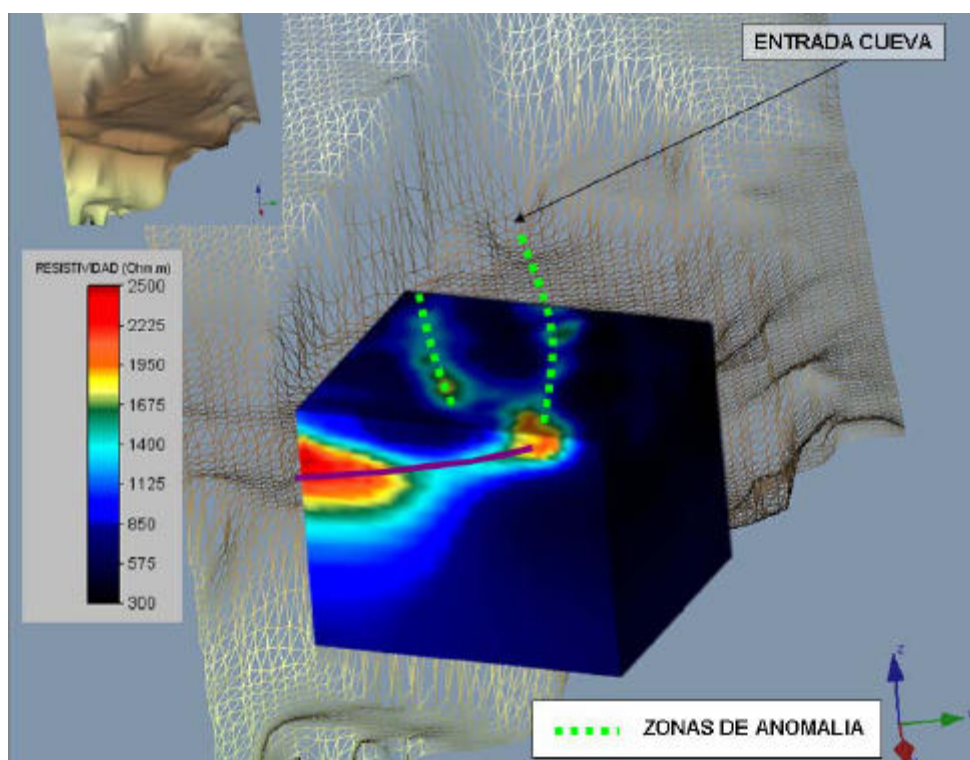


Figura 146. Bloque 3D de resistividades (Software Voxler).

El análisis del bloque 3D permite definir un posible plano de discontinuidad (línea morada) que uniría parte de las anomalías resistivas superficiales con una anomalía situada en el extremo sur del bloque 3D.

El tratamiento de los datos obtenidos permite generar superficies de igual valor de resistividad que delimiten zonas de interés. En este caso, se han definido dos isosuperficies (Figura 147):

- Isosuperficie de 1.250 Ohm·m (amarillo): delimitación de zonas que pueden presentar fracturación
- Isosuperficie de 1.850 Ohm·m (rojo): delimitación de zonas susceptibles de presentar cavidades.

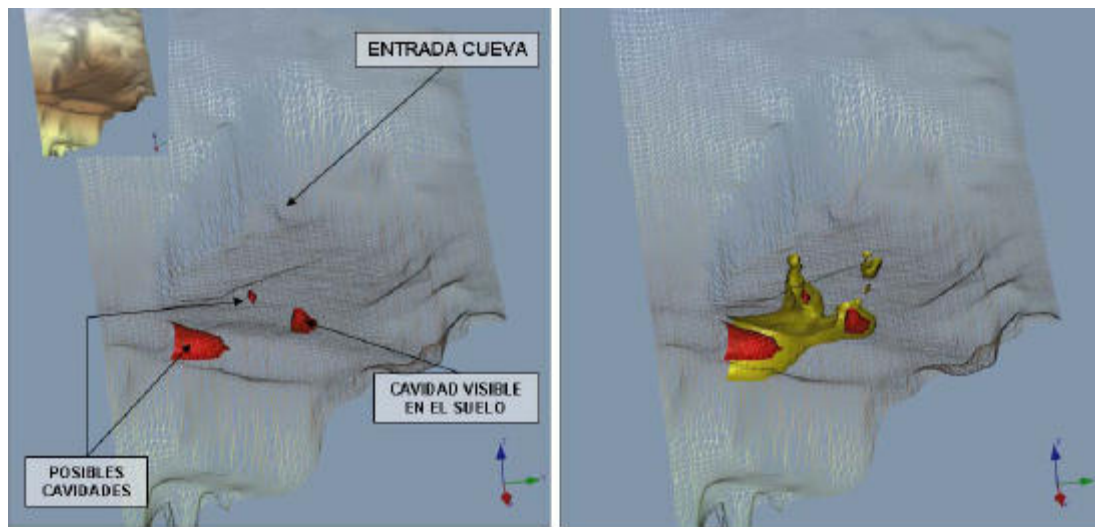


Figura 147. Modelo de isosuperficies para la delimitación espacial de posibles cavidades (izquierda) y zonas de fracturación (derecha). Visualización mediante Voxler.

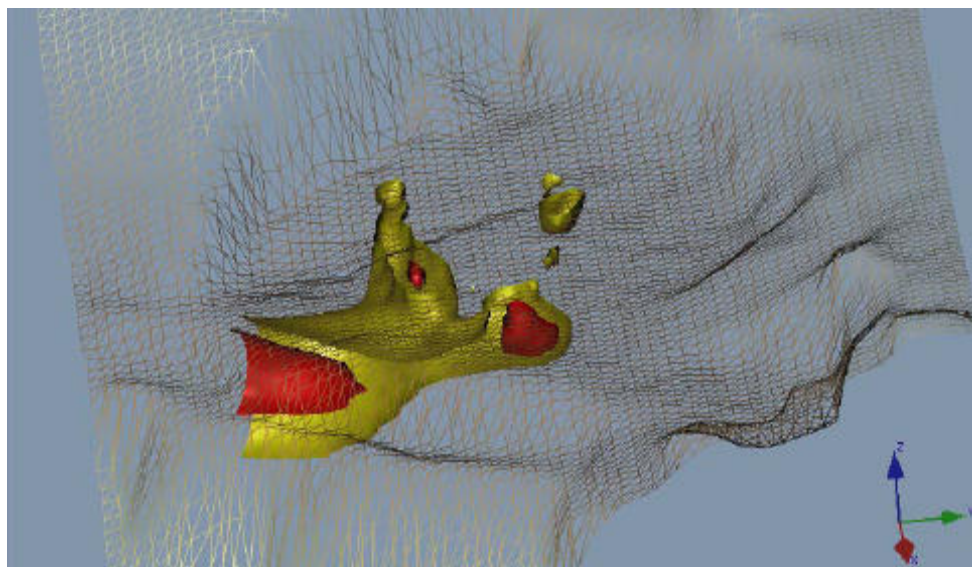


Figura 148. Detalle del modelo de isosuperficies delimitando posibles cavidades (rojo) y zonas de fracturación (amarillo). Visualización mediante Voxler.

El tratamiento de los datos también permite la obtención de plantas a diferentes profundidades permitiendo analizar la variación de la resistividad de los materiales en función de la profundidad.

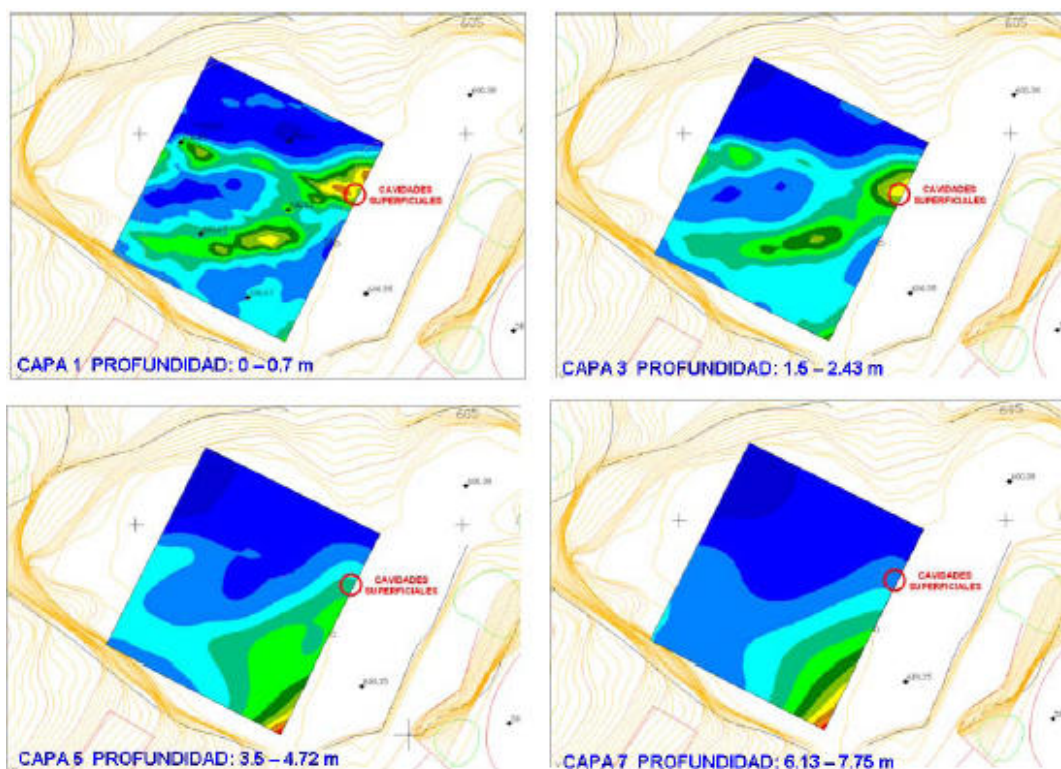


Figura 149. Plantas de resistividad a diferentes profundidades (Software Autocad).

Las figuras 149 y 150 muestran la variación de resistividades en función de la profundidad. Podemos ver como a nivel de superficie (capa1) se denotan con claridad la existencia de dos bandas de anomalía resistiva (tonos verdes – y rojos) que parecen coalescer en la esquina oeste del bloque 3D. En esta zona es donde aparecen los valores de mayor resistividad y es coincidente con la posición de las cavidades que afloran en superficie en la explanada. Estos valores se emplean con carácter paramétrico de cara a delimitar las posibles zonas en las que pueden existir cavidades en otras zonas del bloque 3D. Si continuamos el análisis observando los resultados a mayor profundidad vemos como las dos zonas de anomalía resistiva superficial van desapareciendo. De hecho, en la planta correspondiente a la capa 7 no parecen quedar restos de ambas anomalías. Por lo tanto, podemos definir la ubicación de las zonas de fracturación y/o cavidades con precisión, las cuales, no parecen prolongarse más allá de los 7 m de profundidad.

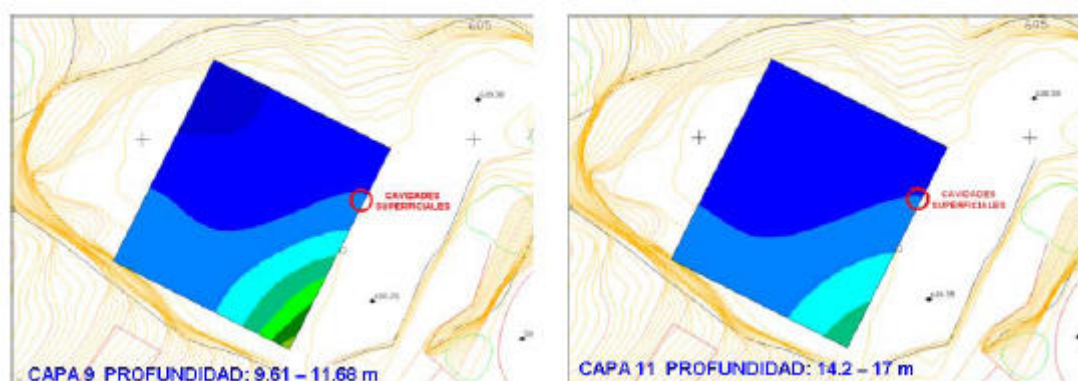


Figura 150. Plantas de resistividad a diferentes profundidades (Software Autocad).



El análisis de la variación de resistividades de las plantas a diferentes profundidades permite la localización de una zona de anomalía resistiva situada en la esquina sur del bloque 3D que, dados los valores obtenidos, podría indicar la existencia de una cavidad en este sector la cual parece estar situada entre los 4 y 9 m de profundidad (Figura 151). No obstante, la posición de la misma (en el extremo del bloque 3D/perfil n°5) así como el fuerte contraste de resistividades parece indicar que el tamaño real de la anomalía así como la entidad de la misma debe ser mucho menor.

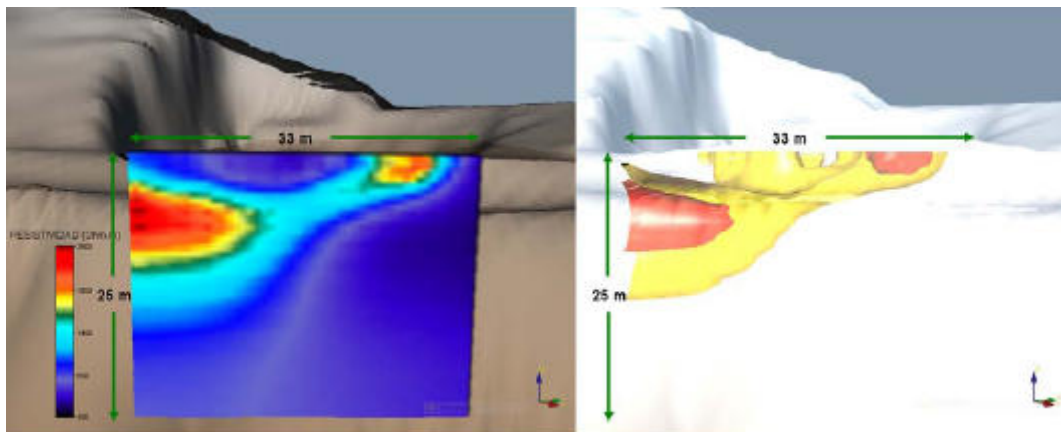


Figura 151. Vista frontal del bloque 3D correspondiente al perfil TE 5 mostrando la posible conexión entre las anomalías superficiales y la profunda (Software Voxler).

Parece existir cierta relación entre las anomalías resistivas de carácter superficial la anomalía situada en profundidad en la esquina sur del modelo 3D (Figura 151). Esta relación podría marcar un posible plano de fracturación que uniría ambas zonas de anomalía y podría ser el causante de las cavidades existentes en ambas zonas. Atendiendo a la estructura general de los materiales de la cerrada, dicho plano podría estar relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada.

La figura 152 muestra una visión cenital de las isosuperficies generadas para delimitar las posibles zonas de fracturación y cavidades.



Figura 152. Imagen cenital de las isosuperficies generadas para delimitar la zona de posibles cavidades y de fracturación (Software Voxler).



El análisis de ambas imágenes muestra la posible conexión entre las anomalías correspondientes a las cavidades superficiales y a la situada en profundidad en el extremo sur del bloque 3D.

El resto del bloque 3D aparece con valores de resistividad que indican el carácter inalterado de los materiales analizados.

2.4.2.- Los perfiles 1,2,3, y 4

Los perfiles 1, 2, 3 y 4 presentan una longitud mayor alcanzando los 47 m de longitud y se han realizado aprovechando el mayor espaciado que presenta la explanada su la zona sureste (Figura 153). El objetivo de los mismos es analizar la continuidad lateral de los resultados obtenidos por el bloque 3D.

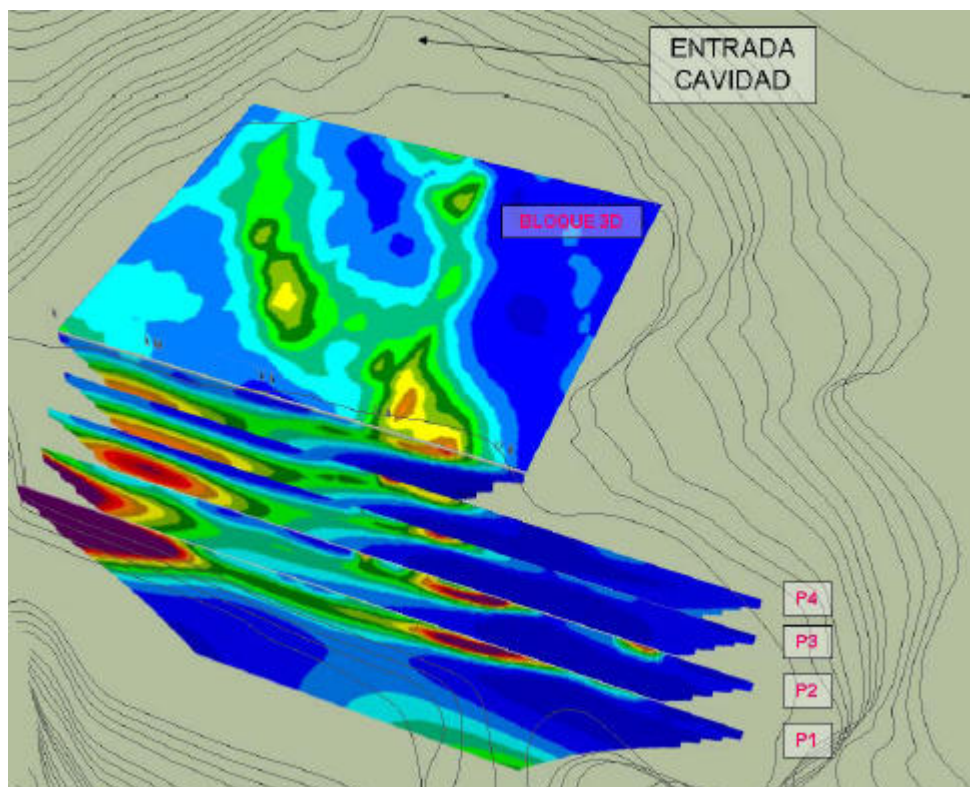


Figura 153. Imagen 3D de los perfiles TE 1, 2, 3 y 4 (Software SketchUp).

Los perfiles 3 y 4 son los situados de forma más cercana al bloque 3D. Ambos perfiles muestran resultados similares mostrando con claridad la continuación de la anomalía superficial y de la posible cavidad situada en profundidad en la parte sur del bloque 3D (Figura 154).

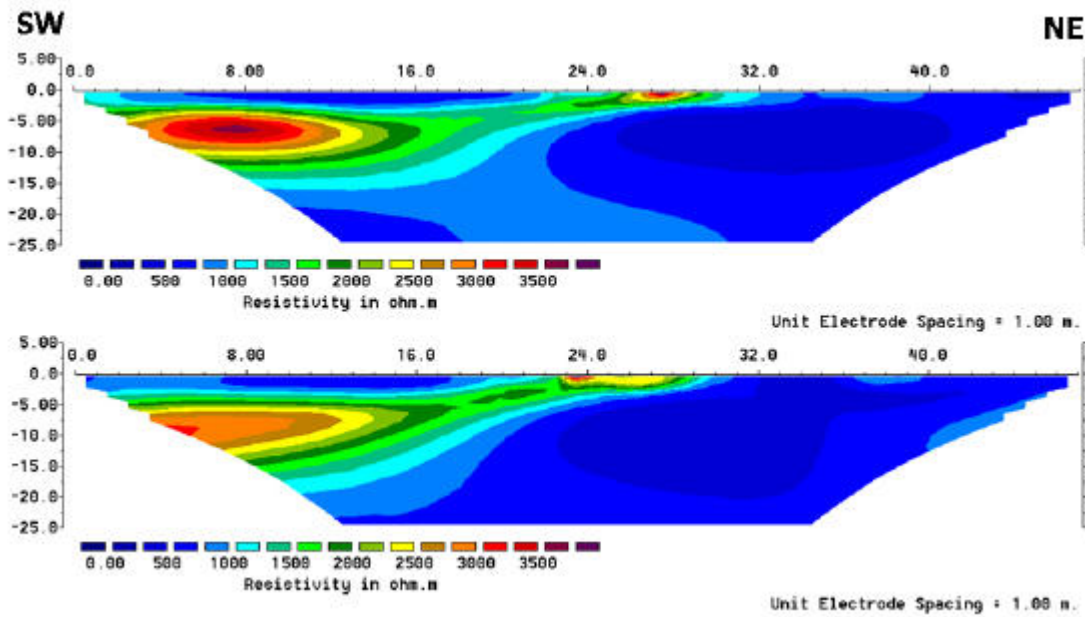


Figura 154. Sección geoelectrica de los perfiles 3 (arriba) y 4 (abajo)

En el caso de los perfiles 1 y 2, los resultados de los mismos muestran una anomalía muy resistiva en el extremo SW debida a la presencia de hormigón armado empleado en esta zona como refuerzo del talud o ejecución de muros en el borde de la explanada de la cantera (Figura 155).

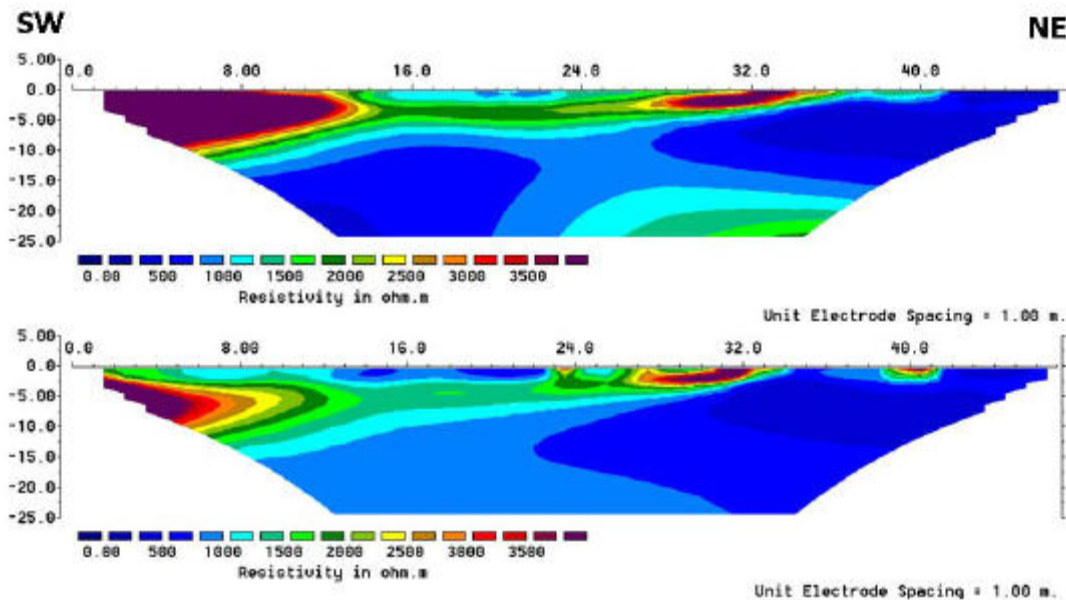


Figura 155. Sección geoelectrica de los perfiles 1 (arriba) y 2 (abajo)

La presencia de estos materiales así como el efecto que generan impide el estudio de la continuidad de la anomalía relacionada con la existencia de una posible cavidad detectada en este sector en el bloque 3D y los perfiles 3 y 4.



2.4.3.- Perfiles complementarios

Perfil de Tomografía Eléctrica nº16

El perfil de investigación N°16 se localiza entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la posible relación entre los resultados del bloque 3D y la cueva existente en esta zona.

Presenta una reducida longitud de tan solo 24 m de longitud, debido al poco espaciadisponible para la implantación del mismo. La separación interelectrónica ha sido de 1 m empleando los dispositivos de registro Polo – Dipolo y Polo – Polo.

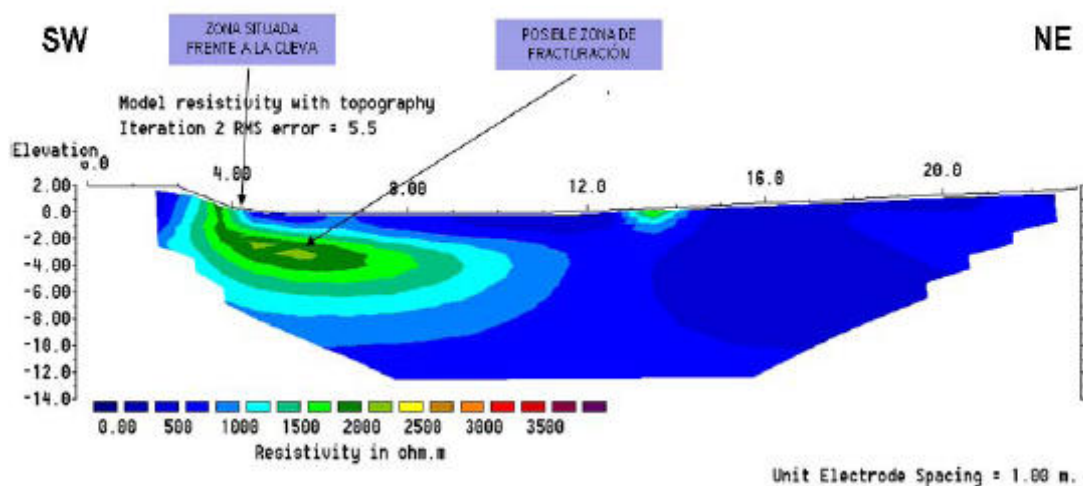


Figura 156. Sección geoelectrónica del perfil P12

El análisis del perfil muestra una anomalía resistiva que podría indicar la presencia de una zona fracturada coincidente con la posición de la entrada a la cueva y que marca una alineación entre dicha entrada y una de las zonas fracturadas que marca el bloque 3D realizado (línea morada en la Figura 157).

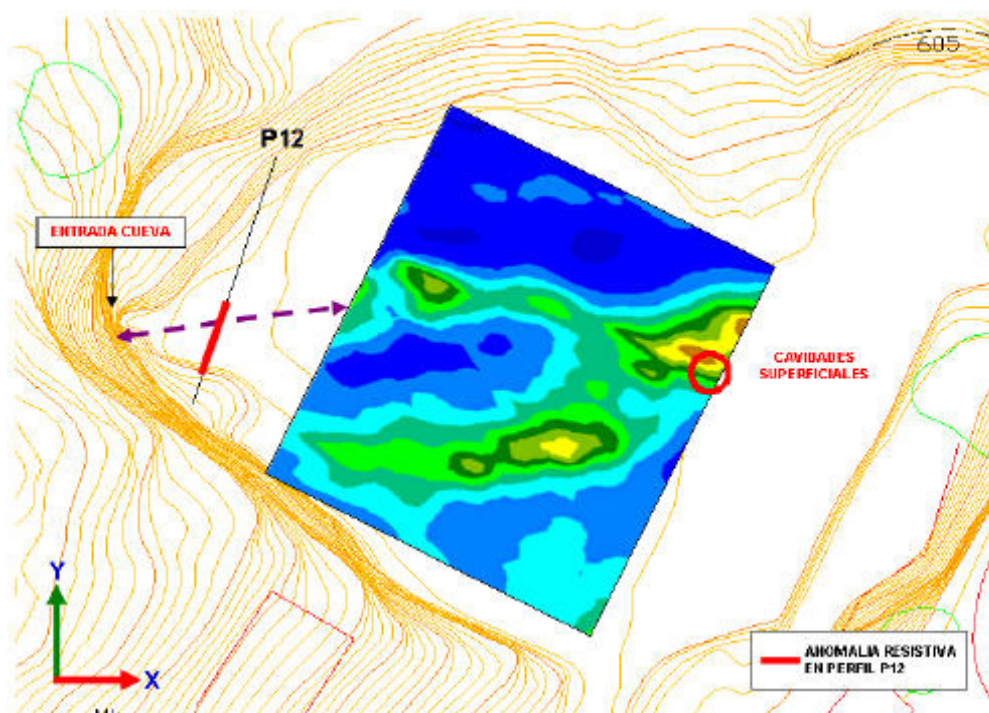


Figura 157. Esquema mostrando la alineación existente entre la anomalía resistiva del perfil P12 y las del bloque 3D (Software Autocad)

Perfil de Tomografía Eléctrica n°17

El perfil de investigación N°17 se localiza en el borde SW de la explanada objeto de estudio. El objetivo del mismo es analizar el sustrato en la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa. Al igual que en el caso del perfil anterior, la longitud del mismo es de únicamente 24 m debido al poco espacio disponible para la implantación del mismos. La separación interelectródica ha sido de 1 m empleando los dispositivos de registro Polo – Dipolo y Polo – Polo.

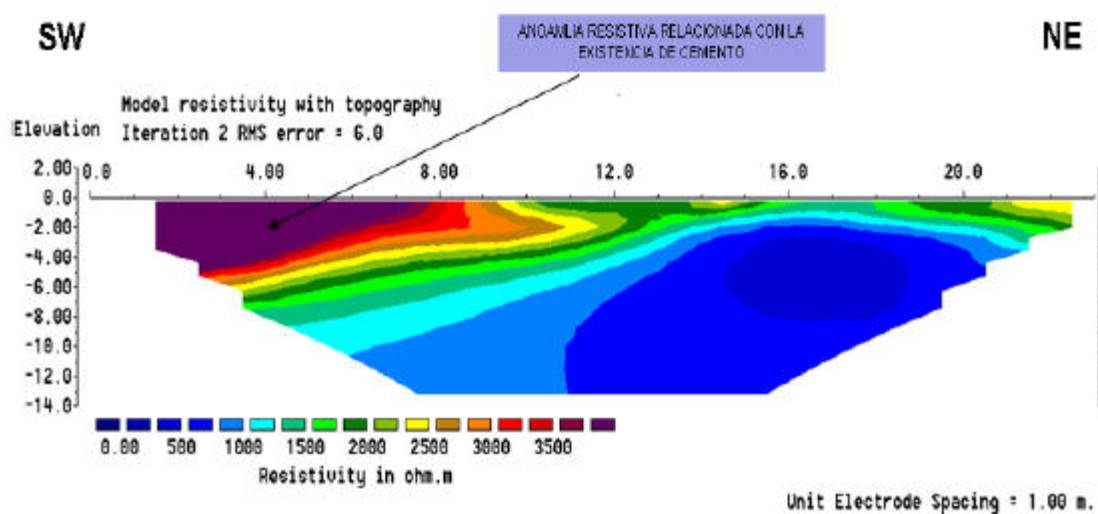


Figura 158. Sección geoelectrónica del perfil P13



El perfil muestra una importante anomalía resistiva en el extremo SW del perfil debida a que el perfil discurre en esta parte, por el muro de refuerzo del talud del estribo izquierdo de la presa. Desde el punto de vista geoelectrico, esta zona no parece presentar zonas de fracturación y/u oquedades.

Si analizamos de forma conjunta los resultados de todos los perfiles realizados en la zona de estudio (Figura 159) vemos la concordancia en los resultados de m los mismos:

- Se aprecia con claridad la alineación que forman las anomalías resistivas superficiales hasta el borde sureste de la explanada.
- Estas anomalías superficiales no parecen presentar un desarrollo vertical hacia el macizo rocoso.
- Se delimita con claridad la posición de la posible cavidad situada en la parte sur del bloque 3D y los perfiles 3 y 4.
- Se define un posible plano de fracturación que uniría las zonas de anomalía resistiva relacionadas con la posible existencia de cavidades y/o zonas de fracturación.. Atendiendo a la estructura general de los materiales de la cerrada, dicho plano podría estar relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada.

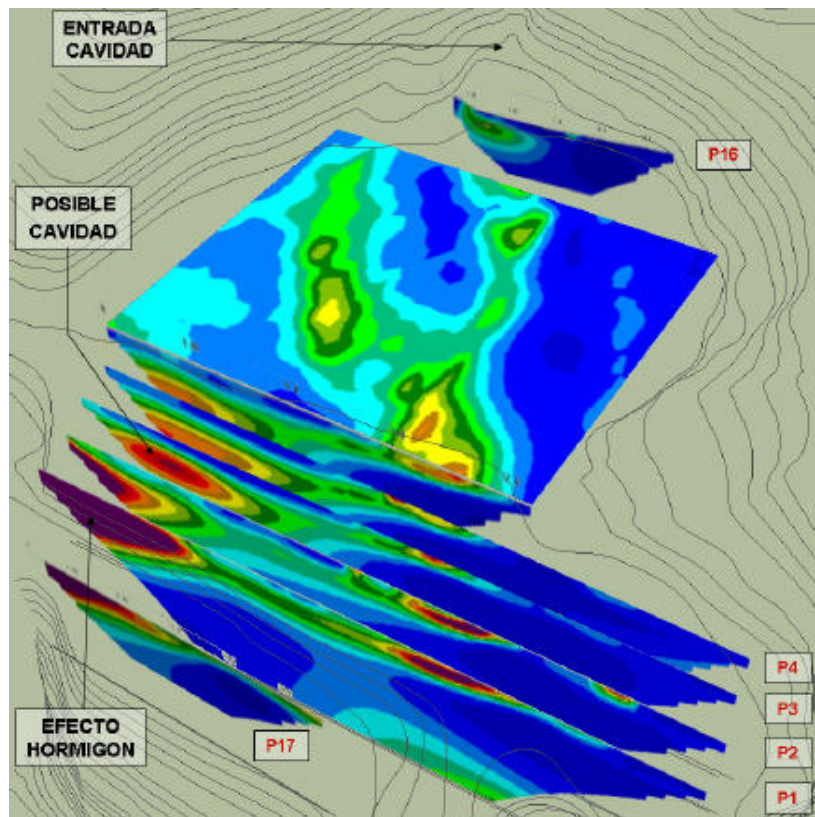


Figura 159. Montaje 3D conjunto de los perfiles realizados y bloque 3D (Software SketchUp)

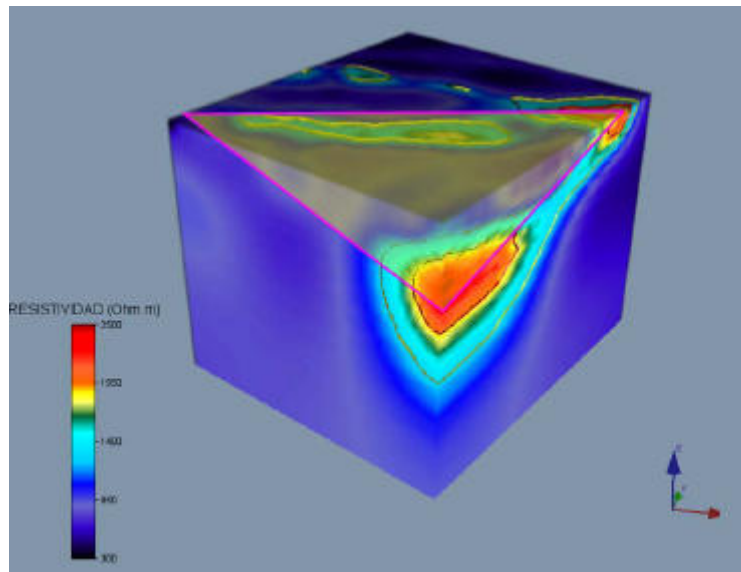


Figura 160. Plano que une las anomalías correspondientes a zonas de fracturación y posibles cavidades. (Software Voxler)

2.5.- Análisis de la investigación

El análisis de los resultados obtenidos es el siguiente:

– El estudio de Tomografía Eléctrica 3D y su representaciones mediante los programas Voxler, SketchUp y Autocad han permitido localizar con claridad la existencia de una serie de anomalías resistivas relacionables con la existencia de cavidades y zonas de fracturación dentro de los materiales carbonatados que conforman la zona investigada de la zona del estribo izquierdo.

– A nivel superficial se detectan dos alineaciones de zonas resistivas que podrían indicar la existencia de cavidades. Dichas zonas de anomalía no se extienden en profundidad más allá de los 7 m. y no parecen por tanto, presentar desarrollo vertical hacia el macizo rocoso.

– Ambas alineaciones parecen estar relacionadas con la gran cavidad existente en el extremo oeste de la explanada. Este hecho se pone de manifiesto al comparar la alineación existente entre las anomalías que aparecen en el bloque 3D, y en el resto de perfiles realizados en la explanada (perfiles 1, 2, 3, 4 y 16).

– Existe una anomalía resistiva en el extremo sur del bloque 3D que parece indicar la existencia de una posible cavidad situada entre los 4 y 9 m de profundidad. No obstante, la posición de la misma (en el extremo del bloque 3D) así como el fuerte contraste de resistividades parece indicar que el tamaño real de la anomalía así como la entidad de la misma debe ser mucho menor. Esta anomalía se aprecia en los perfiles 3 y 4 confirmando la continuidad lateral de la misma.

– El análisis de los datos 3D pone de manifiesto la posible relación geométrica entre la anomalía resistiva situada en profundidad en la esquina sur del modelo 3D y perfiles de tomografía 3 y 4 con las zonas de anomalía superficial que presentan cavidades aflorantes en superficie. Esta



relación podría marcar un posible plano de fracturación que uniría ambas zonas de anomalía pudiendo ser el causante de las cavidades existentes en ambas zonas. Dicho plano podría estar relacionado con la estratificación de la zona y más concretamente con uno de los estratos mas margosos de la secuencia carbonatada de la cerrada.

– Los perfiles 1, 2, 3 y 4 muestran una clara continuidad de los resultados obtenidos en el bloque 3D. En el caso de los perfiles 3 y 4 se detecta con claridad la existencia de la posible cavidad existente en el extremo sur del bloque 3D, así como la prolongación de las anomalías resistivas detectadas en superficie.

– Los perfiles 1 y 2 presentan una fuerte anomalía resistiva en el extremo suroeste de los mismos debido a que la traza de los mismos se situó sobre terreno hormigonado siendo este el causante de la anomalía. Esta interferencia no permite determinar la continuidad de la cavidad detectada en esta zona tanto por el bloque 3D así como por los perfiles 3 y 4.

– El perfil P16 se encuentra situado entre la entrada de la cueva y el bloque 3D y trata de analizar la posible relación entre los resultados del bloque 3D y la cueva existente en esta zona. El perfil muestra la existencia de anomalía resistiva que podría indicar la presencia de una zona fracturada coincidente con la posición de la entrada a la cueva y que marca una alineación entre dicha entrada y una de las zonas fracturadas que marca el bloque 3D realizado.

– El perfil de investigación N°17 se localiza en el borde SW de la explanada objeto de estudio y se ha realizado con el objetivo del analizar el sustrato en la zona de excavación del estribo izquierdo de la presa. El perfil muestra una importante anomalía resistiva en el extremo SW del perfil debida al muro de refuerzo del talud del estribo izquierdo de la presa. Desde el punto de vista geoelectrico, esta zona no parece presentar zonas de fracturación y/u oquedades.

– En general, los materiales en la zona de estudio se presentan inalterados exceptuando las zonas de anomalía anteriormente señaladas

Para finalizar este estudio se realizaron varios sondeos mecánicos y catas en las zonas donde, según los resultados, se preveía la existencia de cavidades. Estos ensayos fueron todo un éxito corroborando la información de esta investigación.



3.- CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE BENINAR. T.M. BERJA (ALMERÍA).

3.1.- Introducción

El estudio de la zona deslizada de la margen derecha del embalse de Beninar persigue múltiples objetivos tratando, en definitiva, de reducir las incertidumbres existentes sobre el tamaño y límites del área movilizada, volumen de material afectado y comportamiento futuro de la zona durante la gestión del embalse.

Para ello, se han realizado trabajos específicos de prospección geofísica mediante una serie de técnicas y programas con el objetivo de alcanzar los siguientes objetivos:

- Delimitar espacialmente la masa deslizada, tanto lateral como verticalmente.
- Analizar el estado tensional actual de la zona afectada por el deslizamiento, analizando, desde el punto de vista geofísico, la estabilidad de la misma.

3.2.- Potencial Espontáneo (P.E.)

El objetivo de la realización de una campaña de investigación mediante Potencial Espontáneo en este sector, se fundamenta en la utilidad de este sistema de investigación para la delimitación espacial de zonas sometidas a fenómenos de deformación como consecuencia del proceso de movilización de la masa deslizada, así como la detección de zonas de alteración relacionables con fracturas asociadas a este movimiento.

Los trabajos realizados en este sector han consistido en la toma de un total de 443 puntos de observación distribuidos de forma aleatoria a lo largo de una superficie aproximada de 22 Ha (Figura 161). Dicha superficie sobrepasa la extensión supuesta de la zona movilizada por el deslizamiento con el fin de detectar los límites de la masa que está involucrada en el deslizamiento.

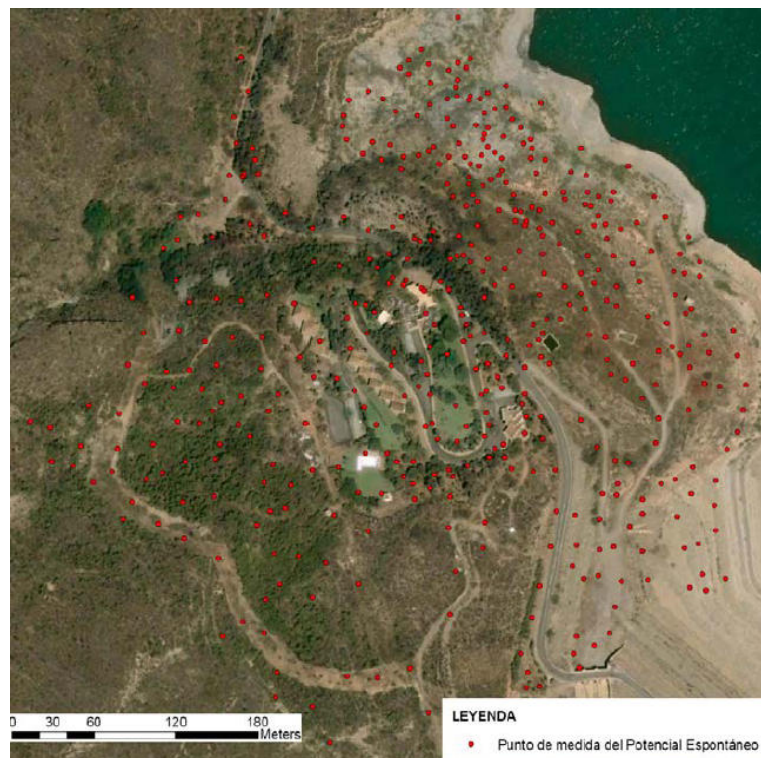


Figura 161. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizado en la margen derecha para el estudio del deslizamiento (Representación mediante Software ArcGIS)

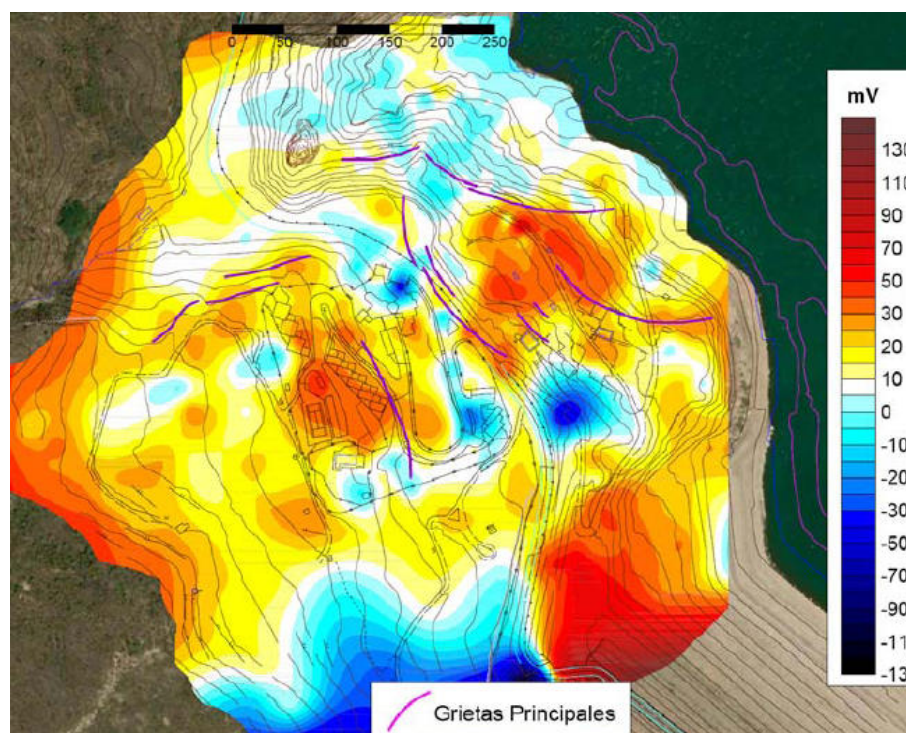


Figura 162. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benín con indicación de las principales grietas observables en superficie (Software Surfer)



3.2.1.- Interpretación

El análisis de los datos de potencial espontáneo (Figura 163) mediante Surfer muestra la posible dimensión y estructura de la masa deslizada basada en la correlación entre los valores de potencial obtenidos y las características de los materiales analizados.

De forma general, los sectores con un elevado valor de potencial se suelen relacionar con zonas o bloques de material sometidos a procesos de deformación plástica los cuales suelen estar relativamente inalterados mientras que las zonas de bajo potencial corresponden a zonas relajadas y/o fracturadas en las que se suelen concentrar planos de debilidad y/o alteración que facilitan la infiltración de agua, haciendo disminuir notablemente los bajos valores de potencial y crear anomalías negativas.

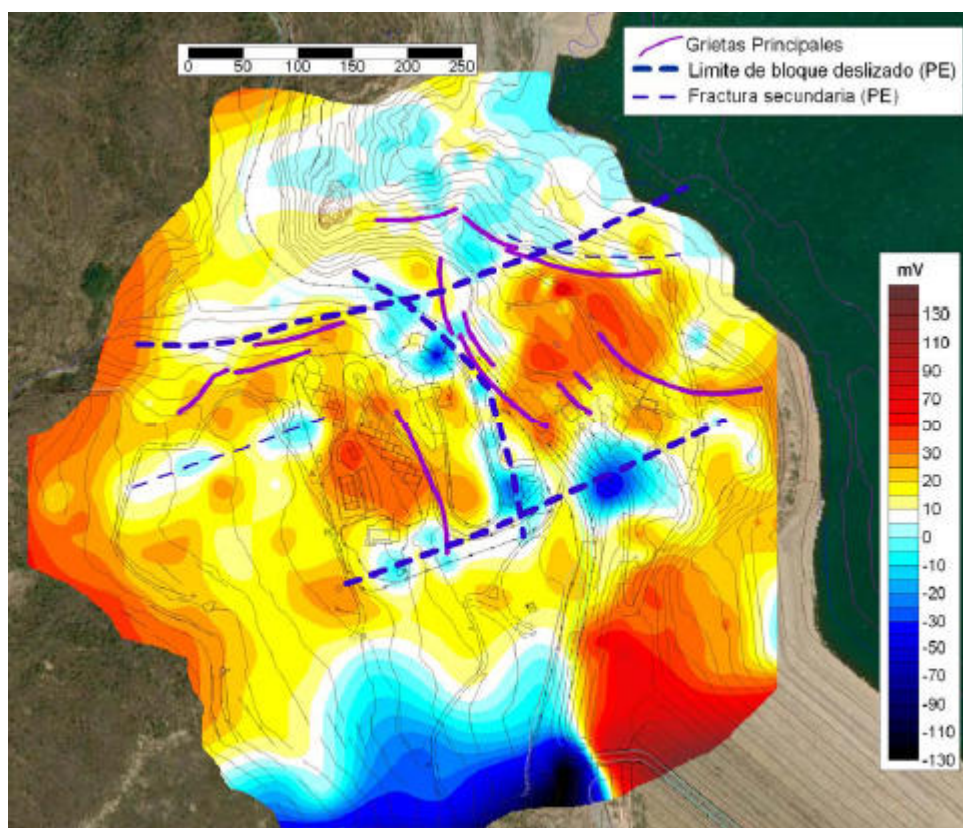


Figura 163. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los límites geofísicos de la zona deslizada. (Software Surfer)

Si analizamos los resultados del potencial espontáneo obtenido para la zona afectada por el deslizamiento (Figura 163), vemos como se aprecian una serie de zonas o bloques geofísicos caracterizados por presentar valores elevados de potencial (> 15 mV) y limitados lateralmente y entre ellos, por zonas de bajo potencial espontáneo (< 10 mV). Estas zonas de límite entre bloques, presentan una cierta alineación que indicaría la posible dirección de los planos de ruptura principales que pueden corresponder con los límites de la masa deslizada y de los bloques involucrados en el deslizamiento (figura 164).

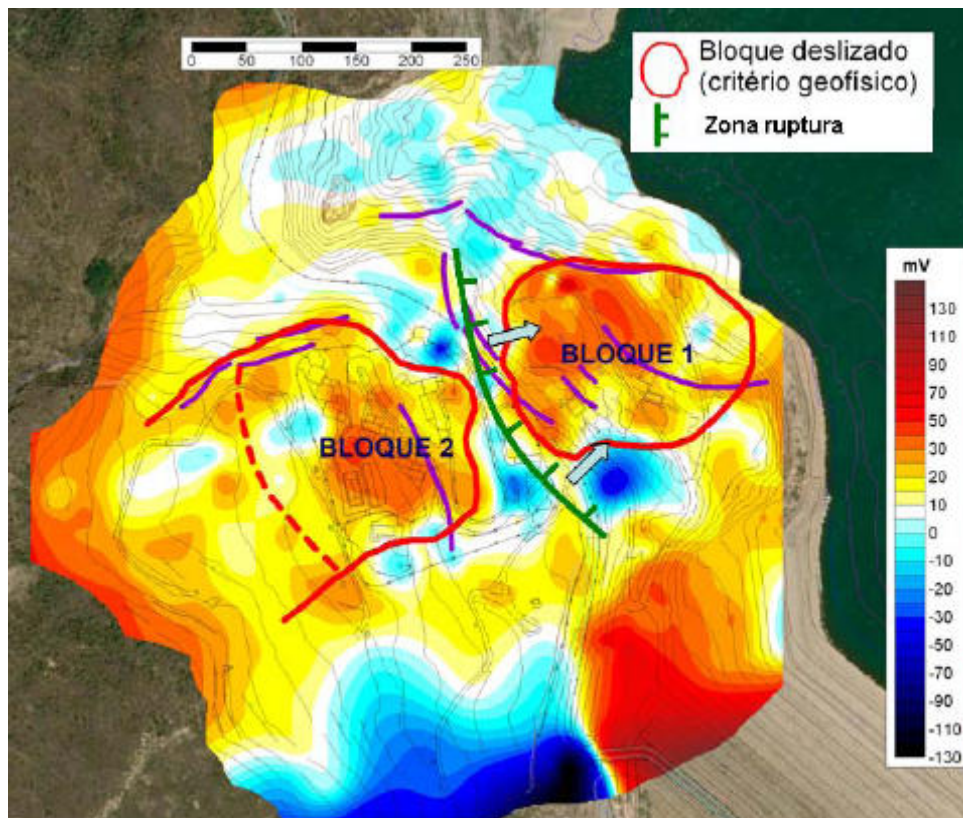


Figura 164. Potencial Espontáneo de la zona correspondiente al deslizamiento de la Margen derecha de la Presa de Benínar con indicación de los bloques geofísicos detectados y la zona de ruptura entre los mismos (Software Surfer).

En detalle, si analizamos las zonas de bajo potencial asociadas a los límites de la masa deslizada, podemos destacar los siguientes aspectos:

1. Se distingue con claridad el posible límite norte de la zona deslizada
2. El límite sur discurre a lo largo de una alineación que se sitúa entre el transformador anejo a la piscina, transcurre paralelo al límite sur del poblado, pasa bajo las oficinas de la presa y termina al cruzar la carretera Benínar – Turón. No hay evidencias claras de que la zona se prolongue hacia el pantano.
3. La zona deslizada está formada por dos bloques principales (Bloques 1 y 2) limitados por una zona de bajo potencial situada aproximadamente a lo largo de la carretera de servicio existente dentro del poblado. En esta carretera se aprecian un gran grupo de grietas con altas deformaciones en el terreno (zona de ruptura Figura 164).
4. Existen otra serie de mínimos que indican zonas de rotura secundarias dentro de los bloques principales.

Por tanto parece clara la existencia de un bloque geofísico bien delimitado, bloque 1, el cual aparece separado y parcialmente deslizado del bloque 2 hacia el pantano. Los límites del



Bloque 2 no aparecen definidos con tanta nitidez, el límite superior del mismo (línea roja discontinua Figura 82) podría indicar la futura zona de ruptura y movilización del bloque hacia el pantano en caso de avanzar de forma remontante el deslizamiento hacia la cabecera del mismo.

Cabe destacar como el límite sur de la zona de estudio se encuentra fuertemente afectado por fenómenos de oxidación-reducción relacionados con la estructura del aliviadero y probablemente, con el fuerte pilotado que se realizó en el sector para contener el deslizamiento generado durante la excavación de la plataforma del mismo (Figura 165).

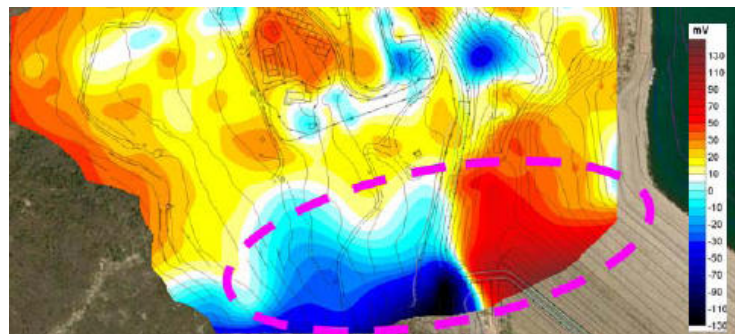


Figura 165. Potencial Espontáneo en la zona sur de estudio mostrando los efectos de Oxidación-Reducción (Software Surfer)

3.3.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

La aplicación del Sistema de Tomografía Eléctrica en esta zona, persigue el objetivo de caracterización espacial y litológica de la masa movilizada, sirviendo de apoyo al correcto dimensionamiento del modelo de simulación matemático a crear. Para ello, se han realizado un total de cuatro perfiles de investigación con el fin de obtener una caracterización geométrica tridimensional de la masa deslizada.

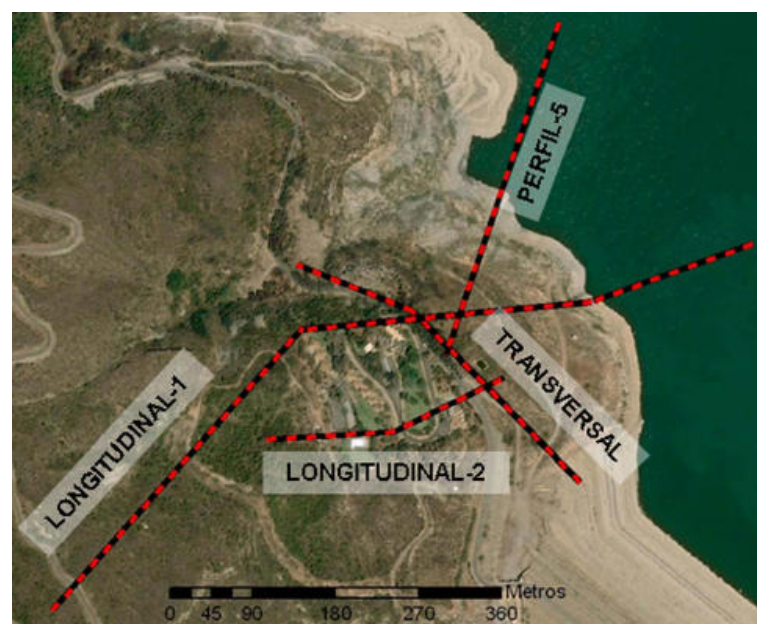


Figura 166. Planta con la posición de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados (Software ArcGIS)



La traza de los perfiles (figura 166) se fijado teniendo en cuenta el posible vector de máximo movimiento de la masa deslizada (perfil longitudinal 1 y 2) y ortogonal al mismo (perfil transversal).

Las características principales de los perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica se encuentran resumidas en la siguiente tabla (Tabla 5):

| PERFIL | COORDENADAS | | | | | | | | LONGITUD (m) |
|-----------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|------------|---------|-----------|--------------|
| | INICIAL X | INICIAL Y | GIRO X (1) | GIRO Y (1) | GIRO X (2) | GIRO Y (2) | FINAL X | FINAL Y | |
| P-LONG 1 (P3 A) | 497.851 | 4.081.773 | 497.677 | 4.081.710 | 497.360 | 4.081.679 | 497.361 | 4.081.679 | 502 |
| P-LONG 2 | 497.323 | 4.081.558 | 497.460 | 4.081.566 | | | 497.581 | 4.081.626 | 272 |
| P-TRANSV | 497.355 | 4.081.750 | 497.481 | 4.081.699 | | | 497.663 | 4.081.511 | 397 |
| P5 (A) | 497.640 | 4.082.017 | | | | | 497.517 | 4.081.650 | 387 |

Tabla 5. Características principales de los perfiles de Tomografía Eléctrica realizados en la zona del deslizamiento.

3.3.1.- Interpretación

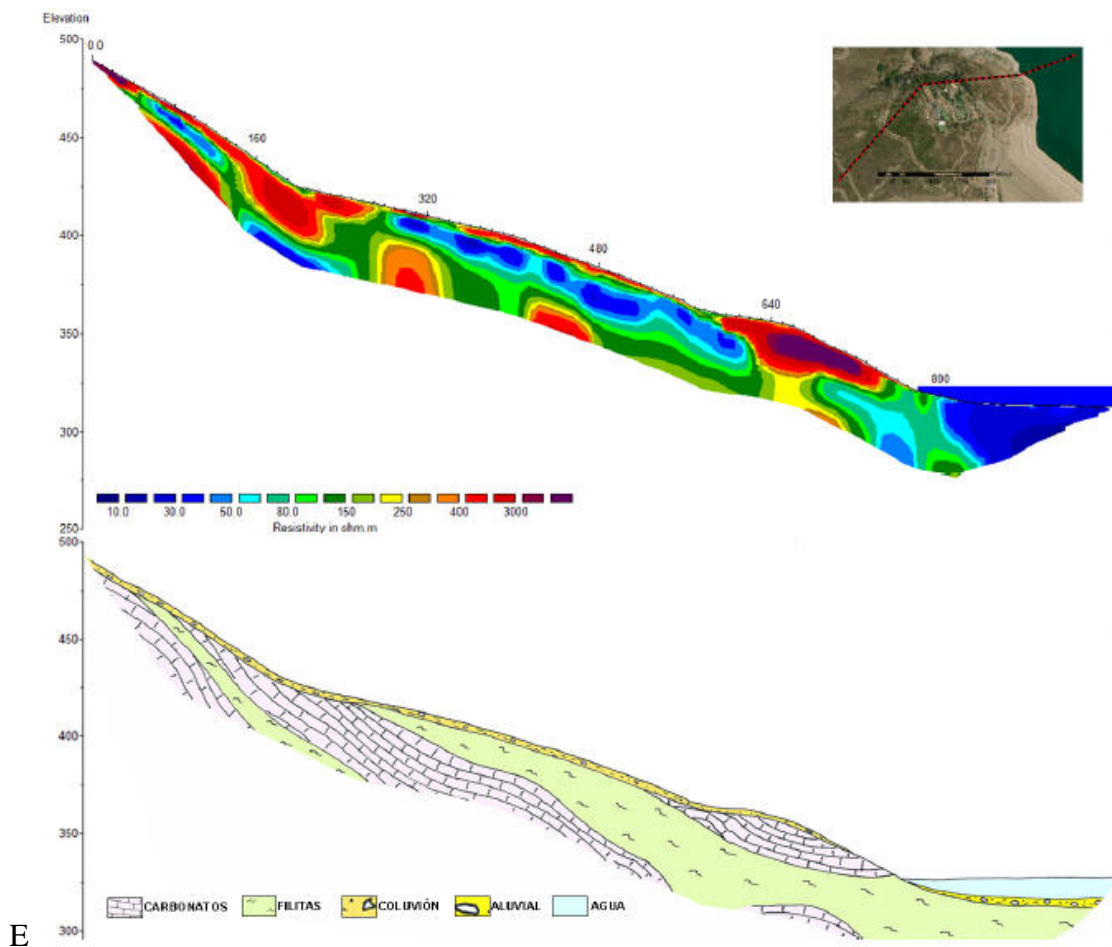
Los perfiles geológicos contruidos a partir de los cortes geoelectricos y datos de sondeos existentes, muestran, de forma coincidente una cubierta resistiva ($> 150 \text{ Ohm.m}$) de potencia muy variable situada sobre una importante zona conductora. Esta capa resistiva corresponde a una tabla o masa de naturaleza carbonatada de diferente competencia, coluviones cementados, caliches, etc. la cual se ha sido denominada en múltiples estudios como “coluviión” (CEDEX). La capa conductora inferior corresponde a las launas (filitas) las cuales suele venir definidas en estos perfiles por valores de resistividad inferiores a los 70 Ohm.m .

Bajo ambas capas, y dependiendo de la potencia de las launas y penetración obtenida en cada perfil, suele aparecer una capa resistiva correspondiente a una nueva capa de materiales carbonatados. Esta estructura repetitiva (carbonatos – filitas – carbonatos) es concordante con la estructura geológica general del embalse, compuesta por el apilamiento tectónico de diferentes mantos de cabalgamiento (Alcazar, Lújar, Murtas) compuestos por carbonatos y filitas.

De cara a la interpretación de los resultados, se ha optado por hacer una diferenciación en la capa superficial resistiva en carbonatos y coluviión. Veamos de forma detallada los resultados obtenidos en cada perfil de investigación.

Perfil Longitudinal 1

Este perfil, con más de 950 m de longitud, es el de mayores dimensiones de los ejecutados en este sector. El perfil se dispone con orientación NW-SE tratando de seccionar la zona deslizada por su eje de mayor longitud.



**Figura 167. Perfil Longitudinal-1 de Tomografía Eléctrica
Sección geoelectrica e interpretación geológica**

La interpretación del perfil muestra una primera capa de espesor muy variable de naturaleza carbonatada. Dicha capa superficial posee una potencia media de unos 10 m en la mayor parte del perfil, engrosándose de forma importante entre los metros 600 y 750, en los que supera los 45 m de espesor. La capa resistiva desaparece en los metros finales del perfil, justo antes de penetrar en la zona inundada del embalse.

Los valores de resistividad obtenidos para esta capa superficial son variables pero siempre de naturaleza resistiva. En el caso de la de menor potencia (parte inicial y media del perfil), los valores de resistividad obtenidos indican que los carbonatos deben estar meteorizados y/o fracturados o bien, corresponder a coluviones cementados mientras que la zona baja de mayor potencia, presenta valores mucho más elevados correspondientes a carbonatos inalterados.

El notable cambio de espesor de los materiales carbonatados podría indicar la presencia de una fractura o juego de estas entre los metros 540 y 600 que hunde la zona inferior basculándolo e incrementando su potencia notablemente, si bien, esta no se identifica con



claridad a partir de los datos obtenidos por la T.E. Sin embargo, esta zona si que es coincidente con fracturas visibles en la superficie del terreno que indican que el hundimiento del bloque inferior, justificando el incremento de potencia.

Bajo la capa resistiva carbonatada superior aparece una zona conductora de naturaleza filítica cuya potencia parece aumentar de forma constante hacia la zona del vaso. Dicha capa aflora en el perfil en las inmediaciones del inicio de la zona inundada.

Cabe destacar que la disposición del perfil en su parte central discurre cercano al barranco que limita la zona ocupada por el poblado de Confederación y en el límite de los posibles afloramientos carbonatados movilizados, los cuales, en este sector, se encuentran muy adelgazados.

Perfil Longitudinal 2

Perfil realizado para mejorar el conocimiento de la parte central de la masa deslizada, debido a los condicionantes que presenta el Perfil longitudinal – 1 descritos con anterioridad. La longitud del mismo es de unos 280 m y se dispone paralelo al supuesto eje de mayor longitud de la masa deslizada. El espaciado interelectródico empleado es de 6 metros por lo que la resolución espacial del perfil es mayor que en el resto de perfiles (espaciado interelectródico de 10 metros).

La interpretación del corte geoelectrico muestra la presencia de una potente capa carbonatada que presenta un adelgazamiento notable en su parte central coincidente con un descenso en los valores de resistividad de los carbonatos. La interpretación de este adelgazamiento y descenso en la resistividad corresponde a una zona de importante fracturación y por tanto, de alteración, la cual divide la capa carbonatada aflorante en dos bloques (Figura 168).

Todo el conjunto aparece situado sobre una capa filítica de naturaleza continua.

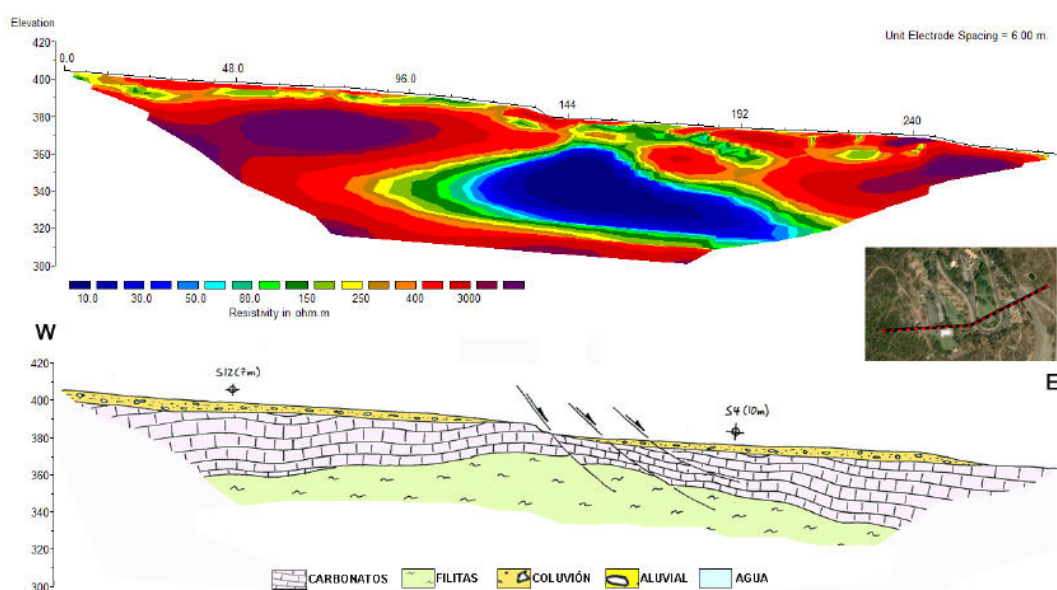


Figura 168. Perfil Longitudinal-2 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica



Perfil Transversal

Perfil de 390 m de longitud realizado sobre la carretera de Benínar – Turón, el cual, comienza sobre la escombreras de relleno de la antigua zona de los talleres situadas al norte del poblado y finaliza en las inmediaciones del estribo derecho de la presa.

La interpretación geológica del corte geoelectrico muestra, al igual que en el caso de los dos perfiles longitudinales, una capa resistiva de carbonatos sobre una zona conductora de filitas. En este caso, se aprecia que la masa carbonatada presenta una morfología cóncava indicando un acuñaamiento de los mismos en los extremos llegando a desaparecer en la parte norte del perfil. Entorno al metro 120 del perfil aparece una anomalía resistiva ovalada en profundidad que podría corresponderse con un bloque carbonatado aislado.

Perfil N°5

Perfil de investigación realizado con un doble objetivo: estudio de la estructura de la zona afectada por el deslizamiento e investigación de las filtraciones en la zona inundada del embalse. En el caso del análisis de la estructura de la zona afectada por el deslizamiento, la interpretación del corte geoelectrico muestra con claridad una capa carbonatada sobre las filitas, las cuales afloran en toda la zona próxima a la orilla del pantano. Geomorfológicamente, el escarpe topográfico del perfil lo genera el frente de afloramiento de los carbonatos. En esta zona de frente, abundan numerosas grietas y bloques caídos fruto del desplazamiento de la masa deslizada hacia la orilla (Imagen 18).

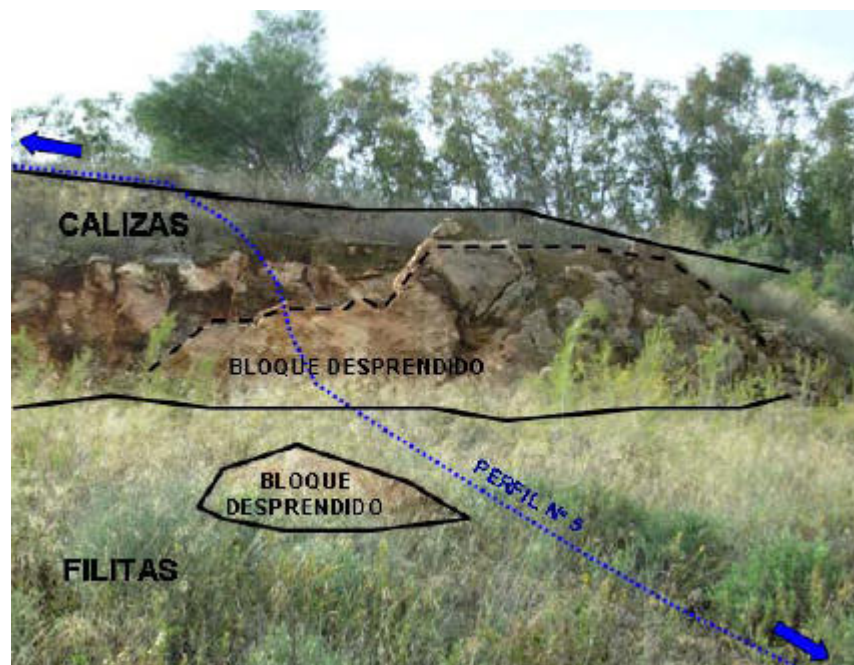


Imagen 18. Fotografía del frente de desprendimiento en las inmediaciones del Perfil de investigación 5

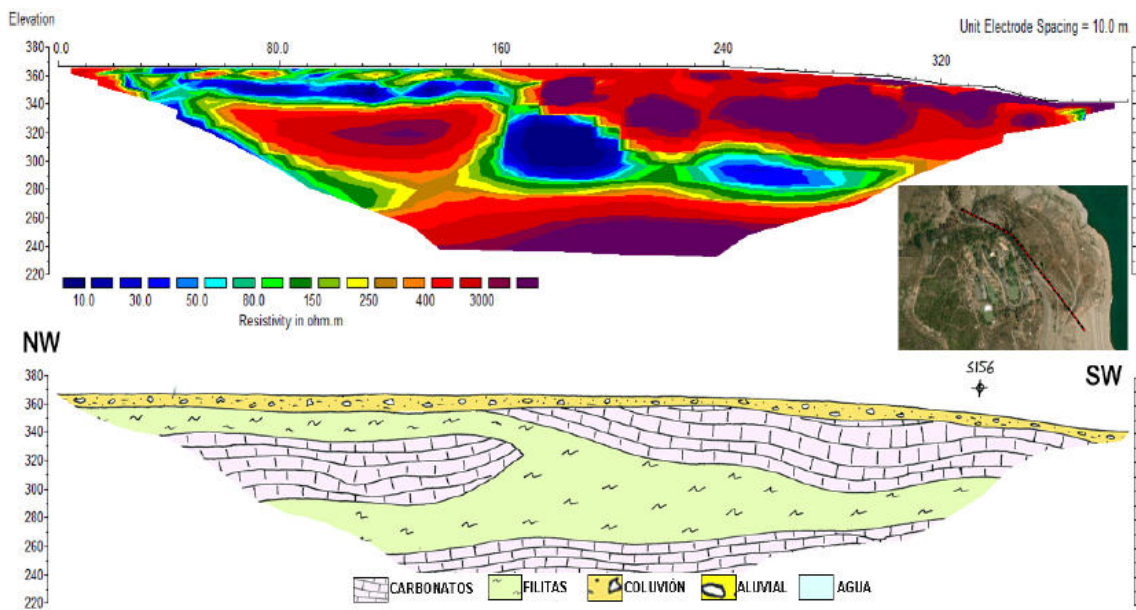


Figura 169. Perfil Transversal de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

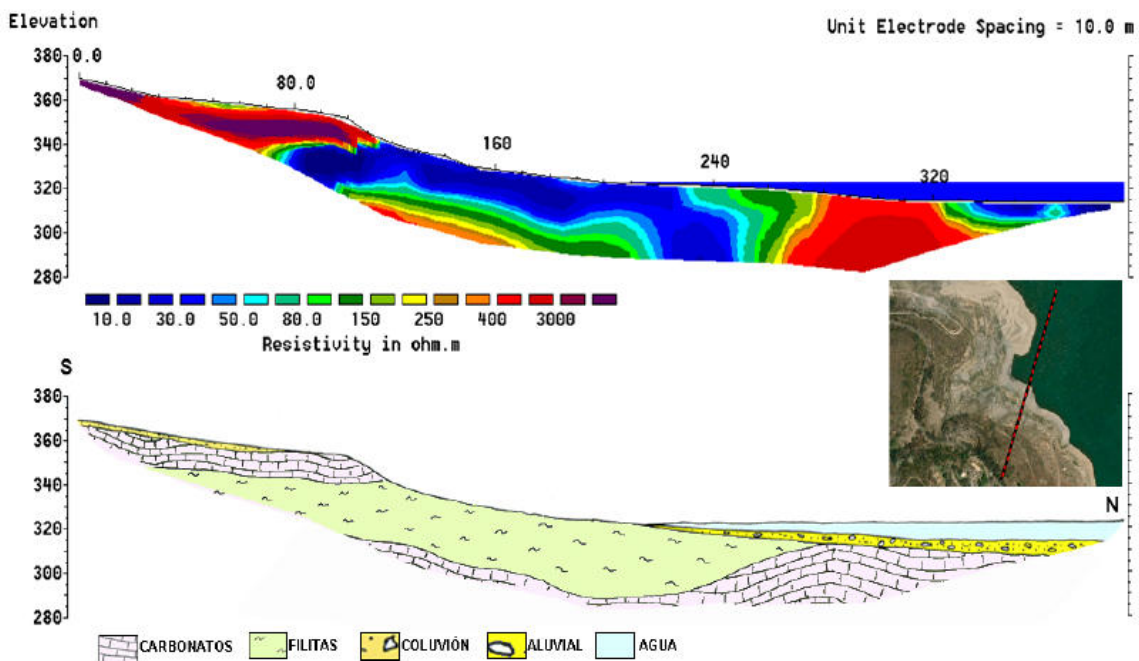


Figura 170. Perfil P-5 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica.

El análisis conjunto de los cuatro perfiles muestra con claridad la estructura litológica en la zona analizada. La estructura general se caracteriza por la existencia de una tabla carbonatada superior flotando sobre una importante capa filítica. En detalle, los resultados obtenidos ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

- Existe una estructura de apilamiento caracterizada por el cabalgamiento de un primer grupo de materiales carbonatados y filíticos sobre una nueva secuencia de la que solo se ha alcanzado a observar la parte superior carbonatada (¿manto de Lujar?)



– La capa carbonatada presenta espesores variables lo que indica una posible sectorización de la misma en zonas o bloques, las cuales están limitadas por la presencia de fracturas (Perfil Longitudinal 2). El espesor variable podría estar generado por un hundimiento diferencial de los bloques inferiores a favor de las numerosas fracturas existentes en superficie.

Se ha realizado una cartografía de las principales fracturas visibles en superficie así como la detección de otras posibles zonas de fractura a partir del estudio topográfico de la zona y análisis estereoscópico de fotografías aéreas. El resultado obtenido (Figura 171) muestra la existencia de numerosas zonas de fracturación que segmentan la zona de afección en varios bloques.

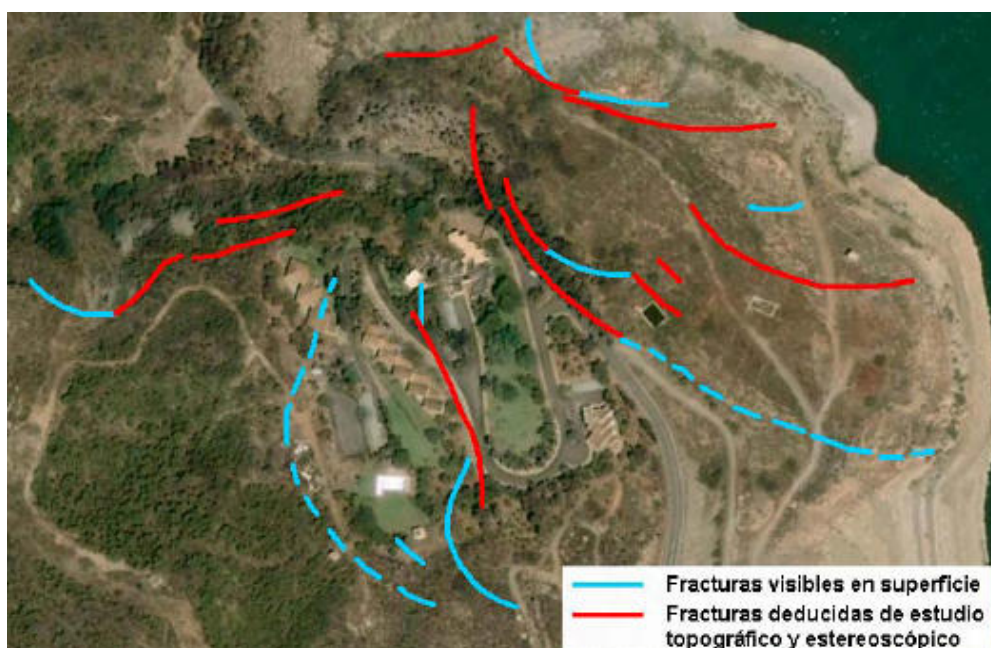


Figura 171. Plano de grietas existentes en la zona de afección del deslizamiento de la margen derecha del embalse de Benínar (Software ArcGIS)

3.4.- Sondeos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempos (SEDT)

Se han realizado un total de 13 sondeos electromagnéticos sobre sondeos e inclinómetros de la zona deslizada con el fin de tratar de obtener, dadas las características del sistema, el nivel de base de alteración correspondiente con la posible base del deslizamiento.



Imagen 19. Curva del SEDT 2-S21-I19

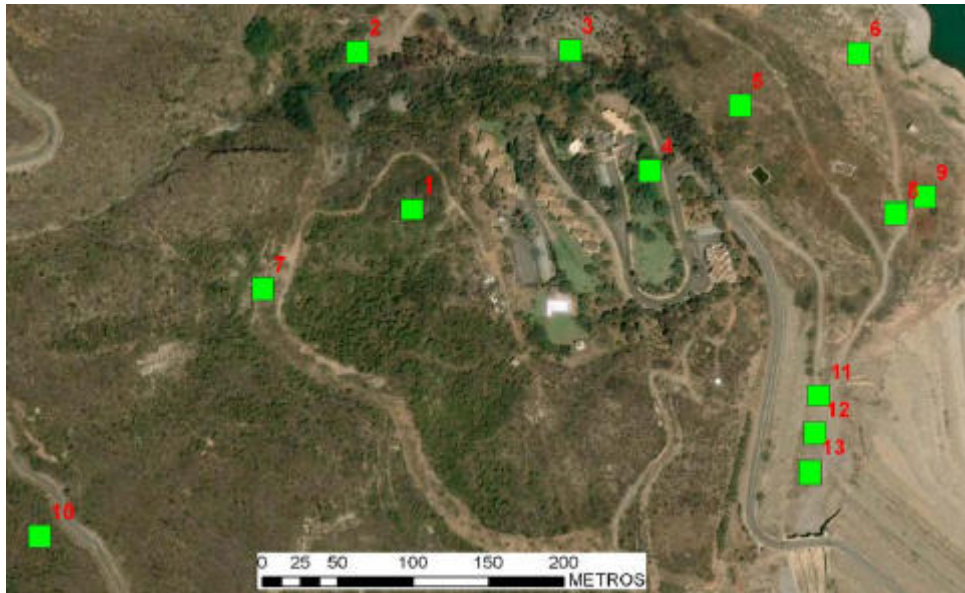


Figura 172. Plano con indicación de la posición de los SEDT realizados en la zona de la margen derecha (Software ArcGIS)

La interpretación de las curvas obtenidas es de carácter subjetivo, por lo que para realizar esta tarea, se han empleado de forma paramétrica y para determinar la factibilidad del sistema en la determinación de las zonas de alteración relacionables con los niveles de deslizamiento, los datos de perforación, columnas litológicas de los sondeos y los registros inclinométricos.

| SEDT | INCLINOMETRO | X | Y |
|------|--------------|---------|-----------|
| 1 | | 497.325 | 4.081.618 |
| 2 | 19 | 497.289 | 4.081.722 |
| 3 | 25 | 497.430 | 4.081.723 |
| 4 | | 497.483 | 4.081.643 |
| 5 | 21 | 497.543 | 4.081.686 |
| 6 | 20 | 497.621 | 4.081.721 |
| 7 | | 497.226 | 4.081.565 |
| 8 | | 497.646 | 4.081.615 |
| 9 | | 497.665 | 4.081.626 |
| 10 | | 497.078 | 4.081.402 |
| 11 | | 497.595 | 4.081.494 |
| 12 | | 497.592 | 4.081.468 |
| 13 | | 497.589 | 4.081.443 |

Tabla 6. SEDT ejecutados en la zona del deslizamiento de la margen del embalse de Benínar

Una vez analizados los resultados de interpretación de los SEDT realizados, vemos que esta tecnología ha permitido resolver, de forma parcial, los objetivos de aplicación de la misma.

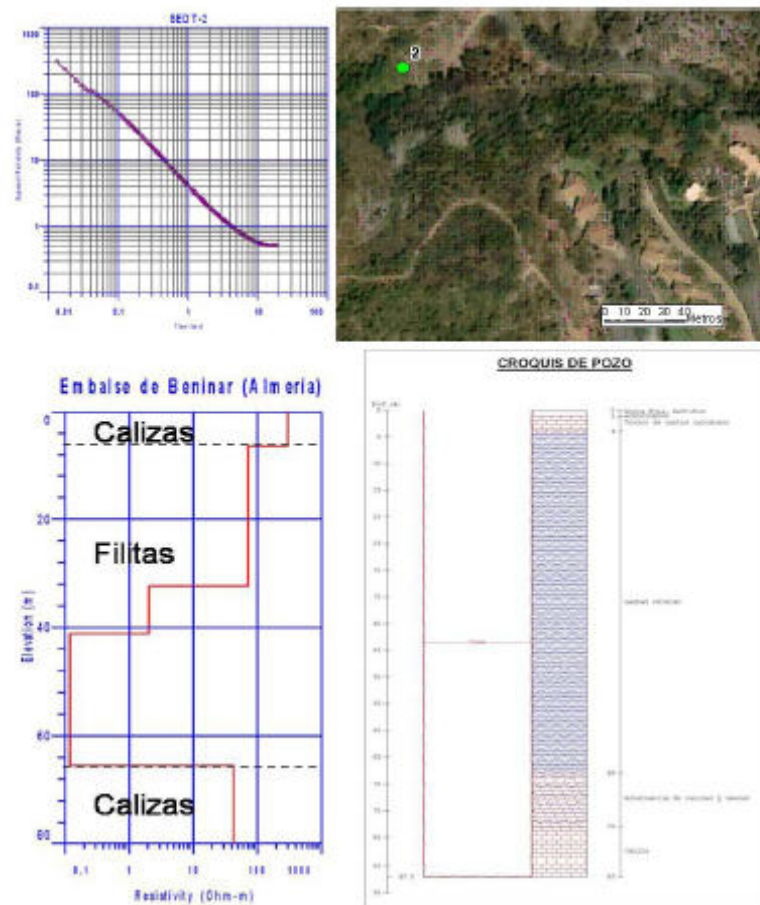


Figura 173. Punto de investigación SEDT N°2.

En el caso de la determinación clara de las zonas de alteración que correspondan al nivel de base del deslizamiento, esta no ha sido posible, al menos, de forma clara debido a la heterogeneidad en la composición que presentan las filitas. La base teórica para la detección de la zona de base del deslizamiento radica en que la resistividad de esta zona de alteración (techo de filitas y base del coluvión) debería presentar resistividades intermedias a las de ambos materiales sin alterar (coluvión resistivo, filitas conductoras). Como la naturaleza de las filitas no es homogénea, al igual que en el caso del coluvión, las resistividades que debe presentar la zona de alteración es similar a los materiales que la rodean dificultando la determinación.

El segundo de los objetivos si ha sido cubierto con mejores resultados ya que la ejecución de puntos de investigación SEDT ha permitido el establecimiento de la potencia de la cobertera carbonatada en cada punto de investigación.



3.5.- Emisión de campo Electromagnético (ECE)

3.5.1.- Trabajos en superficie

Los trabajos en superficie han consistido en la realización de perfiles paralelos entre sí con puntos de medición cada 10 m. Dadas las condiciones topográficas, vegetación, y edificaciones existentes dentro del área analizada, se ha optado en ciertos sectores (poblado, bosque), por una investigación basada en la toma de puntos aleatorios tratando de cubrir homogéneamente la zona de estudio. Además de estos condicionantes y dadas las condiciones de ruido ambiental variable, las mediciones se han realizado con diferente sensibilidad por lo que se realizará un análisis por sectores de la zona de estudio.

Como apoyo a la interpretación de los datos obtenidos, se empleará una cartografía de las grietas principales que se pueden visualizar en campo así como otras obtenidas mediante estudio topográfico y del análisis estereoscópico de la zona, con el objetivo de relacionar las zonas de tensión y distensión obtenidas, con la ubicación de las mismas.

3.5.2.- Interpretación de los resultados

Debido a las dimensiones de la zona afectada por el deslizamiento se decidió sectorizar la misma en diferentes áreas de investigación. El procesado de los datos se ha realizado por separado para cada una de las zonas realizando una interpretación conjunta de los mismos.

La figura 174 muestra los resultados obtenidos para la zona del deslizamiento de la margen derecha del embalse de Benínar. En el plano se han representado una serie de zonas caracterizadas por presentar valores anómalos de ECE, las cuales, han sido divididas en dos categorías:

- Zonas de tensión elevada (círculos azules). Se trata de zonas en las que se recogen emisiones entre 2 y 5 veces más intensas que el fondo de radiación natural de todo el sector de estudio.

- Zonas de fracturación peligrosa o futura (círculos rojos). En este caso, estas zonas presentan emisividades superiores a 5 veces el fondo de radiación natural de todo el sector de estudio. Este tipo de zonas presentarán grietas y roturas en un corto periodo de tiempo.



Figura 174. Plano de Intensidad ECE en la zona de barranco al norte del poblado (Software Surfer)

La distribución de las anomalías muestra una serie de patrones de alineación que podrían corresponder a los límites de la zona de deslizamiento.

– La principal alineación (1) corresponde al grupo de anomalías de mayor intensidad de emisión en toda la zona, las cuales se alinean con dirección suroeste – noreste extendiéndose a lo largo de una zona comprendida entre la parte de la zona alta del cortafuegos, el transformador de la piscina y terminando cerca del edificio de las oficinas de la presa.

– La segunda alineación (2) se sitúa al norte de la zona de estudio y su traza es menos clara que en el caso anterior. La zona une numerosas anomalías de escaso tamaño que son coincidentes con los numerosos deslizamientos y roturas existentes a lo largo de este sector y con la traza del barranco situado al norte del poblado, el cual es fruto de la existencia de una falla de gran tamaño.

– La tercera alineación discurre de forma más o menos paralela a la carretera Benívar-Turón (3). Esta alineación coincide con numerosas fracturas y deformaciones



visibles a lo largo de la carretera y taludes adyacentes.

– Por último, llama la atención la existencia de una alineación que divide la plataforma situada bajo el poblado en dos sectores.



Figura 175. Plano de zonación de anomalías ECE relacionadas con los posibles límites del deslizamiento (Software Surfer)

El análisis comparativo de las anomalías ECE con los resultados de otros sistemas de investigación aplicados en la zona de estudio, como en el caso del Potencial Espontáneo, muestra una serie de analogías tal y como se puede apreciar en la imagen inferior (Figura 176).

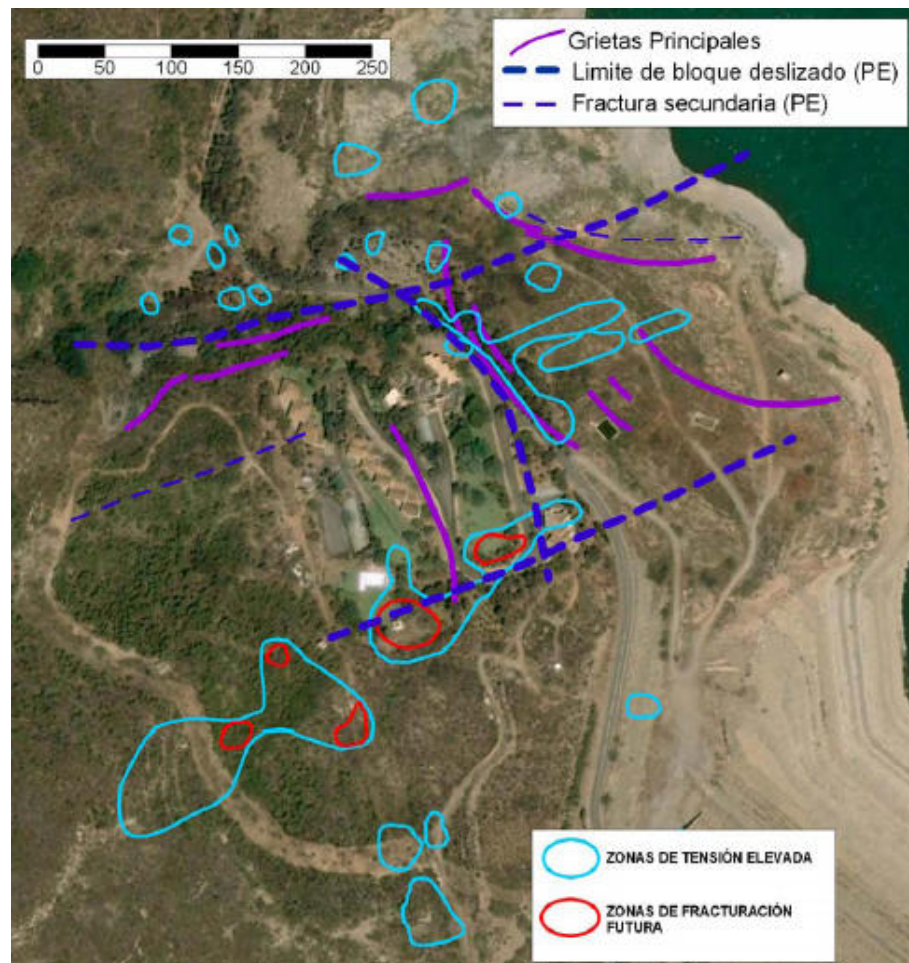


Figura 176. Comparación entre las anomalías ECE y los resultados del sistema de Potencial Espontáneo (Software Surfer)

Cabe destacar el especial interés que muestra la anomalía N°1, la cual podría corresponder al límite sur de la masa deslizada, el cual, no había sido definido hasta la actualidad al no existir evidencias de tipo geológico y topográfico que lo definan en superficie.

3.6.- Trabajos en sondeos

El sistema ECE permite obtener un registro vertical del estado tensional de los materiales atravesados en un sondeo introduciendo una sonda en el mismo. Esta aplicación permite obtener zonas en las que pueden existir zonas de tensión y/o fracturación que puedan estar relacionadas con los posibles niveles de deslizamiento.

En este caso, se han testificado un total de 22 sondeos, instalados como inclinómetros o como piezómetros. La numeración, posición y características de los sondeos investigados son las siguientes:

En muchos casos, no ha sido posible la testificación de algunos sondeos debido a la obstrucción de la tubería o bien, por enganches de la sonda en bridas o soldaduras de las mismas.



| SONDEO | INCLINÓMETRO | X | Y | Z |
|---------|--------------|--------|---------|-------|
| 1 | 10 | 497528 | 4081431 | 380 |
| 2 | 11 | 497457 | 4081611 | 381 |
| 3 | 12 | 497573 | 4081428 | 357 |
| 4 | 13 | 497517 | 4081582 | 374,5 |
| 5 | 14 | 497616 | 4081440 | 355,5 |
| 6 | | 497443 | 4081404 | 397 |
| 7 | 16 | 497607 | 4081502 | 354 |
| 8 | 17 | 497413 | 4081532 | 393 |
| 9 | 18 | 497610 | 4081555 | 357 |
| 11 | 20 | 497614 | 4081728 | 342 |
| 12 | | 497374 | 4081554 | 397 |
| 16 | 21 | 497555 | 4081676 | 359 |
| 17 | 22 | 497580 | 4081650 | 358,5 |
| 20 | 23 | 497349 | 4081720 | 372 |
| 24 | 24j | 497296 | 4081719 | 373 |
| 25 | 25j | 497439 | 4081734 | 372 |
| 29 | | 497584 | 4081691 | 354 |
| 31 | | 497512 | 4081632 | 373 |
| 32 | | 497523 | 4081376 | 387 |
| 33 | 33j | 497470 | 4081487 | 387 |
| sb 93-1 | 4 | 497537 | 4081498 | 378,4 |
| sb 93-4 | 7 | 497684 | 4081691 | 330,3 |

Tabla 7. Sondeos de la margen derecha investigados con el Sistema ECE

3.6.1.- Resultados.

La investigación en sondeos se ha realizado con la aplicación de sonda electromagnética fabricada especialmente. La conexión de la sonda con el aparato fue realizada mediante un cable coaxial. El registro se realizaba con un intervalo de 1m empezando por la boca de sondeo y terminando por el fondo o nivel de profundidad accesible. En cada sondeo fue elaborado un diagrama de intensidad ECE en forma de una curva de valores medios aritméticos y una curva de la dispersión. La metodología de registro al igual que la interpretación de resultados fue idéntica a los del resto de investigaciones en superficie y galerías.

3.6.2.- Sondeo S2 – Inclínómetro I11

Sondeo situado al borde del camino de servicio del poblado cercano a la residencia. Las gráficas obtenidas para el sondeo S2 (inclínómetro I11) muestran un estado tensional homogéneo a lo largo de toda la columna investigada, excepto entre los metros 20 y 23, en los que se distingue un fuerte incremento en los valores de emisividad duplicando los valores medios de todo el sondeo. De forma análoga, aumenta también la varianza en estos puntos de registro. Esta zona podría indicar la situación de uno de los posibles planos de rotura de la masa deslizada, el cual debe situarse, dados los resultados obtenidos, entorno a los metros 23 – 26 de profundidad.

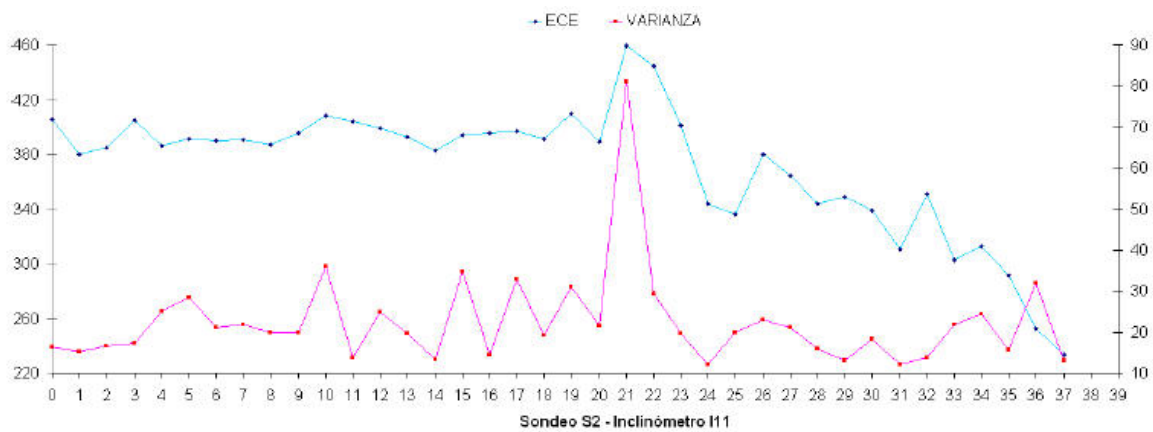


Figura 177. Resultados de la testificación ECE del sondeo S2 (Inclinómetro I11)

Si analizamos la columna del sondeo, esta sitúa la zona de contacto entre los carbonatos deslizados y las filitas entorno al metro 26, de forma coincidente con la profundidad de emisiones anómalas registradas por el equipo ECE. Por tanto, se puede concluir que el nivel de deslizamiento en este sondeo se sitúa en la zona de contacto entre los carbonatos y las filitas.

3.6.3.- Sondeo S9 – Inclinómetro I18

Situado al borde del camino de acceso de la plataforma existente bajo el poblado, la gráfica obtenida para este sondeo S2 (inclinómetro I11) muestra un campo de tensiones heterogéneo que presenta una fuerte anomalía de descenso en los valores de emisividad entorno a los 12 m de profundidad. Esta anomalía se encuentra precedida y seguida de dos picos de emisividad y elevada varianza que indican acumulación de tensiones entorno a este mínimo de emisividad.

La columna del sondeo muestra que la posición del contacto entre los carbonatos y las filitas se encuentra situada a unos 14 metros.

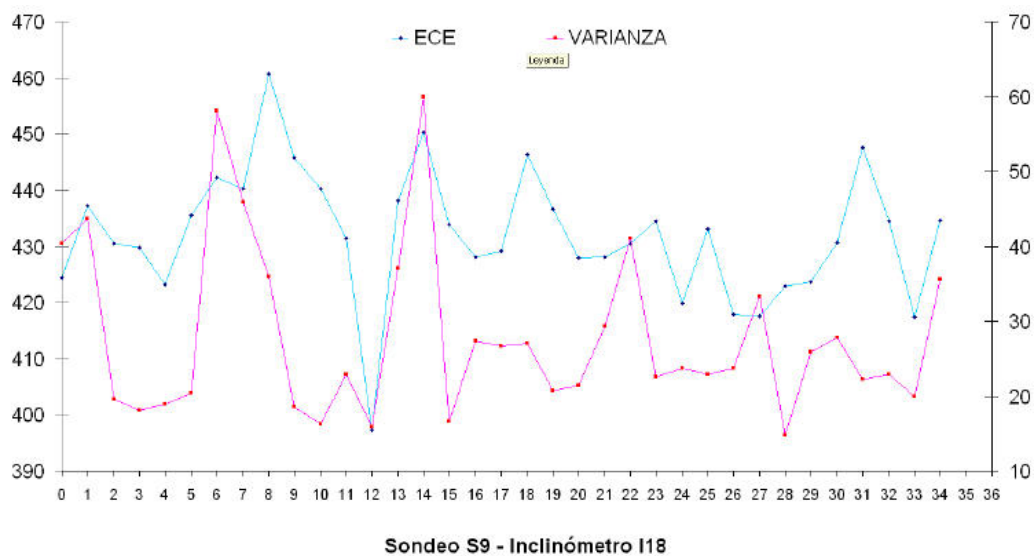


Figura 178. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclinómetro I11)



Las causas de esta anomalía pueden deberse a la presencia de un plano de fracturación entorno al metro 12 que podría deberse a la existencia de planos subverticales de fracturación similares a los encontrados en las inmediaciones de la zona. También podría relacionarse con el plano de deslizamiento general de los carbonatos sobre las filitas en este bloque aunque este hecho no parece tan claro como en otros sondeos.

3.6.4.- Sondeo S11 – Inclinómetro I20

Sondeo situado en la parte baja del deslizamiento en el camino de acceso a los inclinómetros I4 e I7. Litológicamente, el sondeo atraviesa únicamente dos metros de carbonatos siendo el resto filitas. La gráfica muestra un incremento de emisividad relativo entre los metros 11 y 15 de profundidad coincidentes con un pico en la varianza que puede ser interpretado como la presencia de una zona de materiales sometidos a deformación.

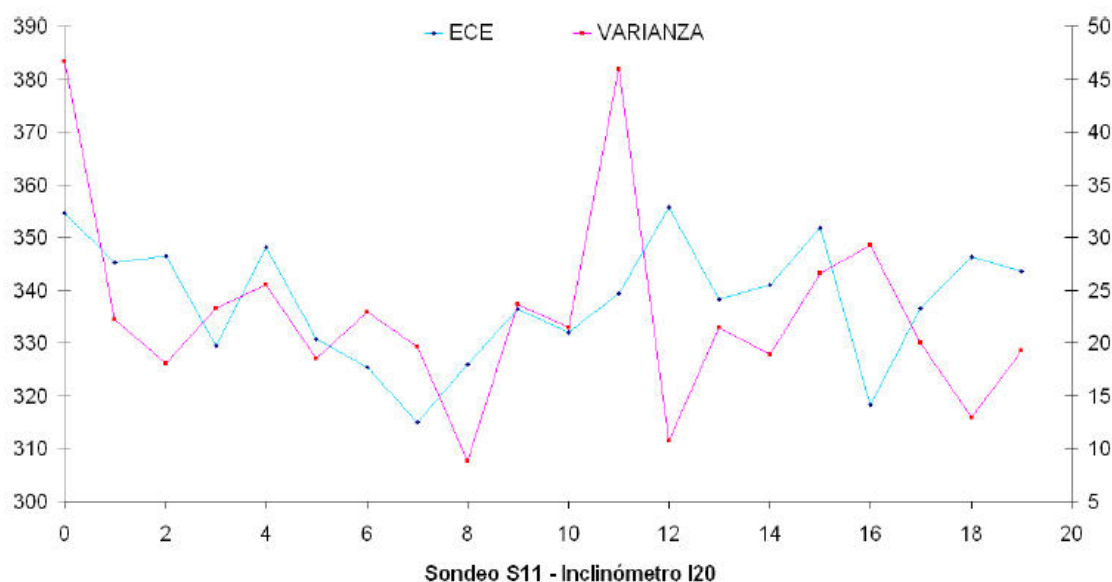


Figura 179. Resultados de la testificación ECE del sondeo S9 (Inclinómetro I11)

La profundidad a la que se observan estos fenómenos implican que la deformación afecta a los materiales filíticos varios metros por debajo de la zona de contacto con los carbonatos, lo cual, podría indicar la existencia de planos de rotura por debajo de esta superficie.

Cabe destacar la rotura de algunos de los inclinómetros a profundidades muy superiores a la del emplazamiento de la superficie de contacto carbonatosfilitas (inclinómetro 13 a 67 m; inclinómetro 17 a 53 m; etc.) lo cual podría indicar la existencia de varios planos de deslizamiento:

- Superficial. Responsable de la movilización de los carbonatos sobre las filitas.
- Profundo. Plano que implica la movilización de los carbonatos superficiales e importantes volúmenes de filitas.

3.7.- Análisis conjunto de resultados

3.7.1.- Estudio tridimensional de la masa deslizada

Si asumimos como masa deslizada a los materiales carbonatados aflorantes en la zona de estudio, los cuales deslizan sobre las filitas, es de vital importancia conocer la morfología de la zona de contacto de los mismos. En un primer análisis, es posible obtener un plano de isopacas de los materiales carbonatados aflorantes en base a los resultados de perforación de los numerosos sondeos existentes a lo largo de la zona de estudio (Figura 180).

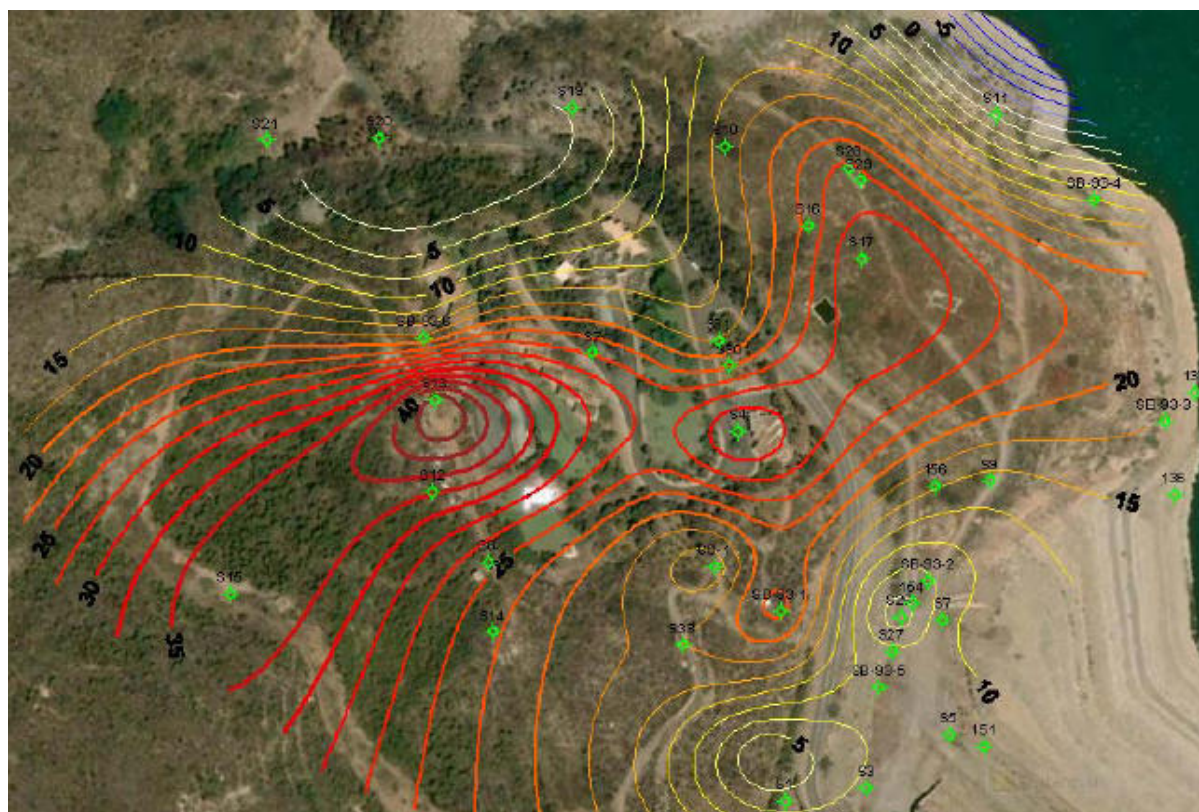


Figura 180. Potencia de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos. (Software Surfer)

Los resultados de interpolación muestran que la superficie de contacto entre los carbonatos aflorantes y las filitas es cóncava, por lo que las mayores potencias de carbonatos se encuentran en el centro de los bloques deslizados acuniéndose hasta desaparecer en la zona norte de la urbanización y adelgazándose de forma importante en la zona sur. Esta morfología cóncava es concordante con los resultados de los perfiles de T.E. realizados en la zona de estudio.

Si introducimos todos los datos disponibles de profundidad de la superficie de interés deducidos a partir de las investigaciones geofísicas realizadas en la zona (T.E. y SEDT), el plano anterior cobra una mayor precisión asemejándose más a la realidad. Además, se puede tener en cuenta el efecto de las numerosas fracturas existentes a lo largo de la zona de estudio establecidas mediante reconocimiento de campo y análisis topográfico y estereoscópico (Figura 181).

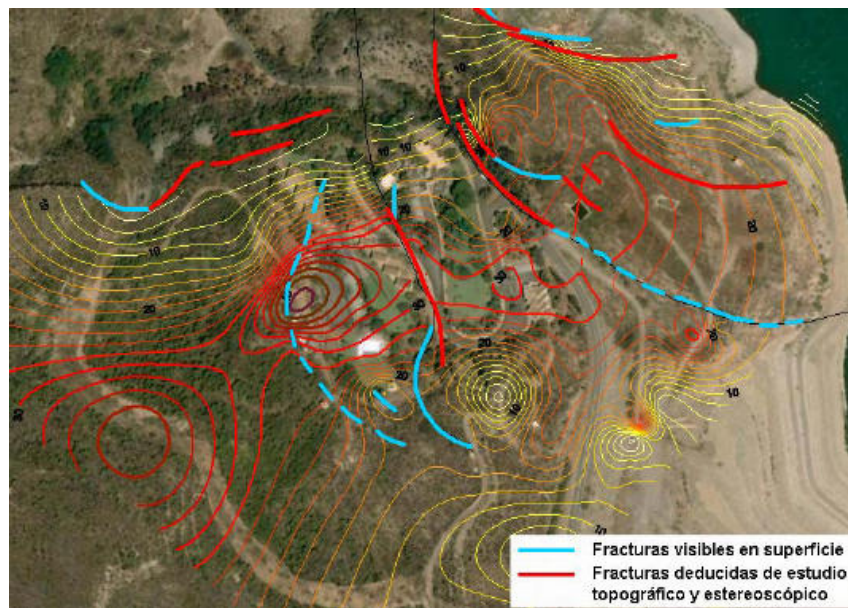


Figura 181. Plano de isopacas de los materiales carbonatados (coluvión) establecida a partir de los datos de perforación de los sondeos e investigaciones geofísicas T.E. y SEDT (Software Surfer).

Por último, se puede generar un plano de isobatas del muro de los materiales carbonatados (figura 182) a partir de todas las fuentes de información disponibles (sondeos, investigaciones geofísicas, etc.) y teniendo en cuenta de cara a la interpolación, el efecto de las principales fracturas de la zona.

El resultado obtenido muestra la segmentación de los materiales carbonatados en al menos, tres bloques que van hundiéndose progresivamente unos respecto a otros a medida que nos acercamos a la zona inundada del embalse.

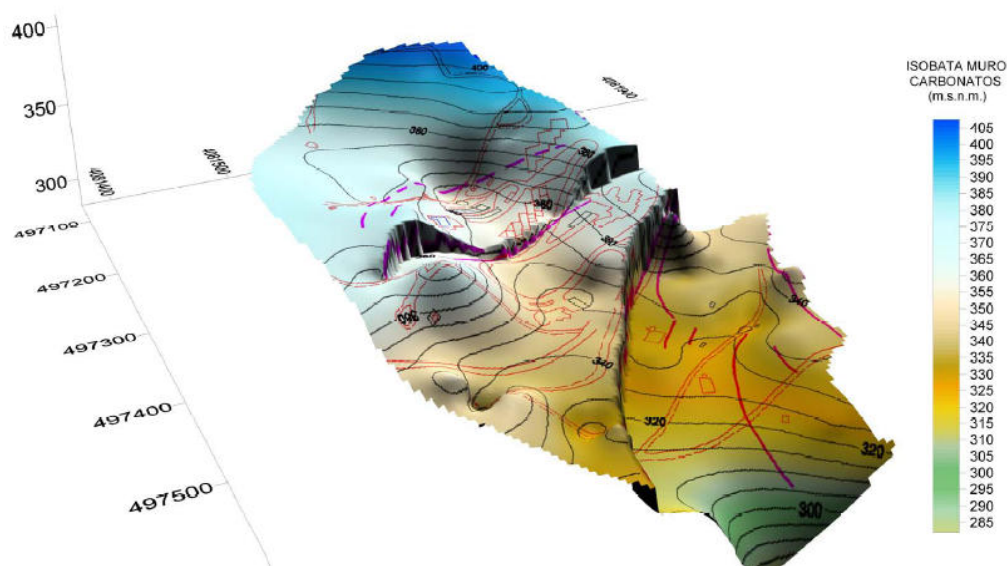


Figura 182. Isobatas del muro de los materiales carbonatados (coluvión) establecidas a partir de todas las fuentes de información disponibles (sondeos y geofísica) teniendo en cuenta el efecto de las fracturas (Isolíneas cada 5 m). 3D realizado mediante Software Surfer.



En el caso de los resultados de los sistemas de P.E. y ECE, los resultados obtenidos concuerdan con la estructura definida por los sistemas de T.E. y SEDT, definiendo la estructura en bloques de la masa deslizada.

Desde el punto de vista de la cinemática y de la definición de los límites de la masa deslizada son muy interesantes los datos obtenidos por ambos sistemas, ya que detectan una anomalía en el lado sur del poblado que debe corresponder al límite lateral de la masa deslizada.

Parece probable que la masa deslizada presentara movimientos anteriores a la construcción del embalse. Esto se deduce de la morfología de la ladera y de las numerosas huellas de fracturas detectadas en el análisis topográfico y a través del estudio estereoscópico de la ladera con fotografías previas a la construcción de la presa. El vector natural de deslizamiento antes de la construcción del embalse, debía tener una componente de caída directa hacia el pantano. La construcción de la presa y su entrada en funcionamiento produjo un doble efecto. Por un lado, los episodios de embalse y desembalse han reactivado el deslizamiento, mientras que la estructura de la presa ha modificado el vector de deslizamiento al comportarse esta, como un contrafuerte que impide el flujo natural de la masa deslizada (Figura 183).



Figura 183. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada.

Esta alteración en el vector de deslizamiento es la responsable de la aparición de las anomalías de ECE y PE existentes en la zona sur de la zona de estudio (Figura 184), las cuales responden a la existencia de una zona de desgarre definida por el contacto entre los carbonatos (coluvión) no movilizadas en la actualidad por la acción de la presa como contrafuerte y los carbonatos (coluvión) que fluyen libremente hacia el embalse. Este desgarre se traduce en la existencia de una fuerte deformación y alteración en los materiales carbonatados que se observa con claridad en los resultados del P.E. y ECE.

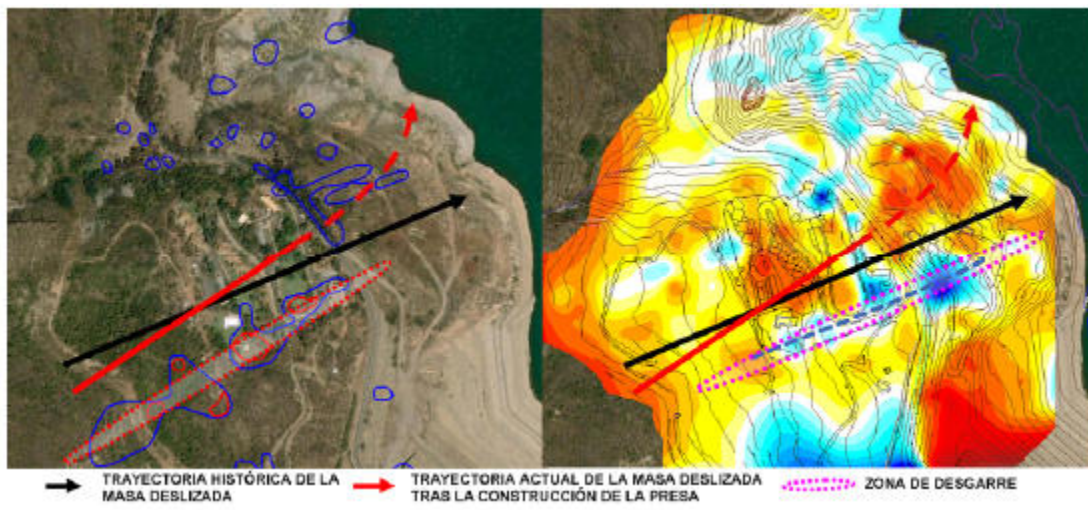


Figura 184. Trayectoria histórica y actual de la masa deslizada (Software Surfer).



4.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO DEL AGUA TERMAL DE LA ANTIGUA FUENTE DE LOS AGUACHINES QUE QUEDO BAJO EL EMBALSE DE LINARES (SEGOVIA) Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO.

4.1.- Antecedentes

Esta campaña geofísica se refiere a la investigación de una antigua surgencia en el río Riaza, que quedó anegada en 1951 con la construcción del Pantano de Linares en el término municipal de Maderuelo (Segovia).

Se tiene constancia desde la primera década del siglo XX de la existencia de la mencionada fuente denominada Los Aguachines, situada en la margen izquierda del río Riaza y a 500 metros al Sur del pueblo de Linares del Arroyo. Según comentarios el caudal era importante, estimándose entre 100 y 150 l/s y el agua era considerada como minero-medicinal, según el análisis realizado en su día mostrado a continuación:

| | | |
|---------------------------|---------|------|
| Anhídrido sulfúrico | 0,01888 | gr/l |
| Cal | 0,10292 | “ |
| Magnesia | 0,03963 | “ |
| Cloro | 0,01420 | “ |
| Cloruro sódico | 0,02340 | “ |
| Grado hidrotimétrico | 21° | |

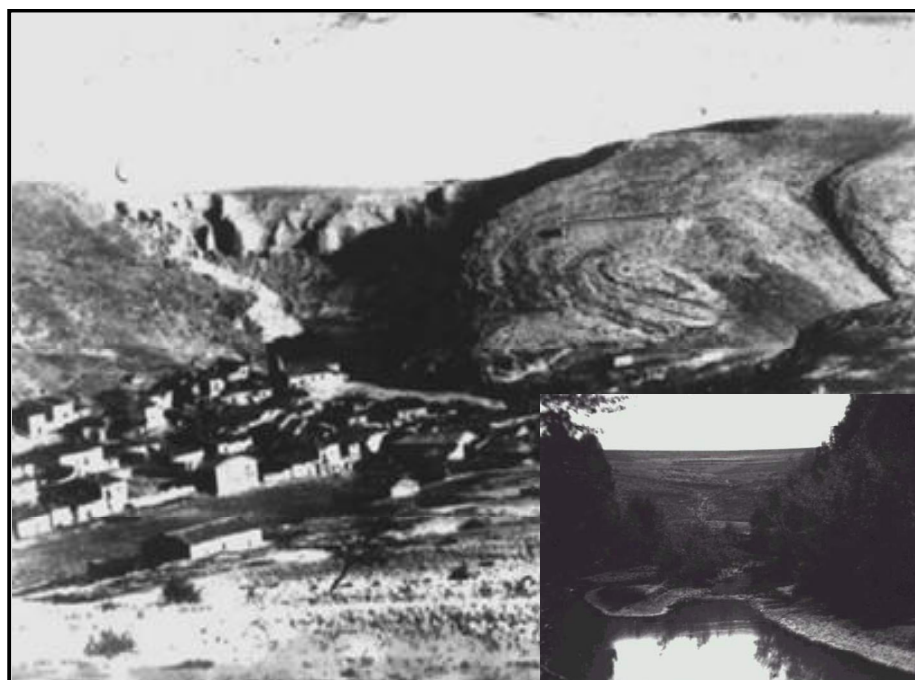


Figura 185. Fotografías del Pueblo de Linares y charca de la fuente mineral antes de quedar bajo el Embalse



Dadas las características minero-medicinales del citado manantial el Ayuntamiento de Maderuelo pretendió localizar dicho alumbramiento en el área exterior al pantano para recuperar el manantial y efectuar ensayos de caudal, análisis químicos, etc., y si las circunstancias son favorables fomentar la creación de un balneario que impulsaría las posibilidades socio-económicas del municipio.

A priori, el objetivo de esta investigación ha sido doble. En una primera fase, se trató de localizar la surgencia bajo la lámina de agua mediante un barrido con una barca y un equipo de testificación de sondeos, con la finalidad de localizar la fuente y tomar muestras para realizar análisis físico-químicos. Estos ensayos resultaron infructuosos, posiblemente, por la altura de la lámina de agua, que debido a la presión ejercida sobre la fuente impedirá el nivel de surgencia habitual y minimizará el gradiente de temperatura. En consecuencia, siendo imposible su detección mediante métodos geofísicos se localizó (en coordenadas U.T.M) la charca de la fuente de los Aguachines mediante la superposición de un plano del año 1931 y uno actual.

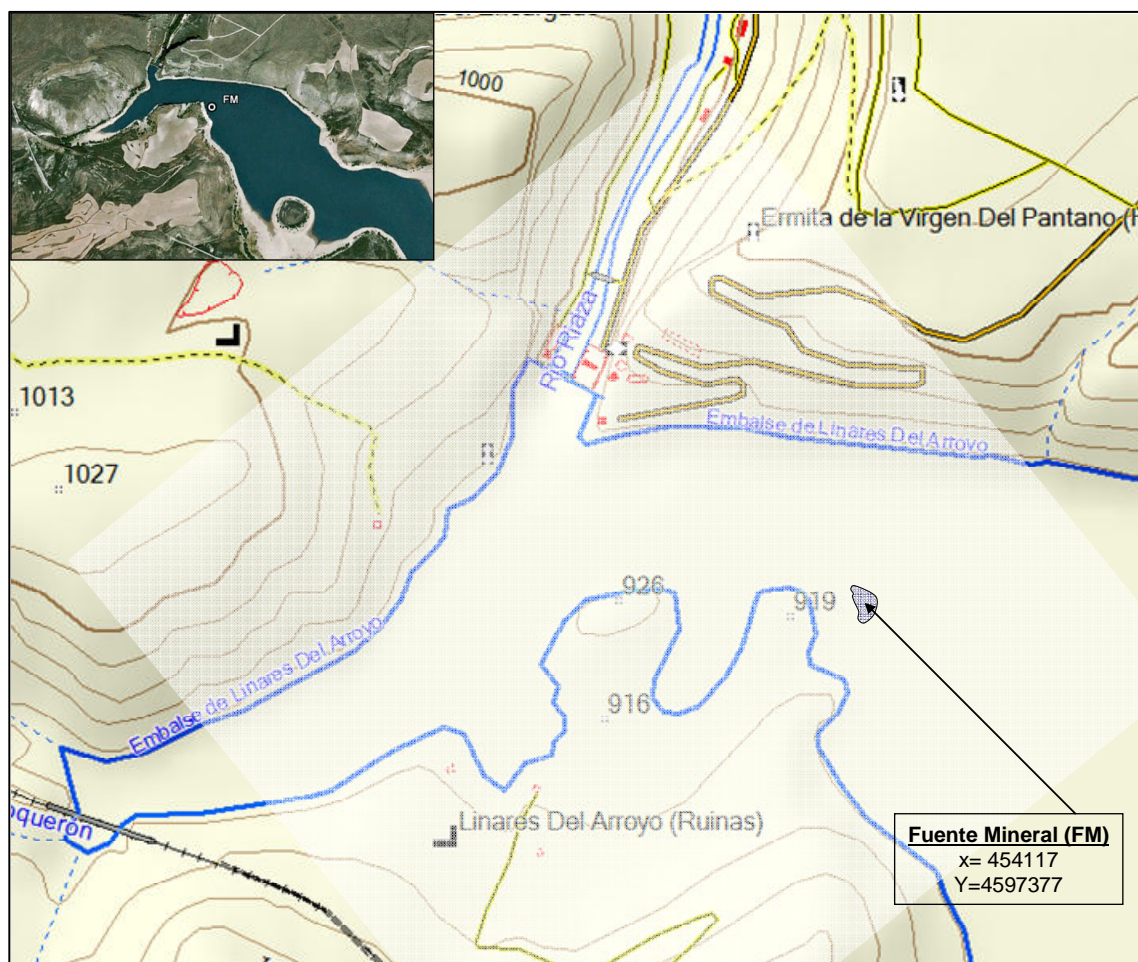


Figura 186. Localización en U.T.M de la charca de la fuente de los Aguachines mediante la superposición de un plano del año 1931 y uno actual.



En una segunda fase, se trató de buscar en el área aledaña a la mencionada fuente la formación o accidente tectónico que genera el flujo de agua y que da lugar a la surgencia de la Fuente de Los Aguachines.

El programa de investigación realizado comprendió:

- Análisis y reconocimiento geológico e hidrogeológico
- Prospección geofísica por el método de resistividades en el modalidad de Tomografía Eléctrica.
- Prospección geofísica por el método electromagnético en el dominio de frecuencia VLF.
- Protección geofísica por el método de Sondeos Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT).
- Procesado e interpretación.

4.2.- Geología e hidrogeología

4.2.1.- Encuadre Geológico

La zona de Maderuelo está encuadrada en el sector suroriental de la Cuenca del Duero. Esta cuenca es la mayor de las depresiones de la meseta Ibérica y está individualizada en la submeseta meridional por el Horst que constituye el Sistema Central. Aunque la cuenca del Duero está rellena por materiales terciarios, más o menos afectados por la orogenia alpina, y por materiales cuaternarios. El área que nos ocupa es uno de los pocos asomos internos de la cuenca donde afloran por causas tectónicas y por denudación de materiales del zócalo antiguo y de la cobertera mesozoica. Este zócalo está formado por materiales precámbricos y ordovícicos afectados por la orogenia hercínica que los plegó y por la alpina que provocó su fracturación y compartimentación en bloques escalonados que van elevándose hacia el Sistema Central. La cobertera mesozoica, que fosiliza el zócalo hercínico, es relativamente delgada, contiene materiales tanto triásicos como jurásicos y cretácicos, con predominio de estos últimos. Debido a su escasa potencia, sus deformaciones se adaptan a la disposición tectónica en escalones del zócalo, estructurándose en pliegues vergentes al Norte y frecuentemente en rodilla.

En cuanto a los rellenos Cenozoicos correspondientes a la cuenca del Duero están constituidos por materiales detríticos de origen fluvial y aluvial (conglomerados, gravas, limos y arcillas) y por calizos formados, según las áreas, en medios lacustres, palustres o de "playa-lake".

A nivel del área investigada en el Pantano de Linares las formaciones aflorantes pertenecen al Cretácico y al Terciario.

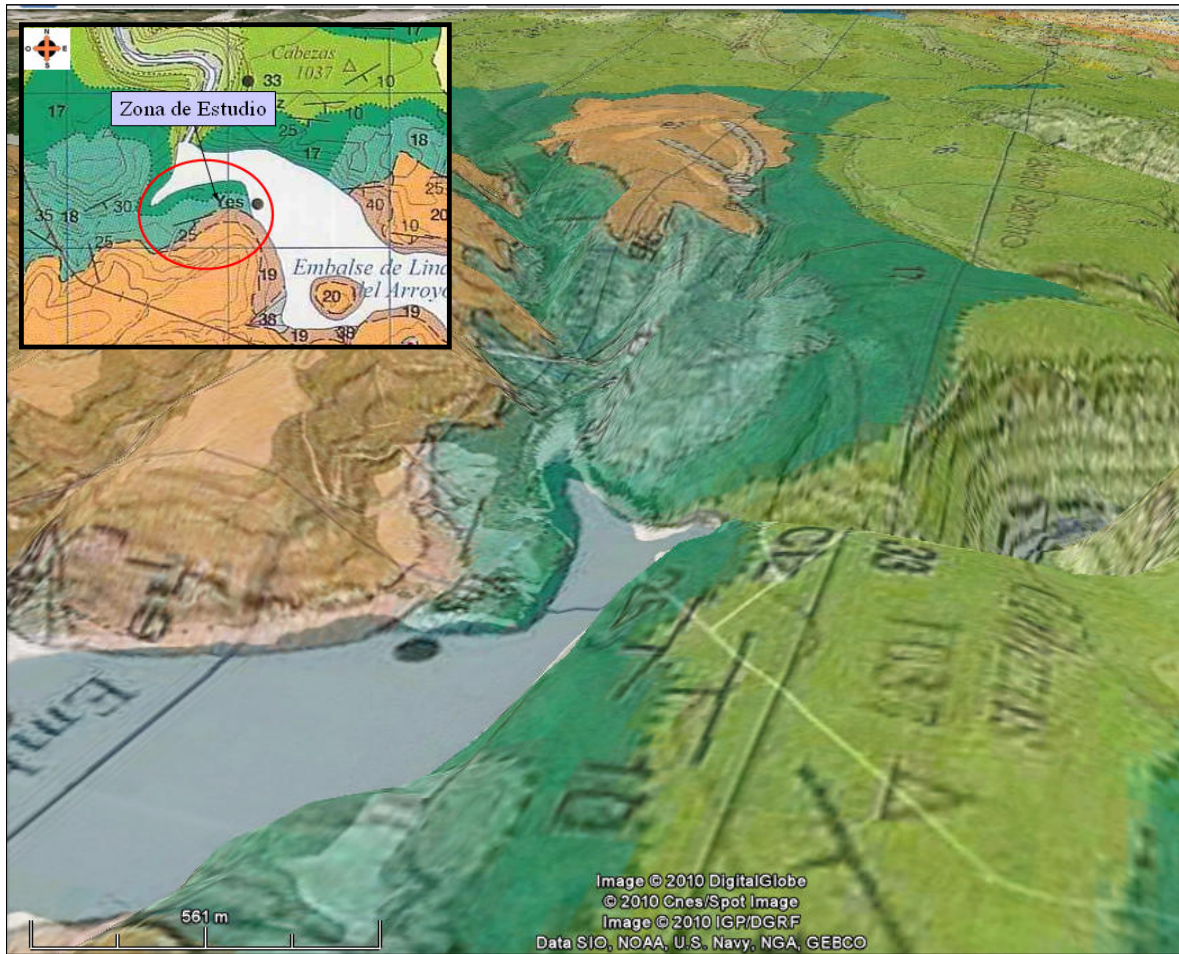


Figura 187. Mapa Geológico de la Zona (Software Google Earth)

Las formaciones Cretácicas se dividen en dos grupos:

- Unidad de dolomías masivas. Calizas y margas.
- Dolomías margas y yesos.

Respecto a las unidades terciarias pertenecen al Paleógeno y Neógeno y están constituidas de muro a techo por limos y arcillas con niveles de areniscas y conglomerados.

4.2.2.- Hidrogeología

En el área de Maderuelo, los materiales de interés hidrogeológico se agrupan en tres grandes unidades hidrogeológicas: el acuífero inferior del Mesozoico, el acuífero superior del Mesozoico, y el acuífero detrítico del Terciario.

- Acuífero inferior del Mesozoico
- Acuífero superior del Mesozoico
- Acuífero detrítico del Neógeno

Acuífero Inferior del Mesozoico.



En este acuífero se incluyen materiales de litologías y permeabilidades y heterogéneas pero que se han agrupado para constituir un conjunto continuo, sin intercalaciones impermeables de gran importancia.

El acuífero está constituido, de muro a techo, por:

- 200 m de materiales detríticos triásicos, con porosidad intergranular escasa, y con intercalaciones lentejonares arcillosas impermeables con desarrollo y potencia en ocasiones considerables.

- 60 m de dolomías rethienses, con porosidad por fisuración y karstificación importante aunque con intercalaciones impermeables de margas dolomíticas.

0 a 15 m de calizas micríticas del Lías inferior, con porosidad moderada por fracturación y karstificación.

-250 m de materiales detríticos en facies Utrillas, más conglomeráticos en la base y con porosidad intergranular moderada por la presencia de arcillas, decreciendo de muro a techo debido a la disminución de la granulometría; también aumentan hacia techo las intercalaciones arcillosas lentejonares.

El Precámbrico y Ordovícico inferior constituyen los materiales impermeables a muro, mientras que el impermeable de techo son los 100 m de arcillas y margas del Cenomaniense superior y Turoniense inferior.

Acuífero Superior del Mesozoico.

Está formado por dos importantes niveles carbonatados con porosidad por fraturación y karstificación, los 50 m de calizas del Turoniense superior y los 80 m de calizas y dolomías del Coniaciense superior- Maestrichtiense medio, separados ambos por una pequeña intercalación margosa dolomítica del Coniaciense, con 10 m de potencia.

El nivel impermeable de muro son las arcillas y margas del Cenomaniense superior Turoniense inferior, con 100 m de potencia, mientras que el nivel impermeable de techo son los 200 m de margas dolomíticas del Cretácico Terminal Paleoceno; este último nivel, sin embargo, está muy desmantelado por la erosión por lo que en ciertas zonas se produce una comunicación con el acuífero detrítico neógeno.

Acuífero Detrítico del Neógeno.

Como se mencionó anteriormente, este acuífero forma parte del acuífero del Terciario detrítico de la Cuenca del Duero, constituido por las formaciones lenticulares de arenas y gravillas englobadas en una matriz limo-arcillosa. Su permeabilidad tipo consiguiente no es muy grande.



Este acuífero aflora al Sur del área estudiada y tiene una potencia máxima de unos 250 a 300 m y su impermeable de muro puede ser tanto el Precámbrico y Paleozoico. En gran parte de su extensión este acuífero está conectado con los acuíferos mesozoicos sobre los que en muchas ocasiones se apoya directamente.

Techo impermeable del acuífero.

El techo impermeable del acuífero superior del Mesozoico está constituido por las margas dolomíticas, calizas y dolomías del Maestrichtiense medio-Paleógeno.

Esta unidad se apoya en concordancia estratigráfica aparente sobre los materiales cretácicos definidos como calizas y dolomías masivas.

El resto de la unidad, hasta su techo visible marcado por la discordancia angular y erosiva de la base del Neógeno, suele presentar un carácter totalmente carbonatado. A techo del tramo aparece una brecha carniolar, calizas con nodulos blanqueados silex y caliza con yeso, que podrían corresponder, o al menos equivaler sedimentológicamente, a un nivel de yeso alabastrino, de varios metros de espesor que se ha explotado mediante labores de interior en el margen septentrional del propio Valle del Tabladillo, que en superficie se manifiesta como una banda de silicificación (30 m).

La frecuencia de las intercalaciones margosas, el carácter micrítico de los niveles dolomíticos y la presencia de yesos en algunas áreas hacen que este conjunto presente escasa permeabilidad que constituye el techo del acuífero del Mesozoico y el muro del acuífero Terciario.

4.3.- Trabajos realizados

Los trabajos realizados se iniciaron con el reconocimiento fotogeológico y geológico de la zona como fase previa al planteamiento de la campaña de prospección geofísica.

La campaña de prospección geofísica, como se ha dicho ha consistido en la aplicación de varios métodos prospectivos, complementarios, con la finalidad de obtener la mayor información de las diferentes litologías en profundidad, morfología de las estructuras, fracturas, etc., dichas técnicas de exploración fueron:

Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (S.E.D.T.)

Tomografía Eléctrica (T.E.)

Calicatas electromagnéticas, método V.L.F.



4.3.1.- Sondeos Electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT)

Con la finalidad de obtener una idea general de los materiales del subsuelo en el área investigada se realizaron 5 Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT), distribuidos por la zona investigada.

Los SEDT se midieron con bucles de 50 x 50 metros de lado en la modalidad de bucle coincidente,

Los SEDT se georeferenciados en coordenadas U.T.M (European 1950).

Para cada SEDT se ha obtenido al menos 1 registro, utilizando un staking de 1000 repeticiones de la medida por cada canal.

En cada registro se ha medido un total de 73 canales, aunque es evidente que, para este tamaño de bucle, a partir del canal 35-40 las medidas estén afectadas por el ruido de fondo, superior a la señal a medir. También los primeros canales están afectados por la rampa, por lo que tanto los primeros canales como los últimos son desechados en el procesado.

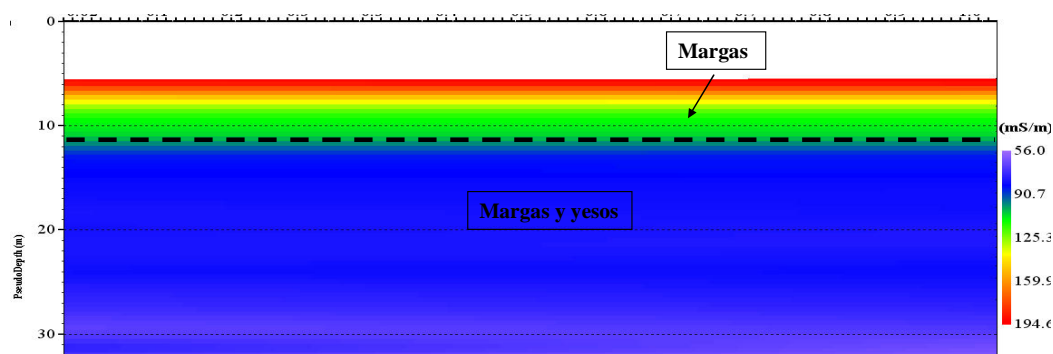


Figura 188. Ejemplo de SEDT realizado

En los estudios electromagnéticos, en su modalidad de SEDT, los cortes resultantes constituyen unas secciones que muestran en profundidad las variaciones de conductividad eléctrica mS/m. Estas variaciones obedecen fundamentalmente a cambios litológicos, aunque puede darse el caso de que dentro de la misma formación geológica aparezcan tramos de diferentes conductividades, debido a otro tipo de factores.

Las interpretaciones de los diferentes SEDT ponen de relieve la distribución de las diferentes litologías en profundidades, permitiendo diferenciar entre formaciones de margas, margas y yesos o yesos y margas

4.3.2.- Tomografía Eléctrica

Con esta modalidad prospectiva se han llevada a cabo la medición de 2188 metros de tomografía eléctrica, distribuidos en 7 perfiles por la zona de estudio.



Los dispositivos de medida utilizados fueron el Polo – Dipolo y Schlumberger con una separación de electrodos de 6 metros.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (European 1050), con objeto de ser introducidos en un Modelo 3D realizado con SketchUp.

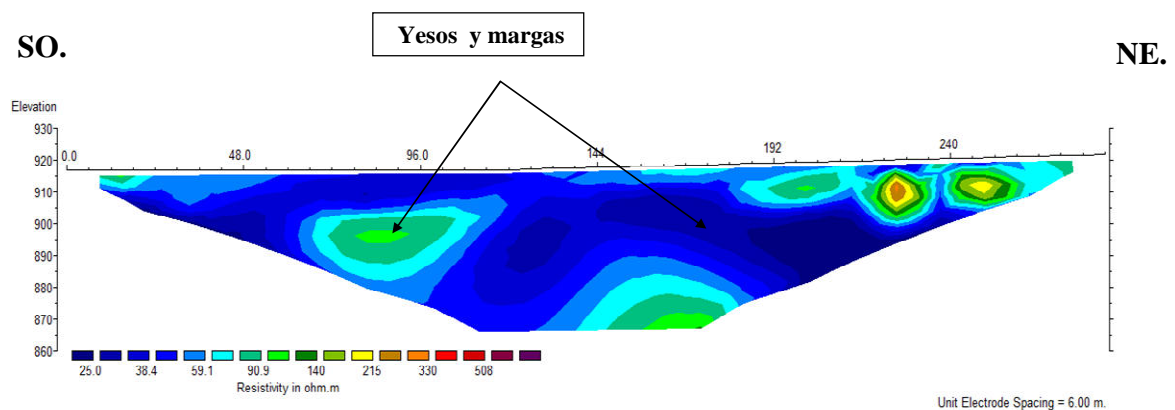


Figura 189.Ejemplo de perfil de Tomografía eléctrica realizado

En los estudios de Tomografía eléctrica, los resultados de campo son procesados para construir las secciones geoelectricas 2D (secciones de resistividad específicas y profundidades), relativas a los diferentes perfiles medidos. Las variaciones de resistividades obedecen a cambios litológicos en sentido lateral y en profundidad.

Los criterios de correlación establecidos en la zona con la finalidad de pasar de datos geofísicos (resistividades) a litológicos se han basado en reconocimientos geológicos de campo y experiencias de trabajos en contextos geológicos similares.

4.4.- Método electromagnético V.L.F

Con este método de reconocimiento se han medido un total de 3.095 metros de calicatero electromagnético, distribuidos en 15 perfiles, distribuidos por la zona de estudio.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (European 1050), para su inserción del modelo 3D.



SE.

NO.

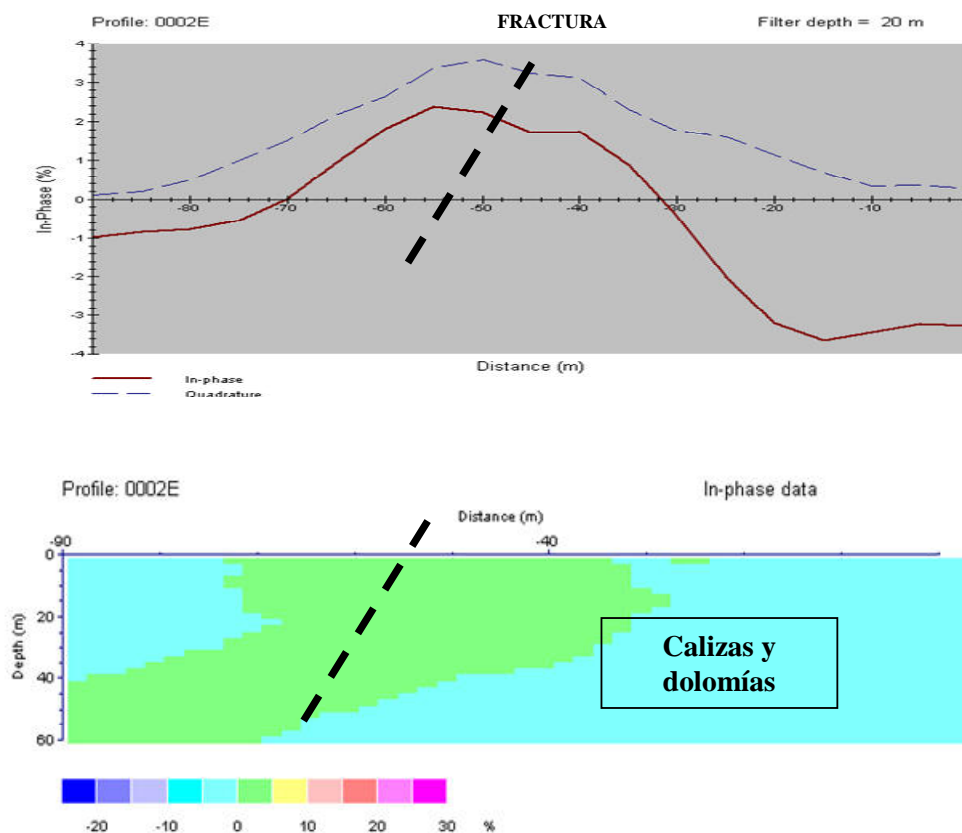


Figura 190. Ejemplo de perfil de VLF

Los datos de campo obtenidos en los perfiles de calicatas electromagnéticas se han sometido a un proceso de filtrado, con la finalidad de ubicar la anomalías con precisión y mostrar una sección hasta 60 metros de profundidad con la distribución de las densidades aparentes de corriente, es decir, diferenciar entre materiales de mayor o menor conductividad eléctrica.

4.5.- Creación de Modelo 3D mediante el programa SketchUP

Con los perfiles de tomografía eléctrica y VLF se realizó un modelo 3D del subsuelo con el programa SketchUp. El objetivo fue el de localizar el accidente tectónico que generaba el flujo de agua y que daba lugar a la surgencia de la Fuente de Los Aguachines

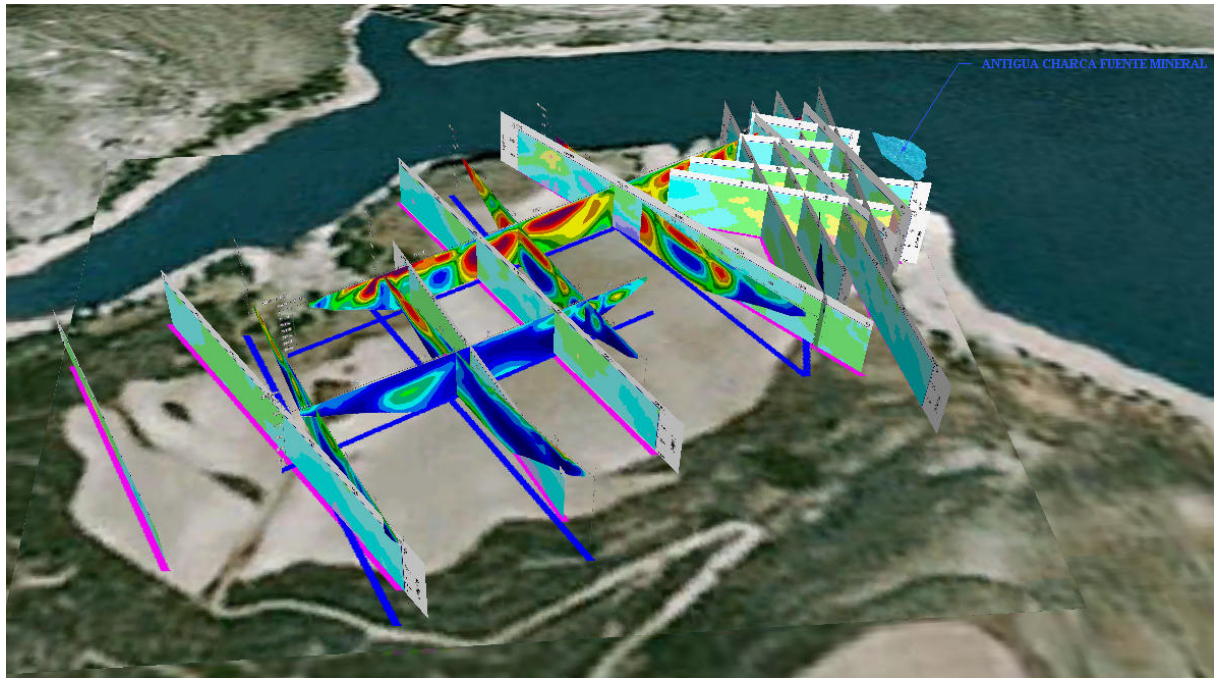


Figura 191. Modelo 3D (Software SketchUp)

4.6.- Resultados

En relación con la investigación realizada se llega a los siguientes resultados:

La zona de Maderuelo está encuadrada en el sector suroriental de la Cuenca del Duero. Aunque la cuenca del Duero está rellena por materiales terciarios, más o menos afectados por la orogenia alpina, y por materiales cuaternarios. A nivel del área investigada en el Pantano de Linares las formaciones aflorantes pertenecen al Cretácico y al Terciario.

Las formaciones Cretácicas se dividen en dos grupos:

Unidad de dolomías masivas. Calizas y margas.
Dolomías margas y yesos.

Respecto a las unidades terciarias pertenecen al Paleógeno y Neógeno y están constituidas de muro a techo por limos y arcillas con niveles de areniscas y conglomerados.

Según el informe hidrogeológico relativo a la hoja de Maderuelo, los materiales que se encuentran en el área investigada están catalogados de baja permeabilidad, debido a la presencia de margas y yesos. No obstante, las formaciones de dolomías masivas y calizas pueden presentar karstificaciones aumentando notablemente sus permeabilidades. Este hecho se pone de manifiesto en propia fuente de Los Aguachines que, según los planos constructivos del pantano (C. H. Duero), la ubican sobre formaciones de calizas y dolomías.



La prospección geofísica realizada en sus diferentes métodos aplicados ha permitido obtener la morfología de las formaciones en profundidad, así como, caracterizar litológica los materiales existentes en profundidad. La interpretación conjunta de los perfiles y su representación en 3D, permite obtener una visión global de la zona. Dicha interpretación destaca netamente dos dominios litológicos.

Margas y yesos o yesos y margas
Calizas y dolomías

Según la interpretación realizada se detectó un cabalgamiento (falla inversa) de las formaciones calizas-dolomías sobre las margas-yesos. De acuerdo con las características, situación y dirección de la fractura, entendemos que este accidente tectónico guarda una estrecha relación con la antigua fuente de Los Aguachines, siendo la responsable de la surgencia. De esta forma, esta discontinuidad (falla inversa) permitiría la ascensión de aguas más profundas con una temperatura alta y un alto contenido en sales, dando origen a las aguas minero-medicinales de la fuente de los Aguachines.

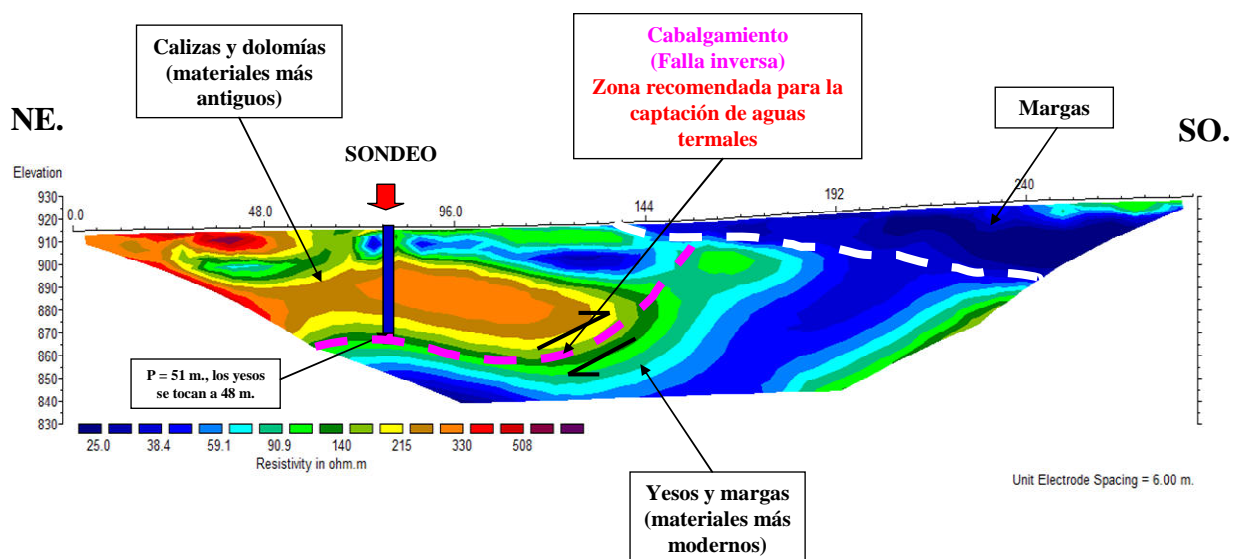


Figura 192. Imagen mediante Tomografía Eléctrica de la estructura geológica y propuesta de sondeo

Al objeto de tratar de captar el flujo de agua que daba lugar a la fuente de Los Aguachines, se realizó un sondeo de reconocimiento de 60m (en el área reflejada en la figura 192), al objeto de alcanzar la falla inversa.

Las características técnicas de los sondeos fueron las siguientes:

Profundidad: 60 metros.
Sistema de perforación: Rotopercusión.
Diámetro de perforación mínimo: 180 mm
Entubación: PVC



Los resultados de la investigación fueron positivos ya que al alcanzar la falla inversa a los 48m de profundidad se produjo un surgencia de agua que recordaba a la surgencia de petróleo de las antiguas perforaciones petrolíferas. Esta importante surgencia de agua era esperada debido a que el caudal de la fuente de los aguachines era importante (100 -150 l/s). Se recogieron muestras y se certificó su autenticidad mediante un análisis químico de las aguas.



Imagen 20. Fotografía que capta el momento en que se alcanza la falla (a 48m de profundidad) y se recupera la fuente de los Aguachines.



5.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA EL ESTUDIO DE UN DESLIZAMIENTO EN FORMIGAL (HUESCA)

5.1.- Introducción y objetivos

El presente trabajo surge ante la necesidad de utilizar técnicas geofísicas que permitan una aproximación a la definición geométrica del deslizamiento que afecta a la urbanización de la estación de Formigal (Huesca), de forma que puedan diseñarse medidas de actuación y remediación que permitan la estabilización del mismo.

El objetivo de este trabajo es analizar desde una perspectiva geofísica la estructura y límites espaciales de los materiales que se presentan en la zona afectada por el deslizamiento así como determinar la posición del basamento inalterado mediante la ejecución de perfiles de Tomografía Eléctrica (en adelante TE) en los límites de la zona de investigación.

5.2.- Marco geológico

La zona de estudio se haya emplazada sobre una sucesión de materiales aluviales y depósitos glaciales de naturaleza pizarrosa, areniscosa, con bloques andesíticos y de caliza provenientes de la alteración y erosión de los relieves circundantes. El sustrato rocoso en la zona de estudio lo componen materiales predominantemente pizarroso.

5.3.- Investigaciones geofísicas

En este apartado se detallan los trabajos realizados en la campaña de investigación geofísica efectuadas en el proyecto mediante Tomografía Eléctrica.

5.3.1.- Justificación de los trabajos

El empleo de la Tomografía Eléctrica como técnica de investigación responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad del parámetro registrado (resistividad) a la existencia de cambios litológicos y zonas de alteración de los materiales existentes en profundidad.
- Obtención de secciones bidimensionales de resistividad que permitirán determinar aspectos tanto estructurales (buzamientos, fracturas, etc.) como cambios litológicos en profundidad.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente. Los dispositivos a emplear en la TE, así como la longitud de los perfiles y espaciado interelectródico permitirán una alta resolución en la determinación de los valores de resistividad.



5.3.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

La campaña de campo realizada con el sistema de Tomografía Eléctrica (T.E.) ha consistido en la realización de un total de 1.122 ml. de tomografía eléctrica distribuidos en 3 perfiles de investigación. Se ha empleado una manguera de 48 electrodos con un espaciado interelectrónico de 6 m que permite realizar perfiles de 282 m de longitud¹³.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (WGS 84), mostrando su origen, final y longitud, de acuerdo con lo expresado en la tabla 8 adjunta.

| Nº DE PERFIL | X | Y | LONGITUD (m) |
|--------------|--------|---------|--------------|
| PG-1. Inicio | 715310 | 4739239 | 420 |
| PG-1. Final | 715707 | 4739130 | |
| PG-2. Inicio | 715343 | 4739328 | 420 |
| PG-2. Final | 715751 | 4739266 | |
| PG-3. Inicio | 715487 | 4739478 | 282 |
| PG-3. Final | 715764 | 4739435 | |

Tabla 8. Coordenadas UTM de los perfiles de TE (Huso 30).

La posición de los perfiles de investigación puede verse en la imagen (figura 193).

¹³ Los perfiles de mayor longitud (PG-1 y PG-2, de 420 m de longitud) se han realizado a partir de la unión de dos perfiles de investigación de 282 m solapando 23 electrodos (138 m de perfil/50 % de los electrodos), redundando las medidas y mejorando la calidad de los datos obtenidos.

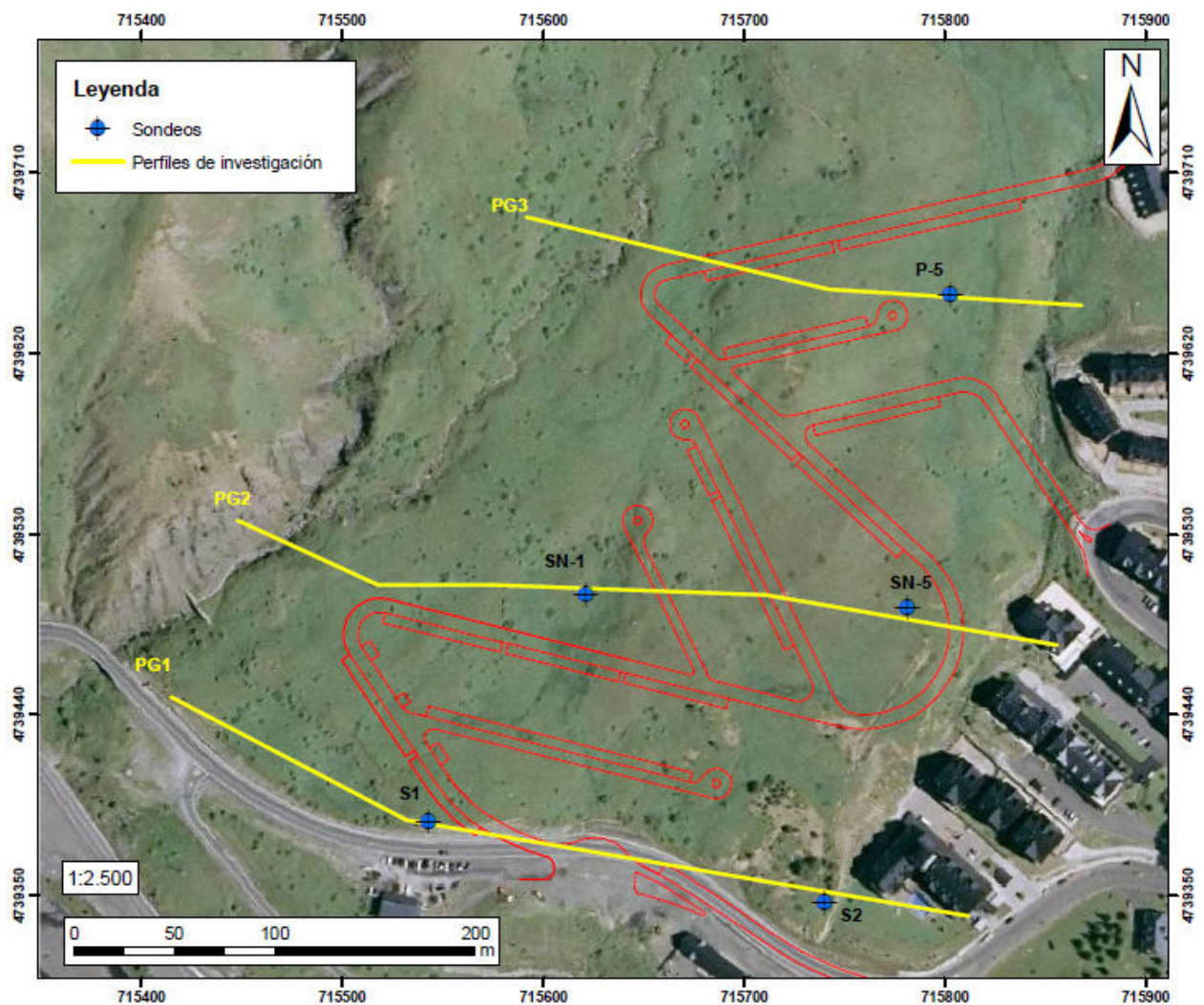


Figura 193. Posición de los perfiles de investigación TE realizados

Los perfiles de investigación se han dispuesto de manera que cortan transversalmente el cuerpo deslizado. Además de la posición y trazado de los mismos, se ha cruzado por los numerosos sondeos de investigación existentes en la zona afectada con el fin de emplearlos con carácter paramétrico¹⁴. El trabajo paramétrico es fundamental en estudios geofísicos ya que disminuyen el principio de equivalencia¹⁵ y permiten mejorar la precisión en las determinaciones.

En la zona de estudio esta metodología de trabajo se hace indispensable debido a que los posibles contrastes de resistividad entre las litologías pueden ser bajos debido a que la naturaleza de los materiales aluviales y glaciares es similar a la del basamento.

Dados los condicionantes de penetración necesaria, los perfiles se han realizado mediante dos dispositivos de registro, cuyas características y objetivos han sido los siguientes:

¹⁴ Punto o perfil de investigación que se realiza en las inmediaciones de una zona en la que se conocen con precisión las del terreno como puede ser el caso de un sondeo, el cual, aporta datos precisos sobre los cambios litológicos en profundidad e incluso informa sobre las propiedades físicas de los materiales del subsuelo (testificación geofísica). En este caso, la información aportada por los sondeos mecánicos se emplea con el fin de ajustar parámetros durante la interpretación de los perfiles de TE evitando problemas de equivalencia.

¹⁵ Materiales diferentes pueden presentar la misma resistividad debido a que la resistividad de un material depende de múltiples factores cuya combinación puede traducirse en una misma resistividad.



- Dispositivo Wenner-Schlumberger: diferenciación de los primeros metros de los niveles de depósitos de ladera. El dispositivo permite penetrar un mínimo de 30 m y cuenta con 23 niveles de medida y 513 puntos de información ofreciendo una elevada resolución espacial.
- Dispositivo Polo-Dipolo: Diferenciación del sustrato rocoso inalterado (basamento) y niveles de depósitos de ladera. El dispositivo permite penetrar un mínimo de 60 m y cuenta con 45 niveles de medida y 1.081 puntos de información ofreciendo una elevada resolución espacial.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN PG-1

El perfil de investigación PG-1, presenta una longitud de 420 m y discurre con dirección WNW - ESE. El perfil presenta una inflexión a su paso por el sondeo S-1 y discurre también a su paso por el sondeo S-2. Se trata del perfil más meridional de los realizados en la zona de estudio.

Dispositivo Polo-Dipolo

La figura 194 muestra los resultados del perfil obtenidos con el dispositivo polo-dipolo. El perfil muestra en general la existencia de al menos cuatro capas de materiales desde el punto de vista geoelectrico:

- La primera capa (en adelante D1) se extiende desde la superficie del terreno hasta unos 15 – 20 m de profundidad. Presenta un carácter conductor, con valores de resistividad inferiores a los 50 Ohm·m. Atendiendo a los datos de los sondeos la capa se corresponde con materiales predominantemente arcillosos con cantos de pizarra.

Existen dos zonas resistivas situadas entre los metros 180 a 128 y 315 a 345 de escasa potencia que se corresponden con zonas removidas en las que se han realizado movimientos de tierras.

- La segunda capa (en adelante D2) ocupa una posición intermedia dentro de los materiales que componen los derrubios de ladera emplazados sobre el sustrato inalterado. Presenta un claro carácter resistivo con valores que oscilan entre los 50 y 300 Ohm·m y presenta una potencia variable de unos 10-15 m de potencia. Esta capa parece tener un carácter subhorizontal y se presenta de manera más o menos continua a lo largo de todo el perfil de investigación. El carácter resistivo de la misma parece deberse a la menor proporción de materiales arcillosos en beneficio de bloques y cantos de pizarras y cuarcitas.
- La tercera capa y última de los materiales situados sobre el sustrato (en adelante D3) ocupa la parte basal, y se extiende desde el muro de la capa D2 hasta el sustrato rocoso. Presenta un carácter conductor, con valores de resistividad inferiores a los 50 Ohm·m. Esta capa presenta una composición predominantemente arcillosa similar a la D1.
- La última capa la constituye el sustrato rocoso (S1). El sustrato se aprecia con



nitidez debido al carácter resistivo del mismo (pizarras inalteradas). En este caso, el techo del sustrato es irregular pudiendo dividirse en tres sectores.

- Tramo inicial del perfil (metro 0 a 145). El sustrato aparece muy profundo, casi en el límite de profundidad del perfil de investigación.
- Tramo central (metros 145 a 270). En esta parte el sustrato presenta un carácter subhorizontal. La transición gradual en los valores de resistividad entre la capa D3/conductora y S1/resistiva podría indicar la existencia de una capa intermedia correspondiente a un nivel de alteración del sustrato rocoso¹⁶.
- Tramo final (metros 270 a 420). El sustrato aparece elevado y de forma más somera en todo el perfil.

El límite entre los tramos inicial y final parece ser de tipo erosivo mientras que entre los tramos central y final podría indicar la presencia de una fractura que no parece afectar a las capas D1, D2 y D3.

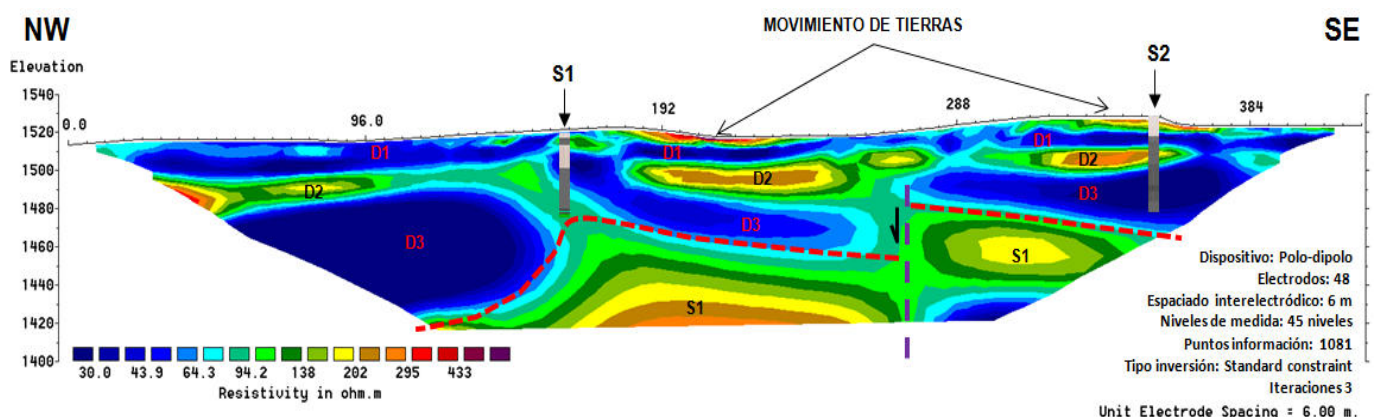


Figura 194. Perfil de Investigación PG-1 con dispositivo Polo-Dipolo.

De los dos sondeos, únicamente el S-1 cortó el basamento. Si comparamos el perfil geoelectrónico con la columna de perforación vemos como el final del sondeo tiende a situarse en la zona de incremento en la resistividad que genera la presencia del basamento. En el caso del sondeo S-2, el mismo termina en medio de la capa D-2.

Dispositivo Wenner-Schlumberger

El dispositivo Wenner-Schlumberger se ha realizado para tratar de observar de forma específica los primeros 30 m de profundidad con el fin de determinar de forma más precisa los

¹⁶ El contraste entre una capa resistiva y otra conductora se traduce en una fuerte variación en los valores de resistividades obtenidos (isolíneas de resistividad muy juntas). La existencia de una capa intermedia de resistividad también intermedia produce que la variación de resistividades sea gradual y por tanto, exista un mayor espaciado entre las isolíneas de resistividad.



límites entre las posibles capas de materiales que constituyen los derrubios en la zona de estudio.

La figura 195 muestra los resultados del perfil obtenidos con el dispositivo Wenner-Schlumberger. Si analizamos dicho perfil comparativamente con el dispositivo Polo-Dipolo vemos que solo se precian con nitidez tres de las cuatro capas de materiales desde el punto de vista geoelectrico:

Se aprecia la existencia de las capas D1, D2 y D3 mientras que el sustrato (S1) no aparece. El detalle más notable es que la capa D2 no parece presentar una continuidad lateral a lo largo de todo el perfil, interrumpiéndose en las inmediaciones del sondeo S1.

También se aprecia la discordancia entre los datos de perforación del sondeo S-1 en su tramo final, en el cual, se supone que corta el sustrato inalterado y el perfil de investigación que sitúa en esta zona materiales conductores no interpretables como el sustrato.

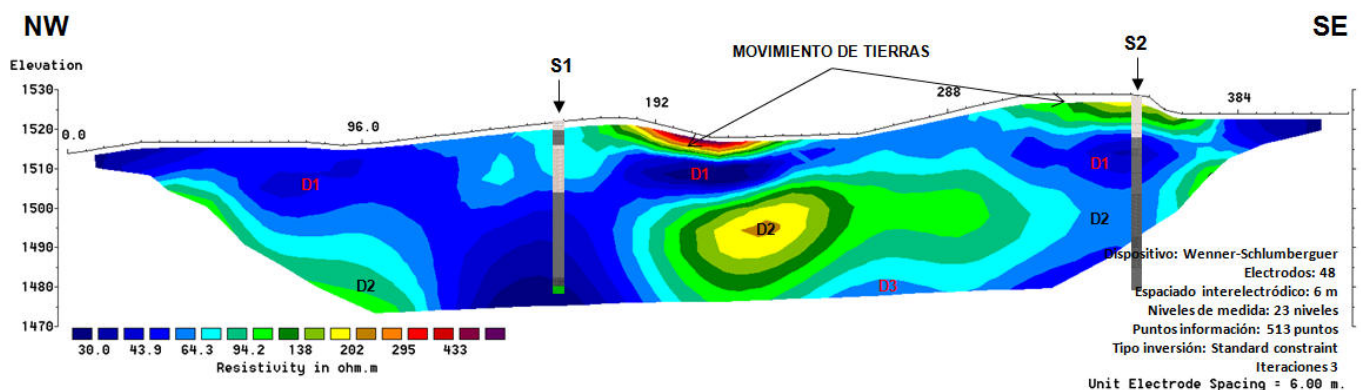


Figura 195. Perfil de Investigación PG-1 con dispositivo Wenner-Schlumberger.

Los sondeos S-1 y S-2 están instalados con tubería inclinométrica disponiéndose de datos relativos al movimiento de la ladera. En este caso, el sondeo S-1 registra movimientos a una profundidad de 8 metros mientras que el S-2 no registra movimientos de entidad. En este caso, los movimientos en el S-1 parecen coincidir con el techo de la formación resistiva intermedia (D2) que conforman los materiales que constituyen los depósitos de ladera sobre el sustrato rocoso.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN PG-2

El perfil de investigación PG-2, presenta una longitud de 420 m y discurre paralelo al PG-1 con dirección WNW - ESE. El perfil discurre por la parte central de la masa deslizada intersectando a su paso los sondeos SN-1 y SN-5.

Dispositivo Polo-Dipolo

La figura 196 muestra los resultados del perfil obtenidos con el dispositivo polo-dipolo. El perfil muestra la existencia de las cuatro capas definidas con anterioridad en el perfil PG-1:

- La capa conductora D1 se extiende a lo largo de todo el perfil alcanzando una



profundidad de unos 10 m. Aflora en superficie en los metros 80 a 190. En el resto del perfil, se observa una cubierta de materiales resistivos correspondiente a los movimientos de tierras de las obras en esta zona.

- La capa D2 se presenta un carácter discontinuo no apreciándose con claridad su existencia entre los metros 75 a 150 del perfil de investigación. La capa tiene un claro carácter subhorizontal con una potencia de 5 a 10 m.

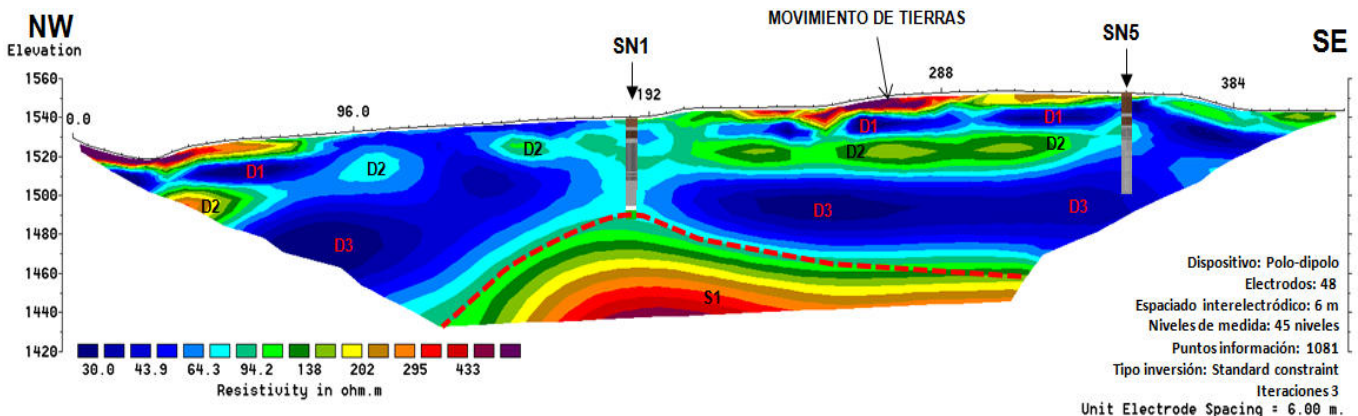


Figura 196. Perfil de Investigación PG-2 con dispositivo Polo-Dipolo.

- La tercera capa de materiales situados sobre el sustrato, capa D3, se extiende al igual que en el perfil anterior, desde el muro de la capa D2 hasta el sustrato rocoso. La posible ausencia de D2 parece comunicar las capas D1 y D3 ntre los metros 75 a 150 del perfil.
- El sustrato rocoso (S1) se manifiesta con nitidez y con carácter subhorizontal en la parte oriental del perfil. En la vertical del sondeo SN-1 parece somerizarse para a continuación, hundirse progresivamente hacia el W de manera similar a lo que ocurre en el caso del perfil PG-1. En ambos casos, parece que la ausencia/hundimiento del sustrato se debe a fenómenos de tipo erosivo, pudiendo reflejar un valle en V, típico del modelado glaciar.

Dispositivo Wenner-Schlumberger

El dispositivo Wenner-Schlumberger (figura 197) muestra únicamente la disposición de las capas D1, D2 y D3. El perfil pone de manifiesto las siguientes características:

- Se distinguen con claridad las zonas resistivas correspondientes a los movimientos de tierras.
- La capa D2 (capa resistiva debida a la menor proporción de materiales arcillosos en beneficio de bloques y cantos de pizarras y cuarcitas) se diferencia con claridad entre los metros 160 y 380 de perfil. El análisis de las columnas de los sondeos SN-1 y SN-2 muestra la existencia de materiales menos arcillosos y con cantos a las profundidades de emplazamiento de la capa D2 permitiendo la correlación



entre ambos desde el punto de vista geoelectrico y habilitando el perfil de TE para cartografiar dicho nivel.

- También se aprecia la discordancia entre los datos de perforación del sondeo S-1 en su tramo final, en el cual, se supone que corta el sustrato inalterado y el perfil de investigación que sitúa en esta zona materiales conductores no interpretables como el sustrato.

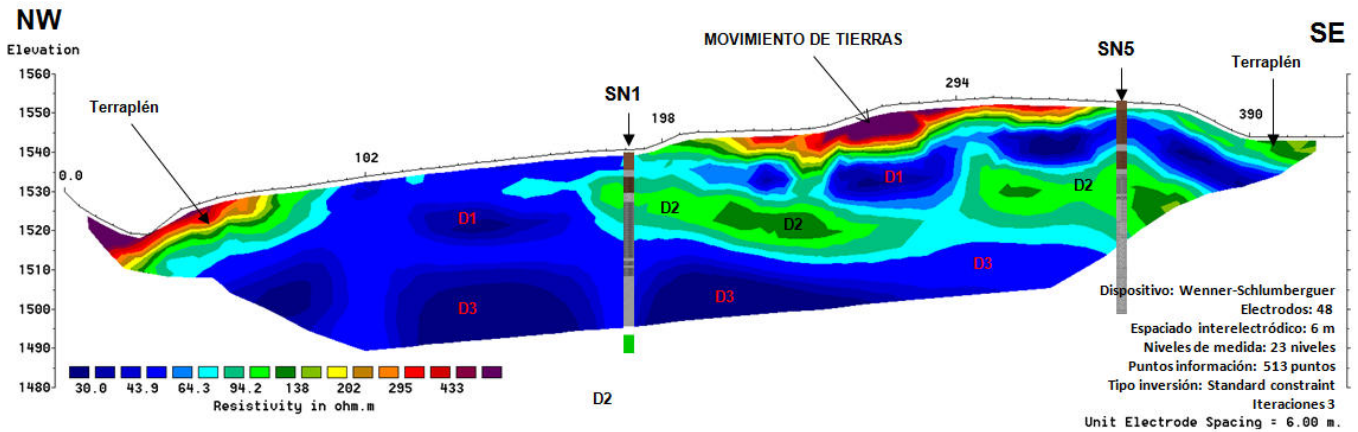


Figura 197. Perfil de Investigación PG-2 con dispositivo Wenner-Schlumberger.

Los sondeos SN-1 y SN-2 están instalados con tubería inclinométrica disponiéndose de datos relativos al movimiento de la ladera. En este caso, el sondeo SN-1 registra movimientos a una profundidad de 8 metros mientras que el S-2 no registra movimientos de entidad. En este caso, y al igual que sucediera con el perfil PG-1, los movimientos en el S-1 parecen coincidir con el techo de la formación resistiva intermedia (D2).

Cerca de la traza del perfil y del sondeo SN-1 existe un sondeo inclinométrico (S-2) el cual pone de manifiesto la existencia de movimientos a unos 12 m de profundidad (figura 198). La posición proyectada de esta zona donde se producen los movimientos parece coincidir una vez más con el techo de la formación resistiva intermedia (D2).

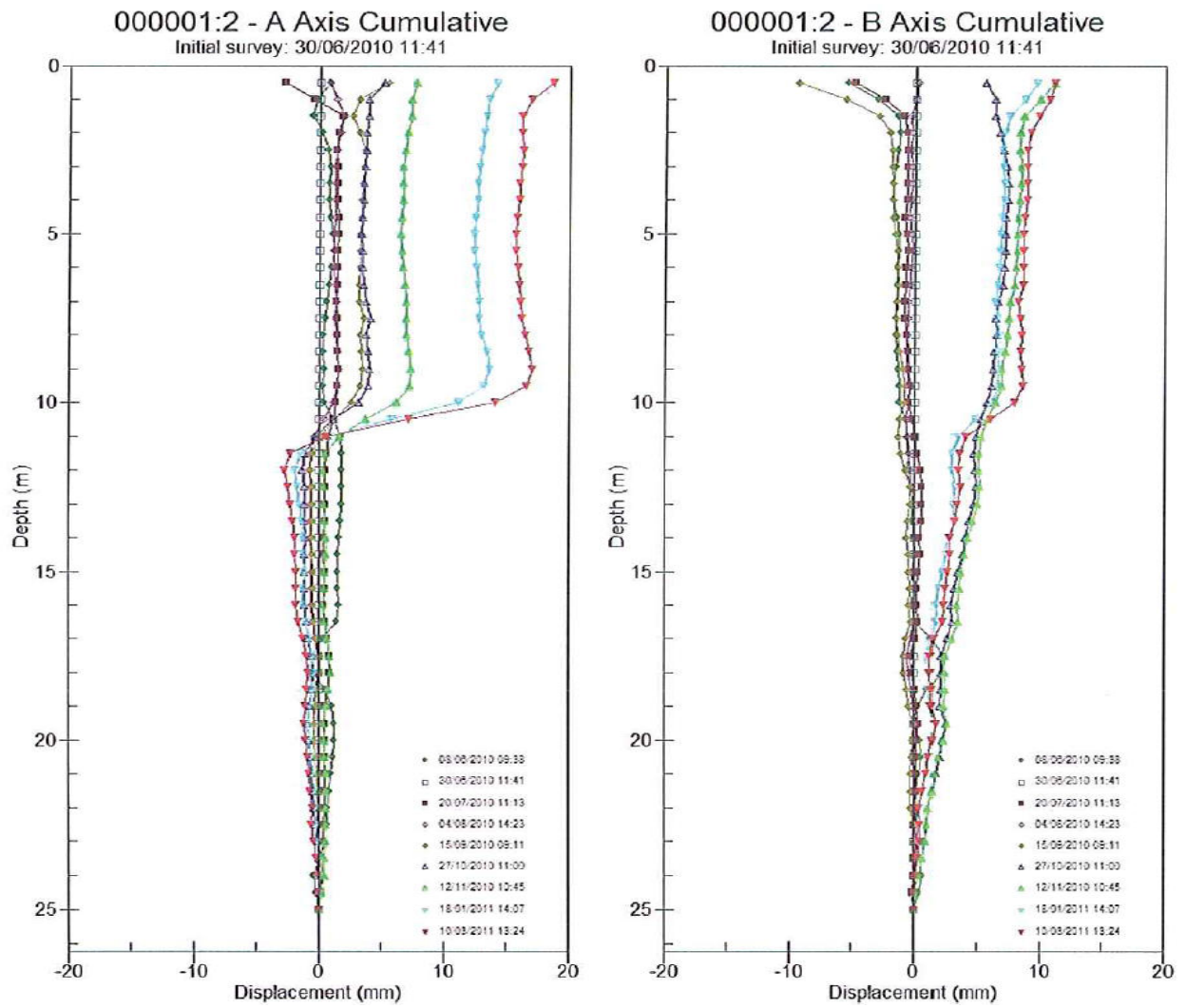


Figura 198. Registro inclinométrico del sondeo S-2 (Geobrugg).



PERFIL DE INVESTIGACIÓN PG-3

El perfil de investigación PG-3, presenta una longitud de 282 m y discurre paralelo a los dos perfiles anteriores en la zona de cabecera del posible deslizamiento. El perfil presenta una inflexión en su punto central para discurrir sobre el sondeo S-5 y emplearlo con carácter paramétrico de cara a la interpretación.

Dispositivo Polo-Dipolo

La figura 199 muestra los resultados del perfil obtenidos con el dispositivo polo-dipolo. El perfil muestra como en los casos anteriores la existencia de las tres capas diferenciadas desde el punto de vista geoelectrónico que conforman los derrumbios de ladera y el sustrato rocoso:

- La capa superficial, D1 se prolonga desde la superficie hasta los 5 – 10 m de profundidad. Presenta un carácter conductor, con valores de resistividad inferiores a los 50 Ohm-m. y está formada principalmente por materiales predominantemente arcillosos con cantos de pizarra.
- La capa resistiva intermedia (D2) presenta valores mucho más resistivos que en los dos perfiles anteriores. El perfil P-5 pone de manifiesto la composición de la misma por bloques de pizarras y calizas de 0,5 a 1 m de diámetro lo que explicaría el incremento en la resistividad de los mismos. La capa presenta una morfología subhorizontal no constante no apreciándose entre los metros 0 a 75 del perfil.
- La capa conductora D3 se sitúa a muro de D2 y a techo del sustrato. Parece acuñarse hacia el Oeste a medida que se produce la elevación del sustrato llegando en la parte inicial del perfil a estar en conexión con la capa D1.
- El sustrato inalterado se distingue con claridad. El mismo presenta cierto buzamiento al Este.

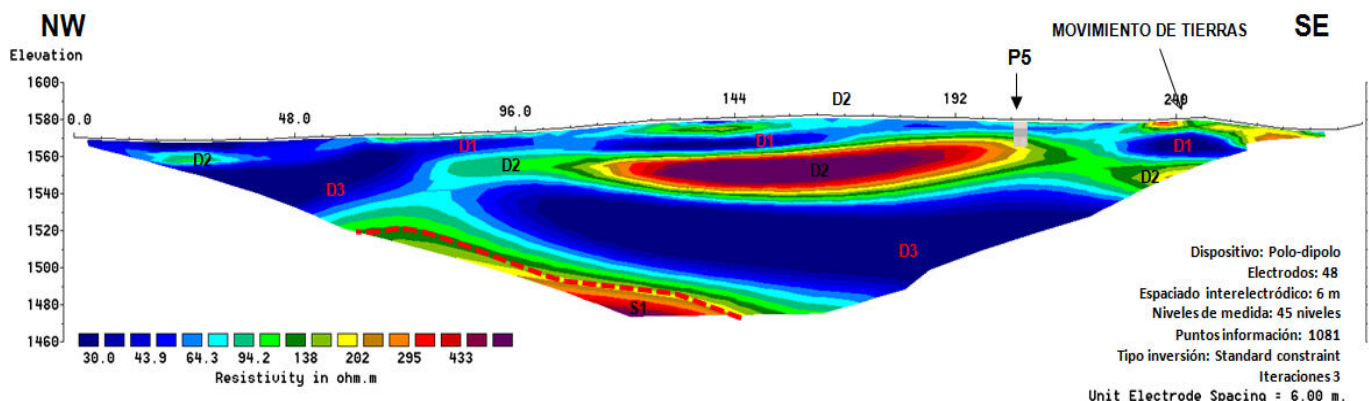


Figura 199. Perfil de Investigación PG-3 con dispositivo Polo-Dipolo.



Dispositivo Wenner-Schlumberger

El dispositivo Wenner-Schlumberger (figura 200) presenta como características de mayor importancia, el carácter resistivo de la capa D2 así como la no continuidad de la misma entre los metros 30 a 70 del perfil.

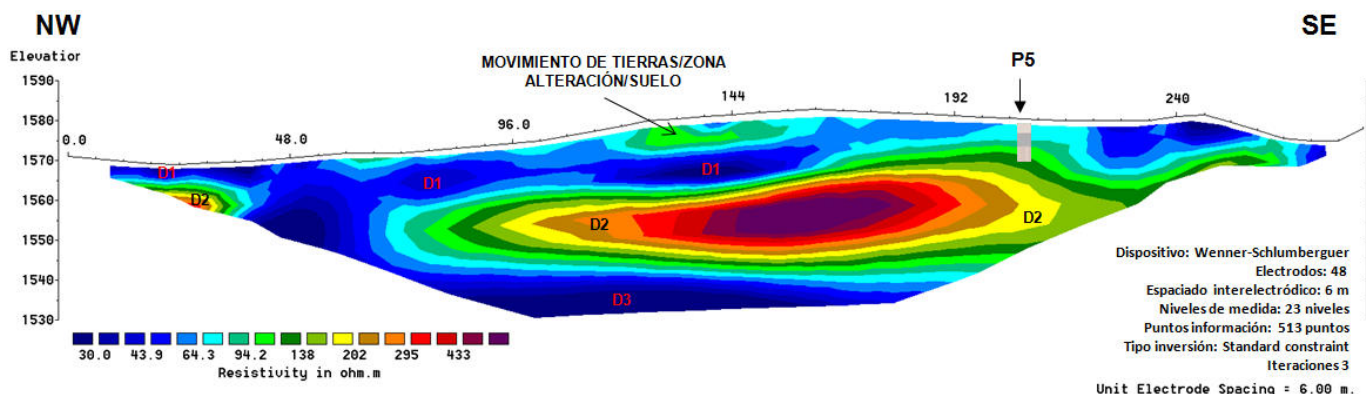


Figura 200. Perfil de Investigación PG-3 con dispositivo Wenner-Schlumberger.

Desde el punto de vista inclinométrico, el sondeo S-5 tiene instalada tubería inclinométrica. Los datos obtenidos muestran la existencia de movimiento entorno a los 9 m de profundidad (figura 201) coincidiendo al igual que en los perfiles anteriores, con el techo de la formación resistiva intermedia (D2).

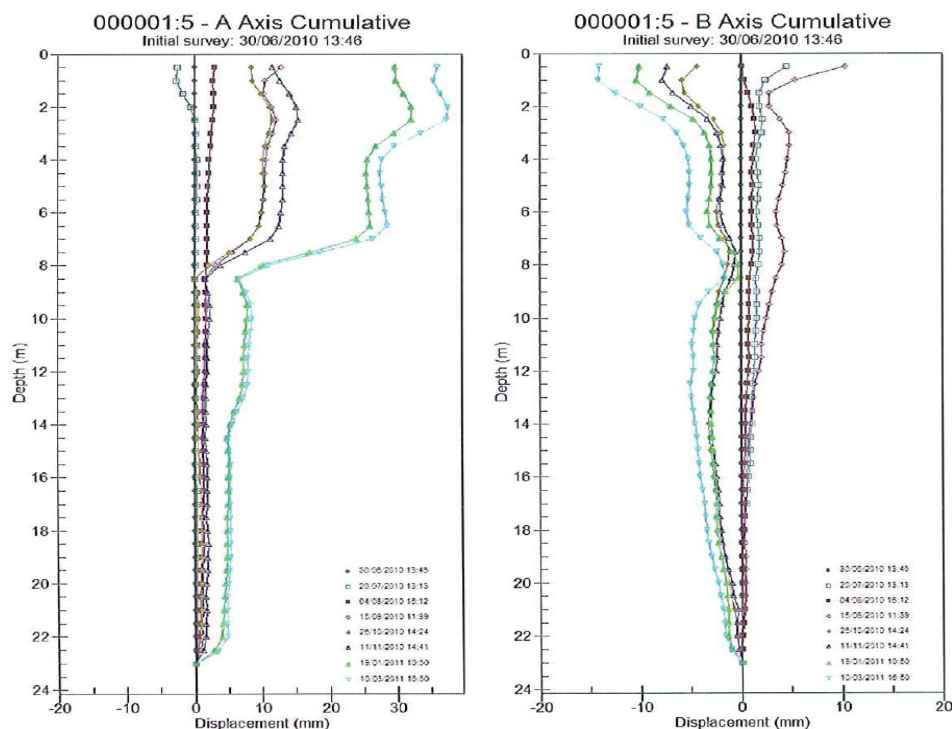


Figura 201. Registro inclinométrico del sondeo S-5 (Geobrugg).



5.4.- Análisis de la investigación

El análisis conjunto de los perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica realizados en la zona junto con los datos de los sondeos de investigación y datos inclinométricos permite obtener las siguientes conclusiones:

- Los trabajos de investigación llevados a cabo mediante T.E. han permitido definir la estructura interna de los materiales que componen los depósitos de ladera así como la posición del basamento inalterado.
- Los perfiles de investigación se han hecho discurrir en su trazado por diversos sondeos de investigación existentes en la zona de estudio lo cual ha permitido emplearlos con carácter paramétrico.
- Desde el punto de vista geofísico se han diferenciado un total de cuatro materiales, tres correspondientes a los depósitos de ladera y uno correspondiente al sustrato rocoso. Los depósitos de ladera en la zona se dividen en una capa superior (D1) de naturaleza conductora con valores inferiores a los 50 Ohm·m, una intermedia de carácter más resistivo (D2), de 50 a 300 Ohm·m y una basal (D3), apoyado sobre el basamento y de naturaleza conductora (< 50 Ohm·m).
- La diferenciación geoelectrica entre las capas conductoras D1-D3 y D2 responde a la naturaleza de los materiales que componen dichas capas. En el caso de las capas D1 y D3 parecen estar constituidas por materiales predominantemente arcillosos mientras que en el caso de la capa D2, deben abundar los cantos y bloques de materiales pizarrosos y cuarcíticos incrementando la resistividad. Los datos de los sondeos paramétricos parecen corroborar esta hipótesis.
- El sustrato rocoso se aprecia en los tres perfiles de investigación.
- El análisis conjunto de los resultados TE y registros inclinométricos parece indicar que los movimientos principales detectados se asocian al techo de la capa resistiva D2.

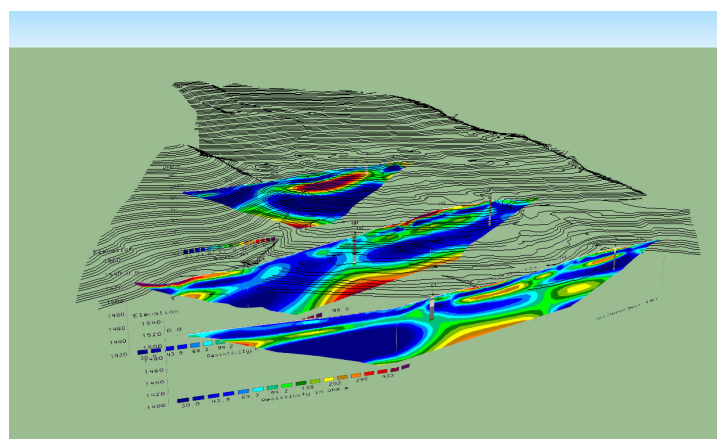


Figura 202. Modelo 3D de la zona de estudio (Software Sketchup)



6.- PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE MEDIANO (HUESCA) Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

6.1.- Introducción y objetivos

El presente trabajo surge ante la necesidad de utilizar técnicas geofísicas que permitan una aproximación a las filtraciones existentes en el estribo derecho de la presa de Mediano (Huesca), de forma que en un futuro próximo tales filtraciones puedan ser controladas y remediadas mediante inyecciones.

La presa del embalse de Mediano fue terminada de construir en el año 1959, si bien, ha sido objeto de un recrecimiento en el año 1974. El embalse recoge las aguas de los ríos Cinca y Ara, que desembocan en la cola del embalse, cerca de Ainsa.

Tras el recrecimiento de la presa, y ante los nuevos niveles de embalse, han aparecido filtraciones asociadas al contacto entre el recrecimiento y la vieja presa, y a la existencia de afloramientos carbonatados diaclasados que son alcanzados por los nuevos niveles de embalse y no se hallan correctamente revestidos.

Hasta el momento, las medidas correctoras para las filtraciones han consistido en crear un sistema de encauzado de las mismas a través de las galerías de la presa, siendo recogidas todas ellas por una canalización que termina finalmente en la margen derecha aguas debajo de la presa. También se han llevado a cabo una serie de inyecciones en el estribo de la margen derecha de la presa, las cuales parecen haber reducido considerablemente el volumen de filtraciones.

El objetivo final de este trabajo es analizar desde una perspectiva hidrogeológica la situación actual del estribo derecho, y llevar a cabo una serie de prospecciones geofísicas que permitan “afinar” las actuaciones futuras que se lleven a cabo, optimizando de esta manera la eficacia de las mismas, y consiguiendo la eliminación mayoritaria o total de las filtraciones.

6.2.- Marco geológico e hidrogeológico

El embalse de Mediano se halla sobre materiales terciarios paleógenos correspondientes a la denominada cuenca de Graus-Tremp (Eoceno medio-superior).

Esta cuenca forma parte –junto con la cuenca de Jaca- de lo que se denomina “Unidad Surpirenaica Central”: se trata de cuencas independizadas por el frente cabalgante surpirenaico, el cual tiene orientación ONO-ESE, asociándose al mismo estructuras con la misma orientación.

Curiosamente, en estas cuencas aparecen estructuras transversales compresivas (pliegues) de orientación N-S, una de las cuales corresponde al anticlinal de Mediano. Según algunos artículos¹⁷, el desarrollo de estas estructuras fue parejo a la sedimentación eocena en el surco surpirenaico.

¹⁷ *Geometría y cinemática de las estructuras Norte-Sur de la cuenca de Ainsa*. R. Soto y A.M. Casas. Rev. Soc. Geol. España (2001).

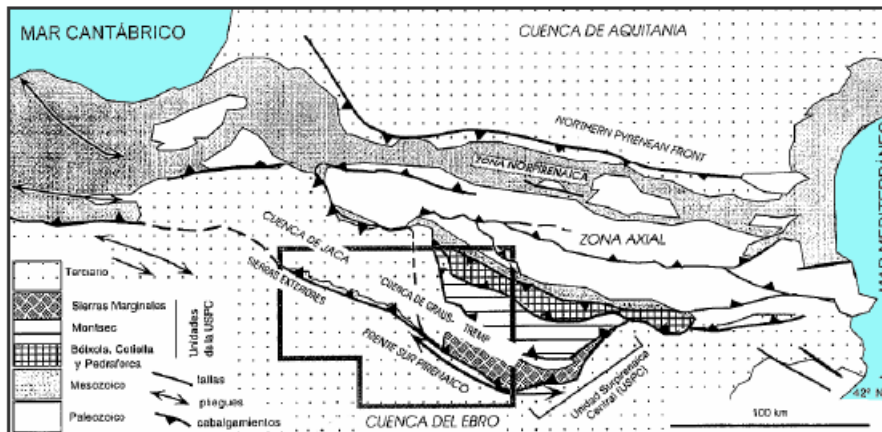


Figura 203. Unidad Surpirenaica Central (tomado de R. Soto y A.M. Casas, 2001)

El embalse de Mediano se ubica sobre los materiales de la cuenca de Graus-Tremp, y dentro de una pequeña subcuenca independizada por las estructuras transversales anteriormente citadas, denominada “Cuenca de Aínsa”.

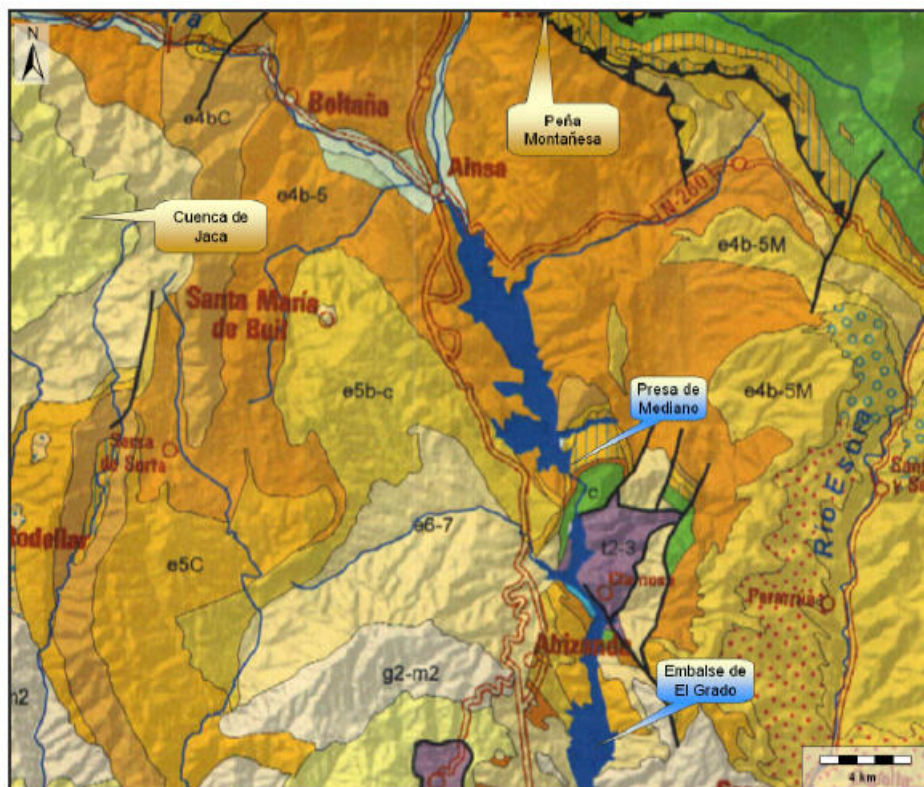


Figura 204. Geología de la cuenca de Aínsa (Fuente: Mapa geológico de los Pirineos, IGME)



Desde el punto de vista estructural, el embalse se apoya sobre el flanco Oeste del anticlinal de Mediano y sobre el flanco Este de una gran estructura sinclinal conocida como el Sinclinal de Santa M^a de Buil.

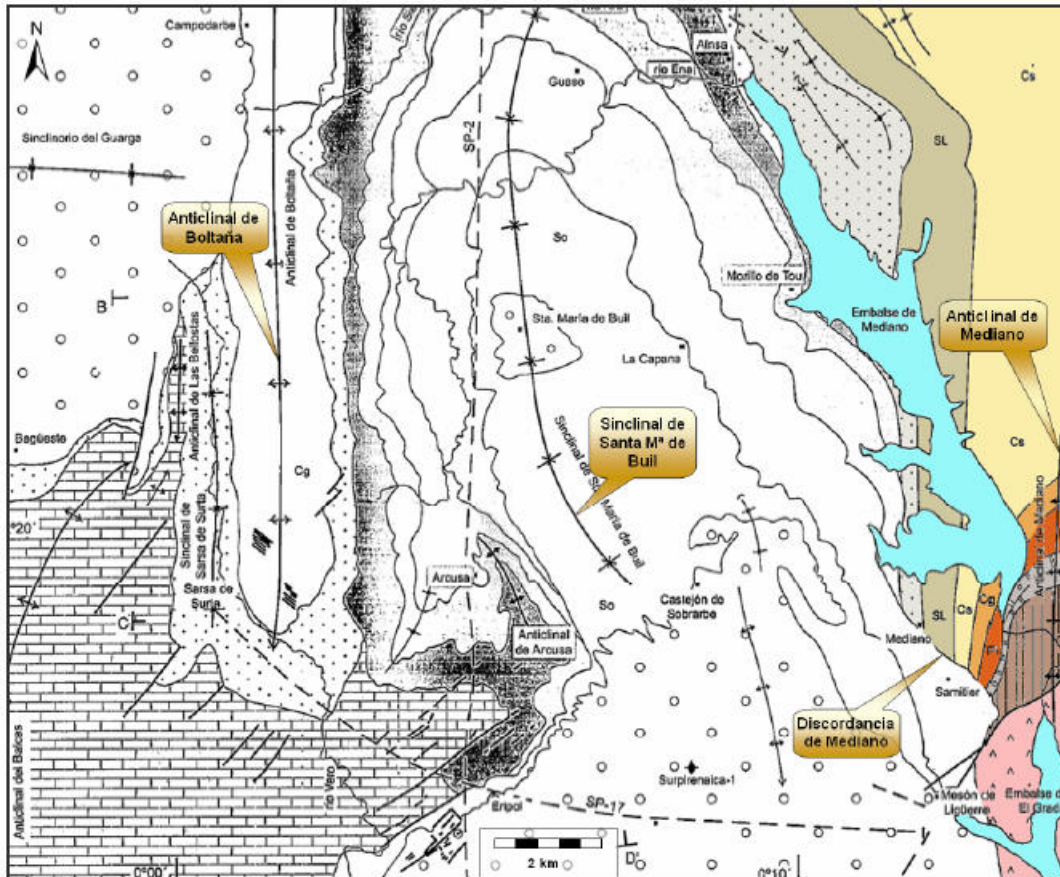


Figura 205. Estructuras de orientación N-S en la cuenca de Aínsa (tomado de R. Soto y A.M. Casas, 2001)

Desde un punto de vista litoestratigráfico, se trata de un conjunto de materiales que corresponden a sedimentos de plataforma somera que van evolucionando hacia techo a sedimentos de talud y finalmente turbiditas.

En el sector objeto del estudio, y aunque en la zona afloran materiales antiguos (triásicos y jurásicos), en el entorno inmediato de la presa de Mediano la secuencia deposicional es de edad eocena, y sería la siguiente (de muro a techo):

- Calizas de alveolinas de edad Ilerdiense; constituyen la base de los depósitos eocenos. Se trata de unas calizas potentes, que generan un relieve abrupto que domina el paisaje.
- Sobre las calizas de alveolinas, se deposita una serie de plataforma que lateralmente pasa a facies transicionales y de talud, y sistemas turbidíticos más profundos hacia el Oeste. Se trata de un conjunto de materiales margosos y arcillosos de edad Cuisiense y Luteciense, que son denominados “alogramos” (destacados en la figura anterior):



- Alogrupo Fígols (Fi) o formación Margas de Yeba. Este alogrupo genera morfológicamente un marcado valle, debido a su naturaleza margosa.
- Alogrupo Castigaleu (Cg), formación Guara o calizas de Boltaña. Este alogrupo genera un relieve escarpado (no tanto como la formación Calizas con Alveolinas), debido a su naturaleza carbonatada.
- Alogrupo Castisent (Cs). Se trata de materiales margo-arcillosos que generan zonas deprimidas.
- Alogrupo Santa Liestra (SL) de edad Luteciense. También se trata de materiales margo-arcillosos.

Estos son todos los materiales aflorantes en el entorno inmediato de la Presa de Mediano, además de depósitos cuaternarios en forma de colusiones asociados al importante relieve existente.

En las siguientes figuras se muestran cortes que ayudan a comprender la disposición estructural de las formaciones descritas.

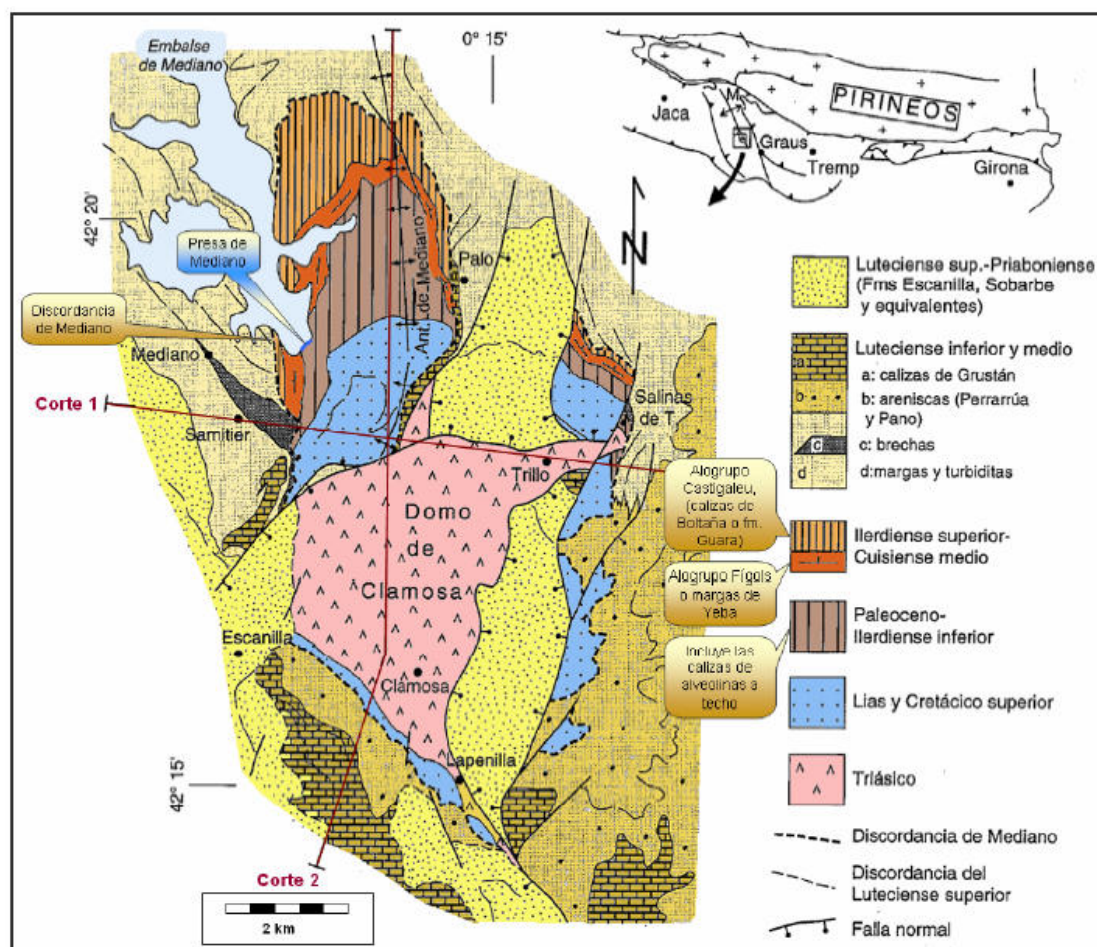


Figura 206. Geología del entorno de la presa de Mediano (modificado de A. Teixell y A. Barnolas, 1995)

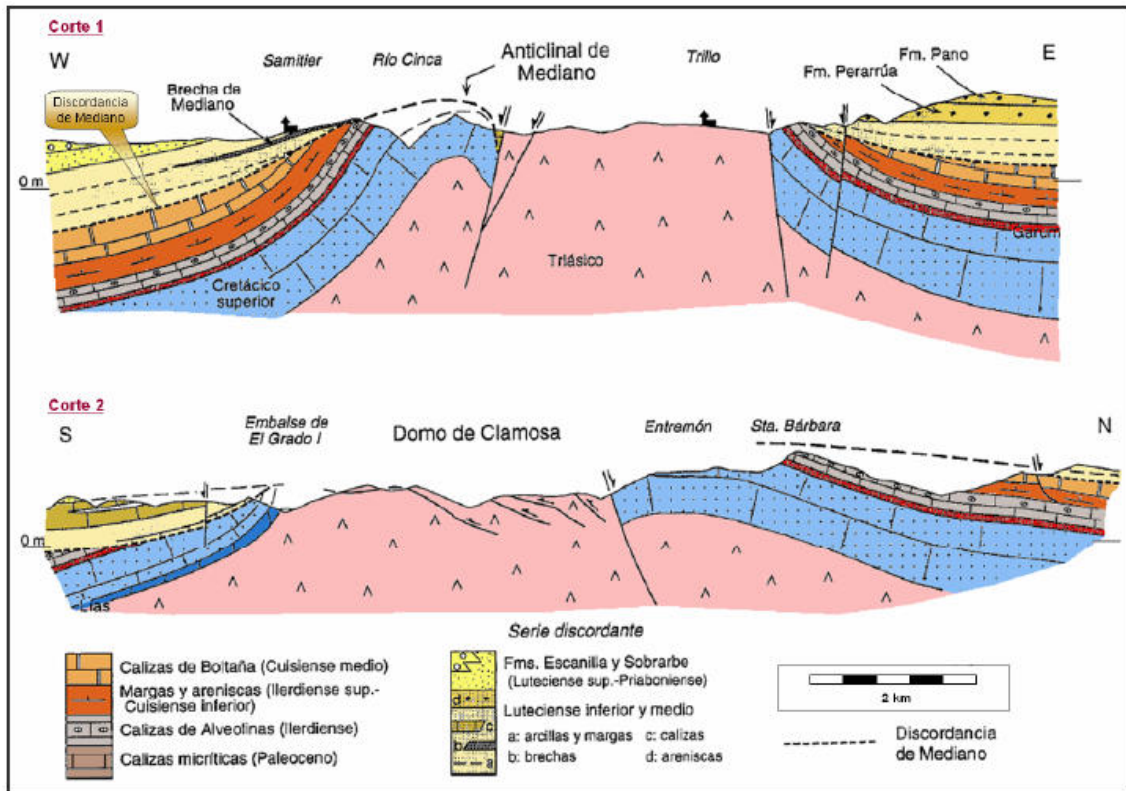


Figura 207. Cortes geológicos (modificado de A. Teixell y A. Barnolas, 1995)

Desde un punto de vista hidrogeológico, la zona se enclava en lo que se denomina “Dominio del Sinclinal de Tremp”, dentro de la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

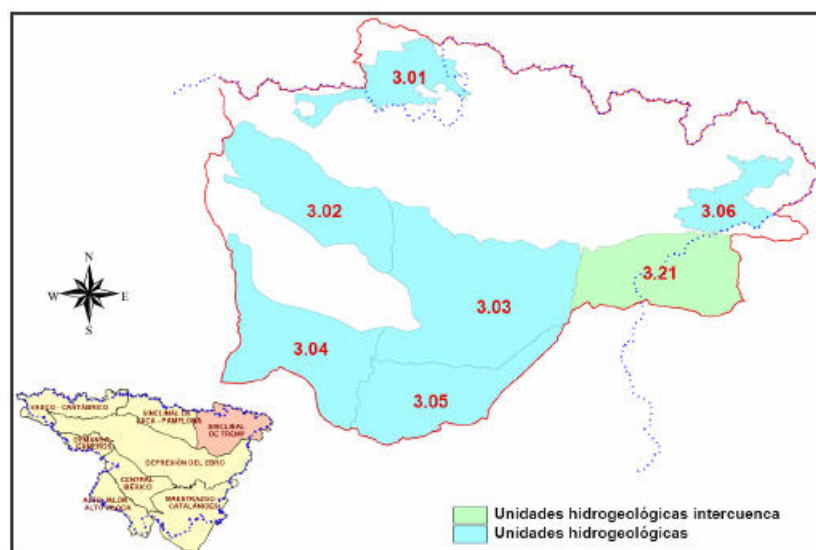


Figura 208. Dominio del Sinclinal de Tremp (CHE)



Dentro del Dominio del Sinclinal de Tresp, se ha delimitado como Unidad Hidrogeológica únicamente la margen izquierda del embalse de Mediano, quedando incluida en la Unidad Hidrogeológica de Litera Alta (UH 03.04). En esta unidad, se identifican 4 acuíferos, de los cuales solo 1 podría tener relación con el embalse de Mediano (calizas de alveolinas):

- Dolomías del Muschelkalk.
- Calizas y dolomías del Cretácico Superior.
- Calizas y margas del Eoceno inferior, entre las cuales están las calizas de alveolinas.
- Cuaternarios.

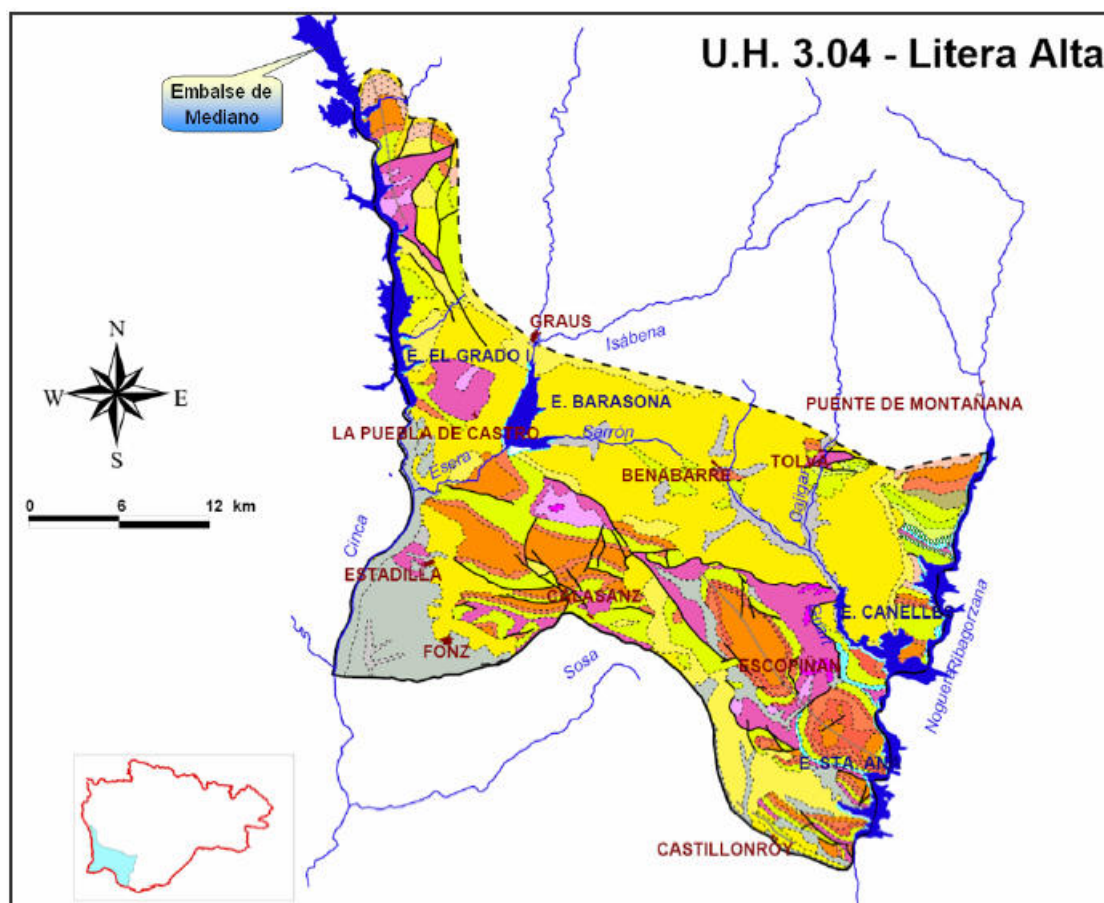


Figura 209. UHH Litera Alta (CHE)

Posteriormente, se ha establecido una nueva delimitación de Masas de Agua Subterránea, si bien apenas existen cambios en los límites de la antigua Unidad Hidrogeológica:

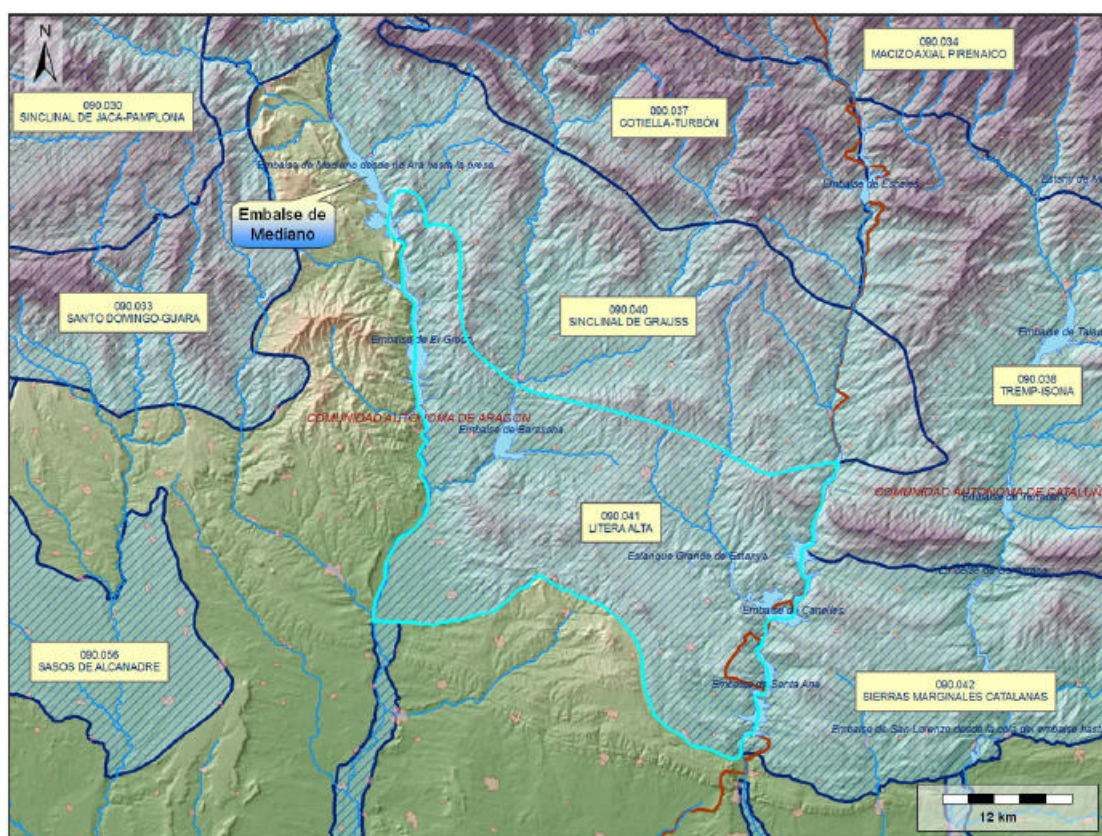


Figura 210. MAS Litera Alta (090.041)

Como se puede observar en la figura anterior, solo se considera Masa de Agua Subterránea la margen izquierda del embalse de Mediano, perteneciendo la cola del embalse a la MAS 090.040 (Sinclinal de Grauss) y la presa a la MAS 090.041 (Litera Alta). Toda la margen derecha del embalse de Mediano es considerado como acuífero de escaso interés (no hay MAS delimitada).

La MAS de Litera Alta presenta como acuífero más importante las calizas y dolomías del Cretácico Superior, al cual se asocian las descargas más importantes de la zona. Se destaca otro acuífero –de mucha menor entidad- asociado a los materiales eocenos, y se cita que el análisis de su comportamiento en descargas y piezómetros controlados infiere un marcado carácter cárstico, con un drenaje rápido a través de conductos preferentes, y una baja porosidad eficaz del macizo rocoso.

La presa de Mediano se halla únicamente sobre materiales de edad eocena, por lo que el análisis geológico e hidrogeológico de detalle se circunscribirá a estos materiales, en los cuales tiene lugar la fenomenología objeto del presente trabajo.

6.3.- Reconocimiento geológico de detalle

En el mes de junio de 2011, se llevó a cabo una campaña de reconocimiento con objeto de analizar la situación actual de la presa, sus filtraciones e inyecciones realizadas, la estructura geológica de la cerrada, y definir la ubicación óptima de prospecciones geofísicas.

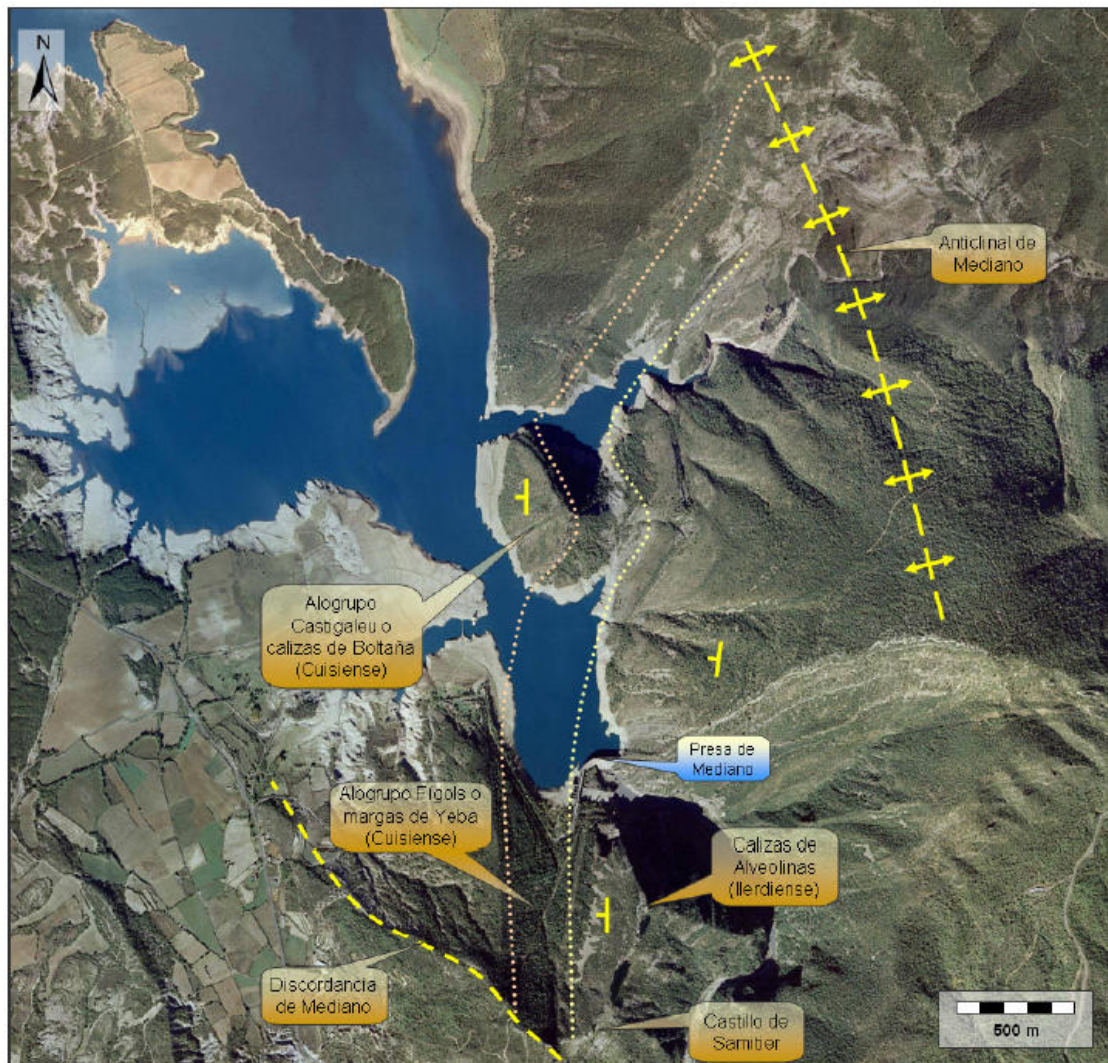


Figura 211. Principales contactos y orientaciones de formaciones en el entorno de la presa de Mediano

Tras un análisis previo, se comprueba que la cerrada de la presa se sitúa apoyada sobre materiales carbonatados, anclándose ambos estribos sobre los citados materiales, que corresponden a las calizas de alveolinas de edad Ilerdiense (Eoceno inferior). El estribo izquierdo se apoya sobre las calizas de alveolinas de forma casi ortogonal (casi según su línea de máxima pendiente), mientras que el apoyo del estribo derecho es subparalelo a la capa.

Esta disposición hace que la probabilidad de existencia de filtraciones sea mucho mayor en el estribo derecho que en el izquierdo:

- La existencia de diaclasas o fracturas orientadas según la línea de máxima pendiente (buzamiento) es mucho menor que la de sistemas oblicuos o de orientación paralela al eje de pliegue.
- El estribo derecho, al estar apoyado de forma subparalela a la capa de calizas de alveolinas, atraviesa todo su sistema de diaclasado.

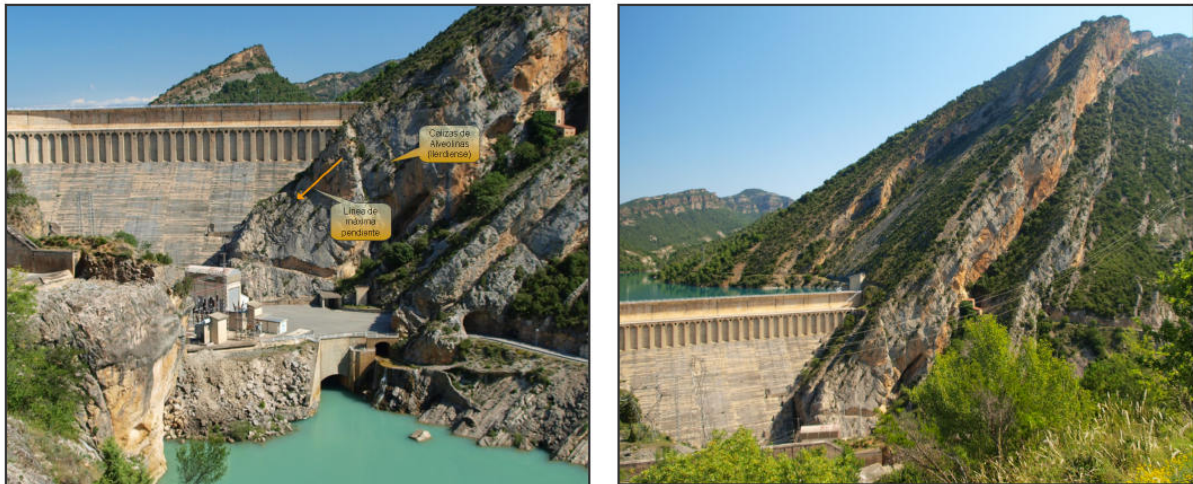


Imagen 21. Detalles del apoyo del estribo izquierdo de la Presa de Mediano

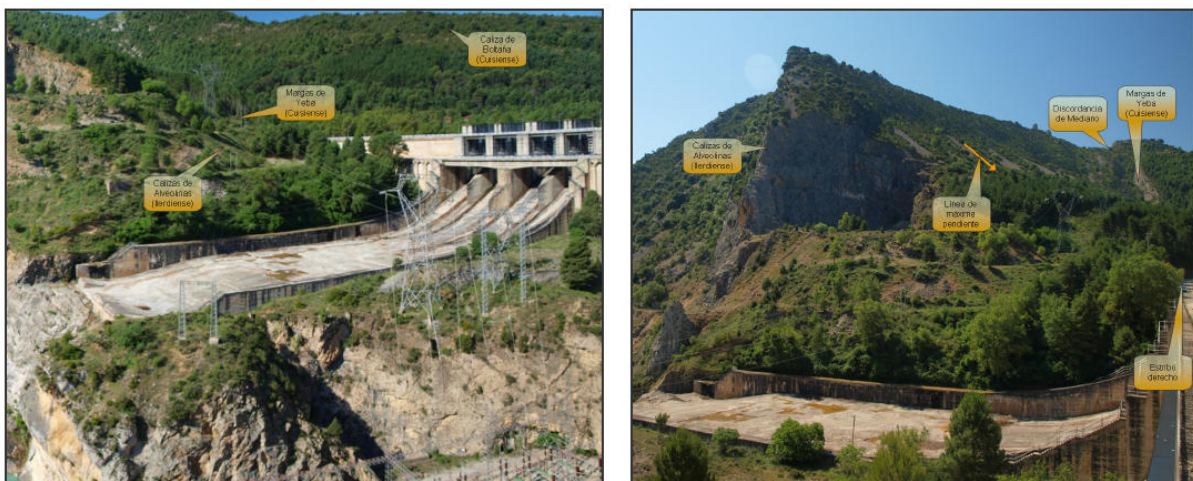


Imagen 22. Detalles del apoyo del estribo derecho de la Presa de Mediano

En general, la caliza de alveolinas se muestra muy poco tectonizada, sana y sin excesivos síntomas de karstificación, los cuales, si existen, aparecen asociados a intercalaciones menos competentes en la caliza, y raramente en diaclasas.



Imagen 23. Fenómenos de karstificación en la caliza de alveolinas

La caliza de alveolinas se encuentra muy recristalizada y con abundante fauna de alveolínidos.



Imagen 24. Detalle de la textura de la caliza de alveolinas del estribo izquierdo de la presa



Dentro de la caliza, se han encontrado niveles o alternancias margo-arcillosas de espesor centimétrico, que afloran claramente bajo la cantera existente en el estribo derecho de la presa.



Imagen 25. Intercalaciones en la caliza de alveolinas

Desde el punto de vista hidrogeológico, se detecta la presencia de dos fenómenos cuyo grado de influencia se analizará posteriormente:

a. Dos sistemas de diaclasas bastante marcados, sobre todo en el estribo derecho de la presa. El primer sistema corresponde a diaclasas de orientación $50/32^{18}$. Este sistema es atravesado por otro sistema de diaclasas de orientación $170/48$.

b. Un sistema de grandes fracturas que muestra una orientación casi constante de 65° (línea de máxima pendiente), aunque sus planos muestran importante alabeo. Este sistema de fracturas, que se halla presente bajo el final del aliviadero y en la cantera, parecen jugar un papel importante en la génesis de la cerrada, pero no en la problemática de las filtraciones (al menos a primera vista).

¹⁸ Se indica la orientación del buzamiento o línea de máxima pendiente (50° con respecto al Norte, 32° de inclinación con respecto al plano horizontal).



Figura 212. Orientaciones de los principales sistemas de diaclasas (D) y fracturas (F), así como de capas (en naranja)

Como ya se ha citado, llama la atención el sistema de fracturas existente, debido a su vistosidad. Se han visitado los planos de fractura con objeto de examinar la limpieza del contacto y la posibilidad de existencia de zonas de flujo preferente, al tratarse de zonas de debilidad.

En el entorno de la cantera, las fracturas (2 visibles) muestran brecha de falla, aunque esta se halla totalmente cementada y el plano de fractura se halla totalmente limpio.



Imagen 26. Plano de falla y brecha en la cantera

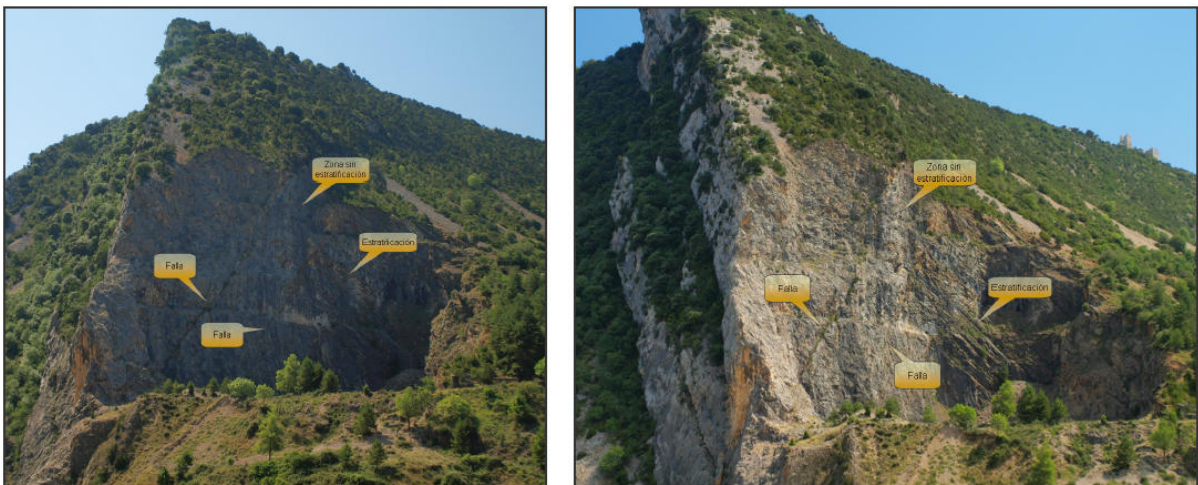


Imagen 27. Fracturas en la cantera

Por debajo de la cantera, las fracturas muestran grandes superficies (planos o espejos de falla), pero en cambio, su desplazamiento aparente no parece ser muy grande.

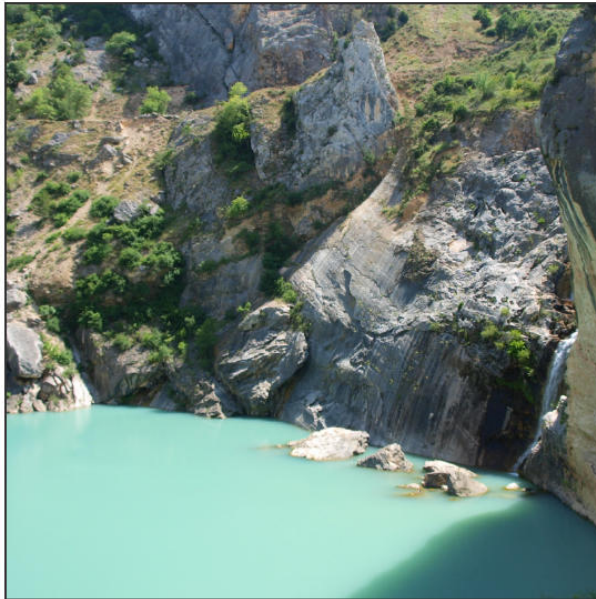


Imagen 28. Planos de falla aguas abajo del aliviadero, en a margen derecha de la presa



Imagen 29. Fractura de desplazamiento mínimo aguas abajo del estribo izquierdo de la presa



Estas fracturas han sido detectadas siempre aguas debajo de la presa, con una orientación esfavorable a posibles filtraciones y con desplazamientos aparentemente pequeños. Es por llo que el papel de estas fracturas en la existencia de filtraciones no parece ser muy mportante.

Otro tema aparte es el diaclasado existente en el entorno próximo al contacto con los ateriales margosos de techo, junto a la caseta que se halla en el estribo derecho de la resa. En este lugar se detecta la existencia de dos familias de diaclasas casi ortogonales, obre las cuales se apoya el estribo de forma subparalela a la capa, y por lo tanto al diaclasado.

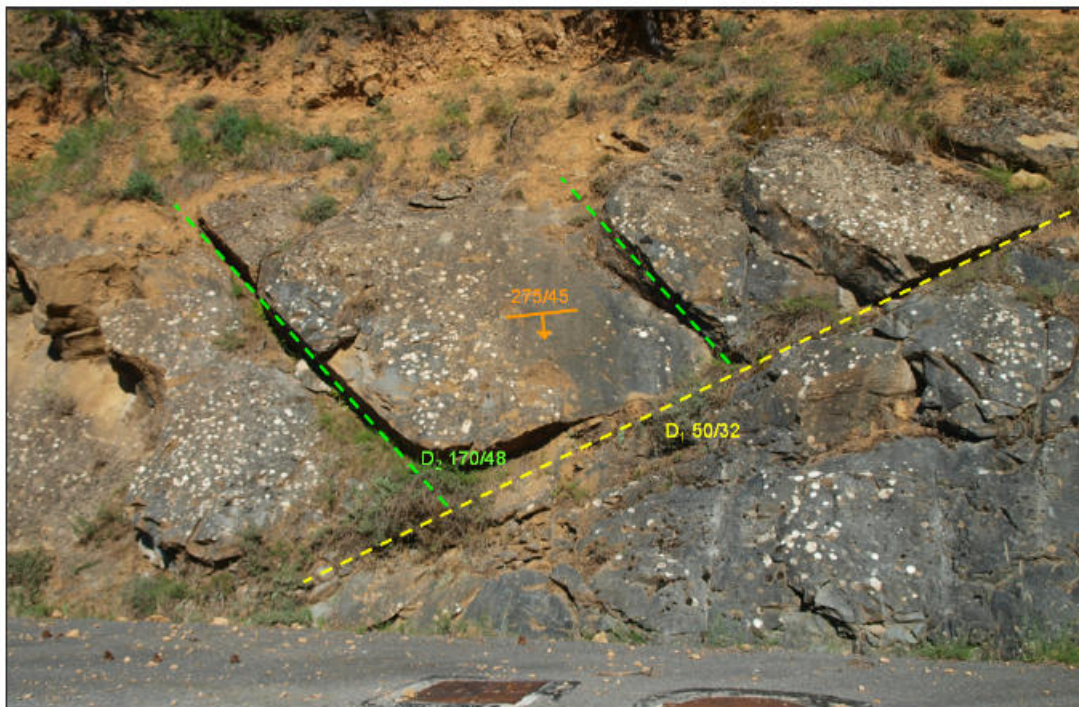


Imagen 30. Familias de diaclasas y buzamiento en el estribo derecho de la presa

De las dos familias, parece que la familia D2 muestra una mayor frecuencia y orientación favorable a la existencia de filtraciones, si bien, no se descarta un papel conjunto de las dos familias.

Por otro lado, hay que destacar la existencia de un contacto litológico muy cerca del estribo derecho de la presa, junto a la caseta que se halla en el lugar. En esta zona, se encuentra el muro de las calizas de alveolinas y se pone en contacto con las margas de Yeba, originándose una zona deprimida (valle) que puede continuarse fácilmente en la otra margen del embalse.

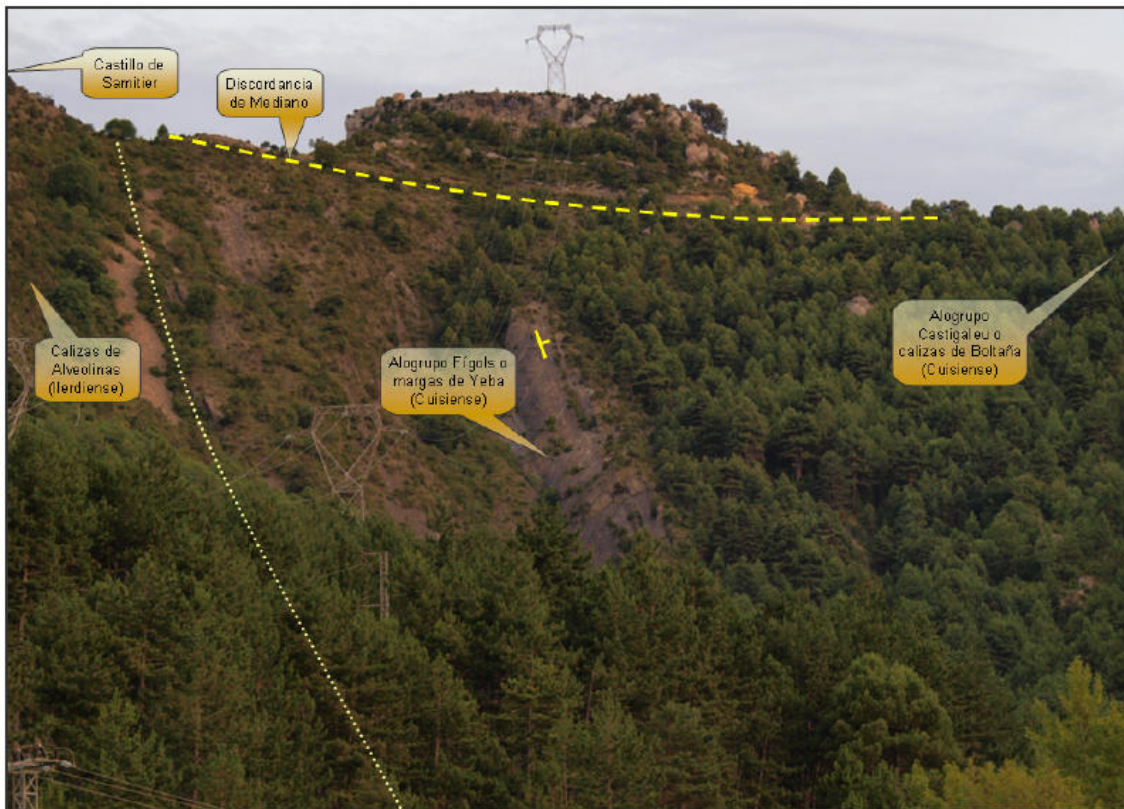


Imagen 31. Contacto entre calizas de alveolinas y margas de Yeba

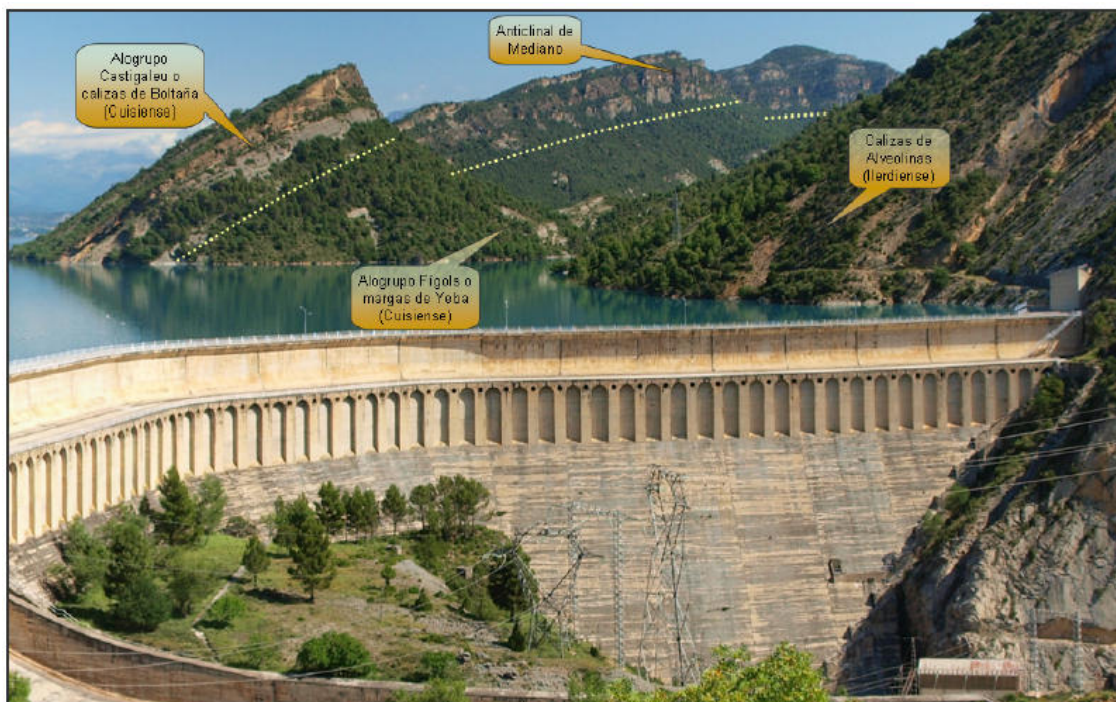


Imagen 32. Contacto entre calizas de alveolinas, margas de Yeba y calizas de Boltaña en la margen izquierda del embalse



El papel que juega este contacto, dada su proximidad al estribo derecho de la presa, debe ser tenido en cuenta, por su posible influencia en las filtraciones.

6.4.- Análisis de las filtraciones

Actualmente, se están produciendo filtraciones en el estribo derecho de la presa, las cuales se producen, aparentemente, a partir del último punto en el que se han realizado inyecciones.

Se ha visitado el sistema de galerías de la presa, y en su interior se puede apreciar que:

- Existen abundantes indicios de antiguas filtraciones que han tenido lugar en el contacto presa-recrecimiento. Estas filtraciones han producido espectaculares precipitados, y en su mayoría se hallan selladas.



Imagen 33. Precipitados en las galerías interiores de la presa

- Existen filtraciones que tienen lugar a través de la propia pared de la presa, aunque suelen ser de escasa entidad.



Imagen 34. Filtración a través del revestimiento

- Parece que la mayor parte de las filtraciones tienen lugar a través del macizo rocoso no inyectado, cuando la lámina de agua se halla a una determinada cota.



Imagen 35. Encauzamiento de filtraciones.

Aunque no se han podido obtener los datos correspondientes a controles de caudales, lámina de embalse, precipitaciones y niveles piezométricos, en los gráficos existentes se pueden apreciar algunos aspectos interesantes sobre la dinámica de las filtraciones:

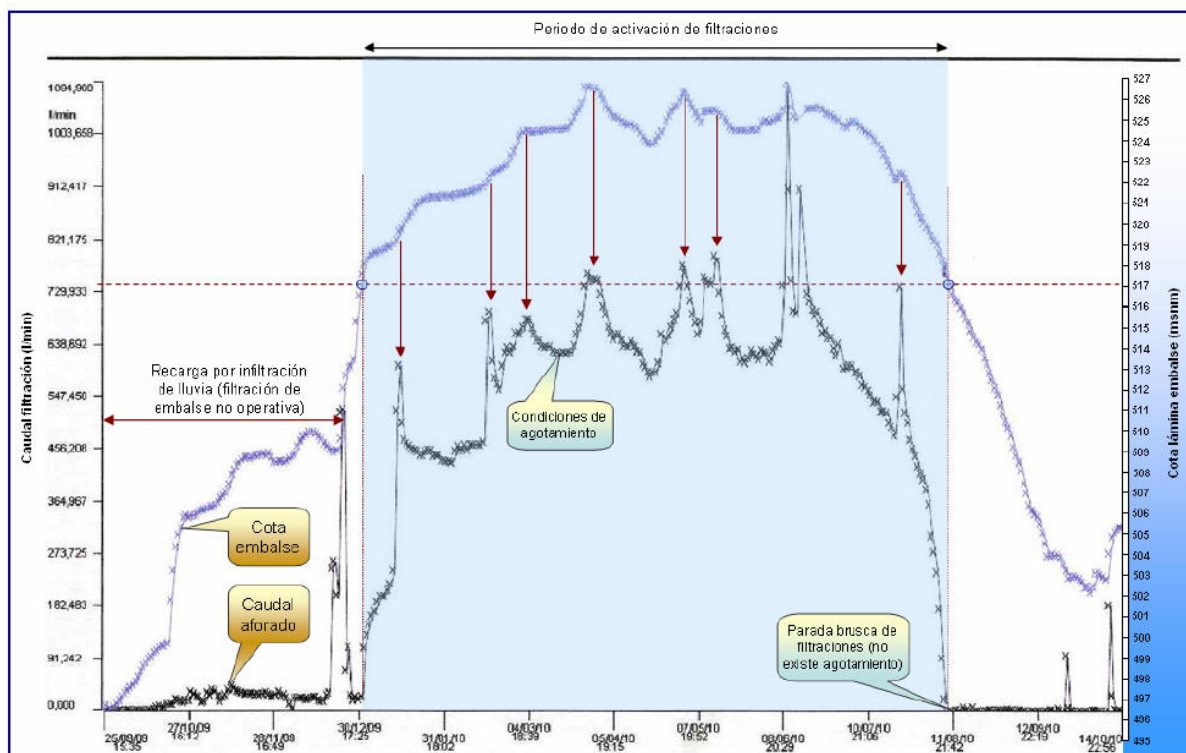


Figura 213. Relación entre filtraciones y cota de lámina de embalse.



En la figura anterior, se puede observar que:

- Se aprecia que existe un nivel de base en el caudal aforado, cuya evolución es independiente del ascenso de la lámina de agua en el embalse. Este caudal aforado, se debe relacionar con una recarga natural, por infiltración de agua de lluvia.
- A partir de la cota de lámina de embalse 517 msnm (aproximada), los caudales aforados aumentan rápidamente con el aumento de lámina de embalse.
- Se puede apreciar una elevada correlación entre los máximos de la lámina de embalse y los máximos de caudal aforados.
- En ciertos momentos, se pueden apreciar descensos en el caudal de los caudales aforados, mientras que la cota de la lámina de embalse se mantiene constante e incluso asciende. Este fenómeno podría explicarse, por la existencia de una recarga adicional procedente de la infiltración de agua de lluvia (corroborable con información piezométrica y pluviométrica).
- Las filtraciones terminan de forma brusca, lo cual indica, junto con la inexistencia de desfase, un funcionamiento de flujo a través de conductos preferentes.

Todo el caudal es encauzado y dirigido por el lateral derecho del aliviadero hasta ser evacuado aguas abajo del mismo (previo aforo). En ciertos puntos del recorrido se puede observar lo que parecen ser aportes de la ladera (podría tratarse también de reinfiltraciones), que deberían ser comprobados mediante aforos diferenciales y mediciones in situ (conductividad y pH).



Imagen 36. Salida final de filtraciones y aforo.



De acuerdo con estas observaciones, se ha planteado una campaña de prospección geofísica, con objeto de localizar posibles zonas anómalas que puedan servir de zonas de flujo preferente o infiltraciones.

6.5.- Investigaciones geofísicas

En este apartado se detallan los trabajos realizados en la campaña de investigaciones geofísicas efectuadas en el proyecto.

Como parte fundamental del proyecto se han empleado una serie sistemas de investigación geofísica que dadas las características de los mismos, así como de los objetos de estudio permitan obtener los datos necesarios para cumplir los alcances definidos. Dichas tecnologías, así como las localizaciones de aplicación de las mismas han sido:

Para la detección de zonas de filtración, los trabajos comienzan por la ejecución del sistema de Potencial Espontáneo (Fase 1). Este sistema, realiza una investigación areal cubriendo la totalidad de la zona de estudio, indicándonos que zonas presentan anomalías relacionadas con posibles fenómenos de filtración o tensión y por tanto, susceptibles de ser analizadas con un mayor grado de detalle.

Una vez seleccionadas las zonas de interés, estas se analizan mediante los sistemas de Tomografía Eléctrica (T.E.) y Puesta a masa (P.M) (Fase 2), las cuales tratan de localizar, de forma más precisa, la zona por la que se pueden estar produciendo las filtraciones (diaclasas, fracturas y/o huecos kársticos).

Existen otras técnicas de investigación geofísica que suelen emplearse con éxito en la localización de zonas de fractura y oquedades como por ejemplo, la microgravimetría, georradar, sísmica de refracción, etc.. El uso de las mismas dentro del estudio se desestimo debido a los siguientes condicionantes de la zona y objeto de estudio:

- Georradar: La profundidad a la que se emplazan los objetos de interés así como el tamaño y morfología de los mismos supera la capacidad de penetración y resolución de este sistema de investigación. Además de este factor, la superficie agreste del terreno con abundantes irregularidades en ciertos sectores impediría el correcto desplazamiento de las antenas de registro realizando una mala adquisición.
- Microgravimetría. La anomalía gravimétrica generada por los posibles conductos kársticos rellenos de agua de pequeño tamaño a profundidades tan elevadas carece de la intensidad suficiente para permitir su detección. La previsible morfología irregular de este tipo de conductos de morfología no esférica hace que en caso de detección no permitan una interpretación sencilla. Además de estos factores, hemos de tener en cuenta que para la correcta ejecución de esta técnica de investigación es necesario un levantamiento topográfico de gran precisión en la cota del punto de investigación.



- Sísmica de refracción. Técnica de investigación no resolutive en la zona de trabajo al situarse los objetos de interés a demasiada profundidad para su detección debido al cambio lateral en las velocidades de propagación que generan.
- En el caso de sistemas de investigación electromagnéticos, la existencia de líneas de tensión en la zona de estudio impide la aplicación de los mismos debido al alto nivel de interferencias que genera.

6.5.1.- Justificación de los trabajos

El empleo de las técnicas de investigación geofísicas propuestas (P.E., T.E. y P.M.) responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad de los parámetros registrados (campo eléctrico natural, potencial y resistividad) a la existencia de flujos de filtración en el medio rocoso así como a los cambios litológicos y zonas de alteración de los materiales existentes en profundidad.
- Obtención de planos en planta de los potenciales naturales que permitirán la delimitación espacial de las zonas de filtración situadas en profundidad.
- Obtención de perfiles y pseudosecciones bidimensionales de potenciales inducidos (P.M.) que permitirán cartografiar las posibles zonas de filtración y en algunos casos determinar su dirección.
- Obtención de secciones bidimensionales de resistividad que permitirán determinar aspectos tanto estructurales (buzamientos, fracturas, diaclasas, etc.) como cambios litológicos y/u oquedades en la roca debidos a la existencia de fenómenos de karstificación. Estos perfiles bi-dimensionales permitirán cartografiar las posibles zonas de filtración.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente. Los dispositivos a emplear en la TE, así como la longitud de los perfiles y espaciado interelectródico permitirán una alta resolución en la determinación de los valores de resistividad.

6.5.2.- Potencial Espontáneo (PE)

Los trabajos realizados con el sistema de investigación geofísica de P.E., también conocido con “Self-Potencial (SP)”. pretenden localizar las posibles zonas de filtración existentes a lo largo de la zona de estudio de la margen derecha del embalse.

Los trabajos de PE han consistido en la realización de un mallado de investigación que cubre la zona de estudio de la forma mas regular posible. El objetivo del sistema de PE es doble. Por un lado trata de determinar posibles anomalías generadas por el flujo del agua procedente del



embalse a través del medio rocoso y, en base a dichos resultados, situar los perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica (TE) y Puesta a masa (PM) los cuales trataran de investigar con gran detalle, la posición en profundidad de dichas zonas de filtración .

El tratamiento de los datos de PE permite generar un plano en planta con los valores de potencial observados en campo (Figura 214). Dicho plano permite delimitar espacialmente las zonas de anomalía que pueden estar asociadas a fenómenos de filtración.

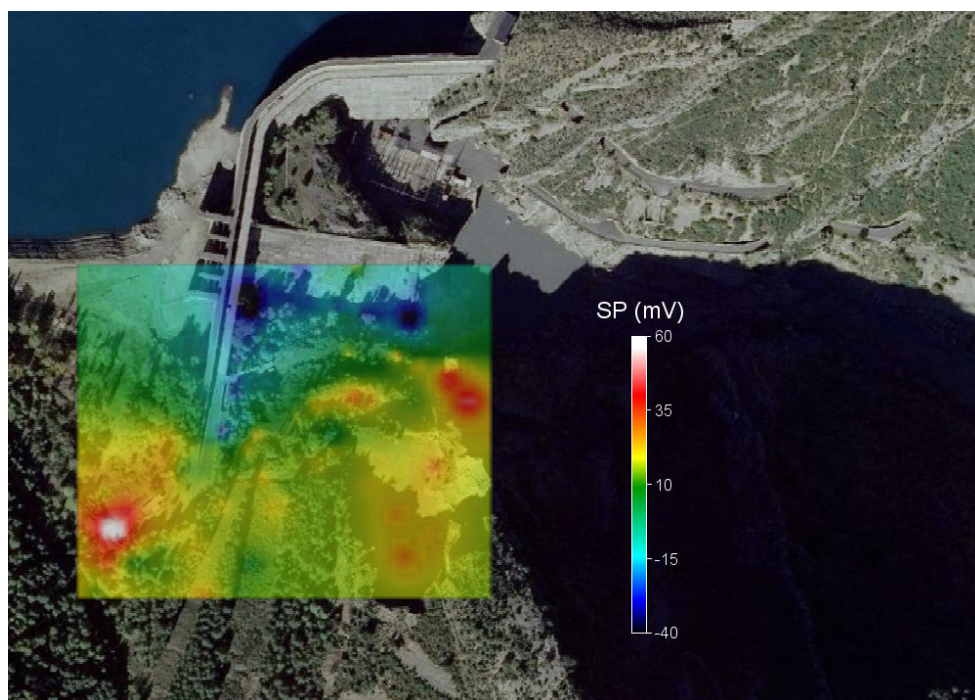


Figura 214. Plano de resultados del Sistema PE (Software surfer).

La Figura 215 muestra los resultados del tratamiento de los puntos de registro del P.E. en la zona de estudio. La delimitación de las zonas de filtración a partir de los datos de P.E. es relativamente sencilla ya que los flujos de filtración suelen generar anomalías de potencial de carácter negativo o positivo.

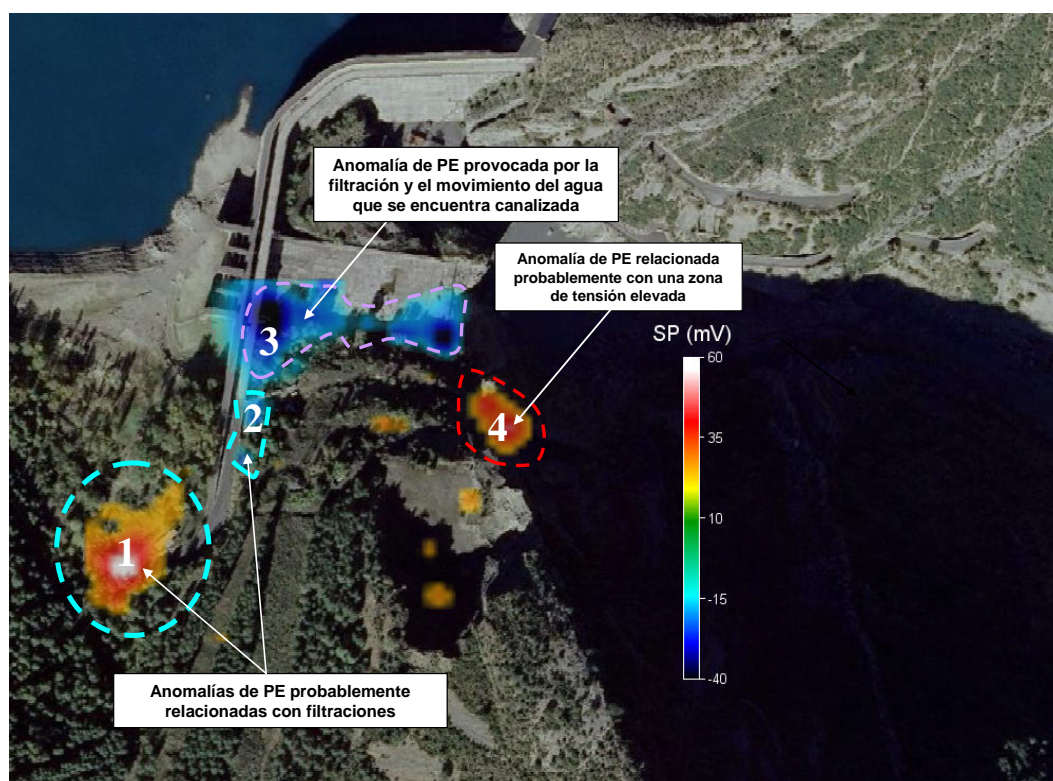


Figura 215. Plano de interpretación de resultados del Sistema PE (Software Surfer).

La zona estudiada con P.E. puede dividirse en cuatro sectores bien diferenciados, anomalías 1, 2, 3 y 4 (Figura 215).

- Anomalía 1. La zona de valores de potencial de carácter positivo situada en la parte suroeste parece indicar, dadas sus características, la existencia de un flujo de filtración ascendente que se dirige desde el embalse hacia la ladera. En detalle, si observamos las características del campo de potencial espontáneo en este punto, podemos ver que la anomalía de PE no tiene continuidad, lo cual puede deberse a que las zonas de filtración se sitúan a una mayor profundidad a medida que penetramos en la ladera, por lo que las anomalías que generan son cada vez más débiles y despreciables.
- Anomalía 2. La zona 2, se caracteriza por presentar valores de potencial de carácter negativo, que muestra un flujo de filtración descendente probablemente debido a problemas constructivos de la presa.
- Anomalía 3. Localizada en la parte norte de la zona de estudio (margen derecha), presenta un carácter lineal de dirección prácticamente oeste – este. Esta anomalía de caracteres negativo es provocada por las filtración y el movimiento del agua que esta canalizada por lo que carece de importancia.
- Anomalía 4. Existen otros mecanismos en la naturaleza que pueden generar anomalías de potencial, como zonas de oxidación – reducción, presencia de menas metálicas, zonas de tensión etc. Esta zona de potencial de carácter positivo, parece referirse a una zona de tensión debida a la fractura que se localiza en ese lugar. No obstante en un estudio de estas características los resultados del sistema P.E. se consideran siempre como



indicadores de posibles zonas de filtración, los cuales han de ser siempre comprobados con otras técnicas de investigación.

A partir de estos resultados se ha dispuesto la traza de algunos de los perfiles de investigación de T.E. y P.M. teniendo en cuenta además los resultados de la revisión cartográfica. La posición final de los perfiles de investigación se muestra en Figura 216.

6.5.3.- Tomografía Eléctrica (TE)

La campaña de campo realizada con el sistema de Tomografía Eléctrica (T.E.) ha consistido en la realización de un total de 2.115 ml. de tomografía eléctrica distribuidos en 8 perfiles de investigación. El espaciado interelectródico empleado, dados los condicionantes de penetración necesarios, ha sido de 6 m exceptuando el caso del perfil de investigación nº8, el cual presenta un espaciado interelectródico de 3 m.

Los perfiles quedaron georeferenciados en coordenadas UTM (WGS 84), mostrando su origen y final, de acuerdo con lo expresado en la tabla 9 adjunta.

| Nº DE PERFIL | X | Y |
|--------------|--------|---------|
| PE-1. Inicio | 764512 | 4689547 |
| PE-1. Final | 764635 | 4689316 |
| PE 2. Inicio | 764689 | 4689650 |
| PE-2. Final | 764573 | 4689460 |
| PE 3. Inicio | 764631 | 4689425 |
| PE-3. Final | 764869 | 4689521 |
| PE 4. Inicio | 764693 | 4689620 |
| PE-4. Final | 764705 | 4689353 |
| PE 5. Inicio | 764770 | 4689620 |
| PE-5. Final | 764839 | 4689438 |
| PE 6. Inicio | 764680 | 4689653 |
| PE-6. Final | 764540 | 4689451 |
| PE 7. Inicio | 764695 | 4689571 |
| PE-7. Final | 764953 | 4689535 |
| PE 8. Inicio | 764686 | 4689657 |
| PE-8. Final | 764825 | 4689644 |

Tabla 9. Coordenadas UTM de los perfiles de TE y PM

La posición de los perfiles de investigación puede verse en la imagen (Figura 216).

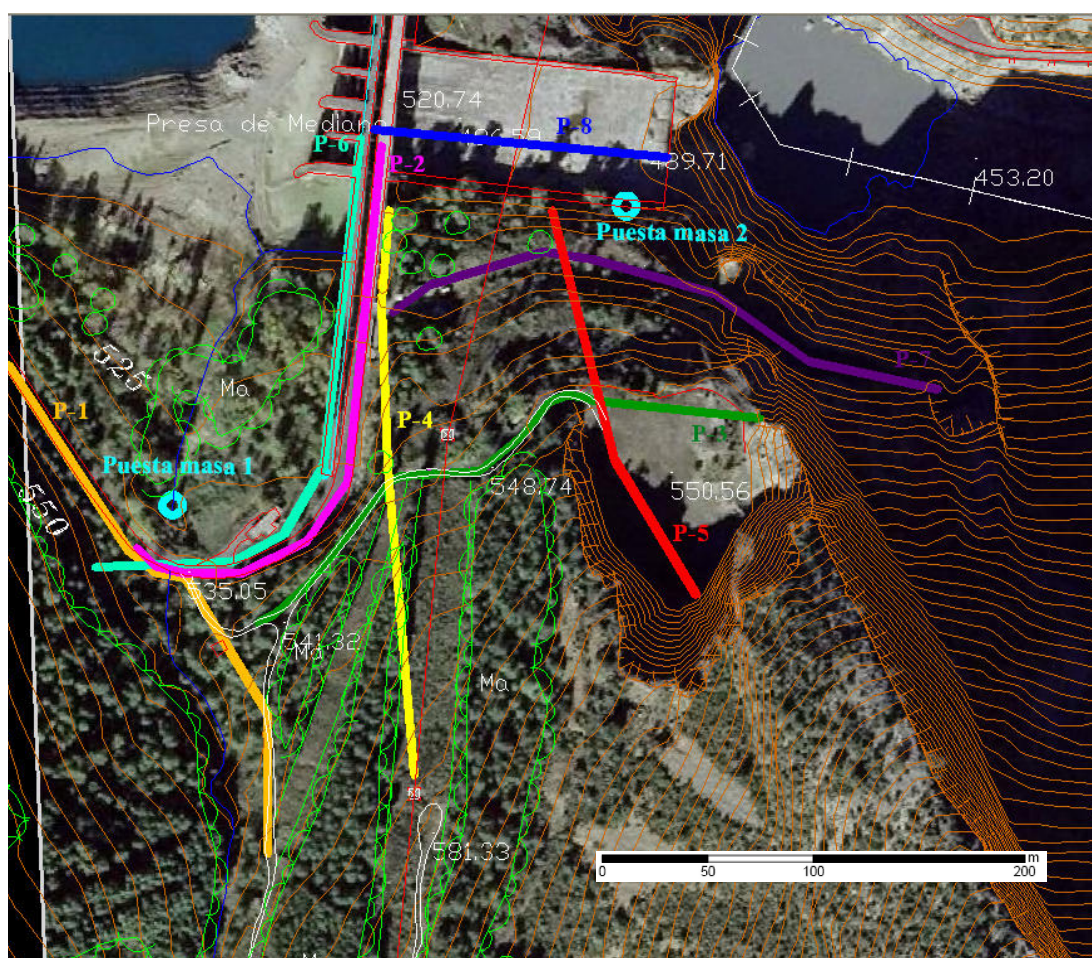


Figura 216. Posición de los perfiles de investigación TE realizados y PM en la zona de estudio

El objetivo de los perfiles de investigación ha sido la obtención de secciones bidimensionales de resistividad de los materiales del subsuelo permitiendo hacer diferenciaciones litológicas y en caso de interpretación conjunta con los resultados del P.M, localizar zonas alteración y/o flujo dentro de los materiales del subsuelo. Por este motivo, la interpretación de los perfiles de investigación T.E. no se realiza en este apartado, sino de forma conjunta con los resultados de PM a continuación.

6.5.4.- Puesta Masa (PM)

El empleo de la técnica de Puesta a masa (P.M.) tiene como objetivo en este estudio el servir de apoyo a la localización de posibles zonas de filtración a través de los materiales que conforman el estribo derecho de la presa predefinidas por los resultados del sistema P.E. Para un mayor detalle y aumento de la cantidad de datos se han utilizado dos fuentes diferentes de potencial denominadas “Puesta masa 1” y “Puesta masa 2” que puede localizarse su situación en la figura 216.



La “Puesta masa 1” fue colocada dentro del embalse con el objeto de localizar los flujos de agua en sus inmediaciones. Las “Puesta de masa 2” fue situada a la salida de las filtraciones que se encuentran canalizas con el objeto de localizar sus orígenes.

El tratamiento de los datos de PM permite generar perfiles y pseudosecciones con los valores de potencial observados en campo. Dichos perfiles y pseudosecciones permite delimitar espacialmente las zonas de anomalía que pueden estar asociadas a fenómenos de filtración y en algunos caos, incluso determinar la dirección de las filtraciones.

En el caso del sistema P.M. las anomalías de potencial se asocian a la existencia de fenómenos de filtración a través del medio.

Los trabajos han consistido en la realización de un total de ocho perfiles de investigación (Tabla 9 y Figura 216). Dadas las características y metodología de la toma de datos, los perfiles realizados son coincidentes con los perfiles de Tomografía Eléctrica ejecutados en el proyecto.

Se describen a continuación los resultados de forma conjunta, obtenidos en los perfiles de investigación de T.E y P.M.



6.5.5.- Interpretación conjunto de los perfiles de TE y medias de PM

PERFIL DE INVESTIGACIÓN 1

El perfil de investigación TE -1 y PM (Figuras 217, 218 y 219), presenta una longitud de 282 m y discurre con dirección NO - SE. La traza del mismo tiene por objeto confirmar el contacto entre calizas de alveolinas y margas de Yeba que se interpretó en el reconocimiento geológico de campo.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 217. El contacto entre las calizas y las margas se encuentra entorno al metro 156 del perfil de investigación.

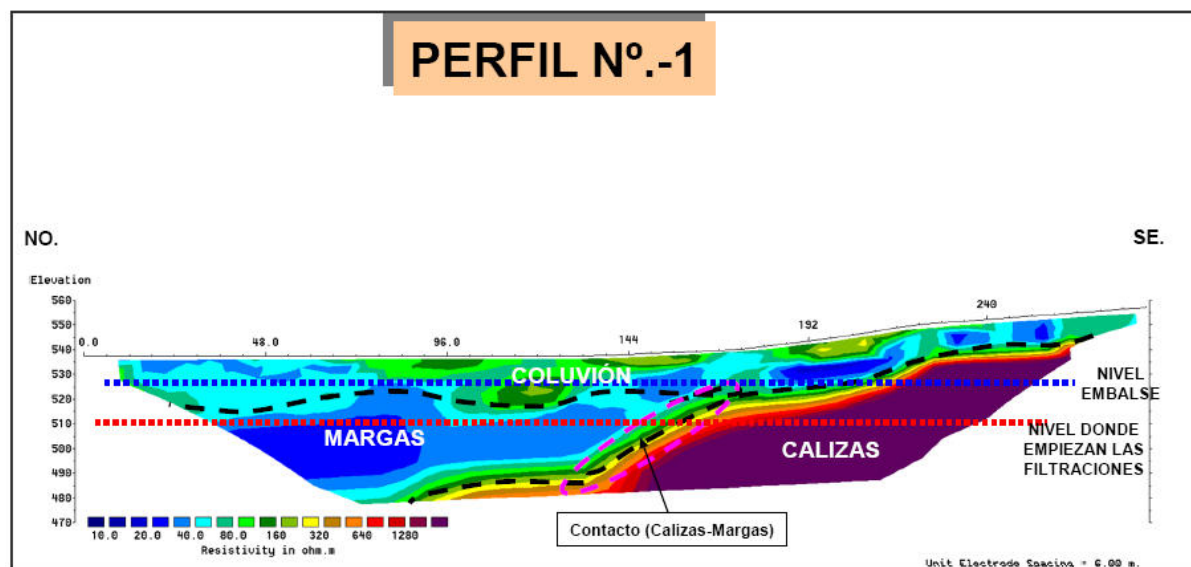


Figura 217. Perfil de Investigación TE-1

En cuanto a la PM, en las figuras 218 y 219 se encuentran las anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración a través de las calizas y el contacto calizas/margas. Mediante las pseudosecciones de puesta masa se han interpretado las direcciones de filtración.

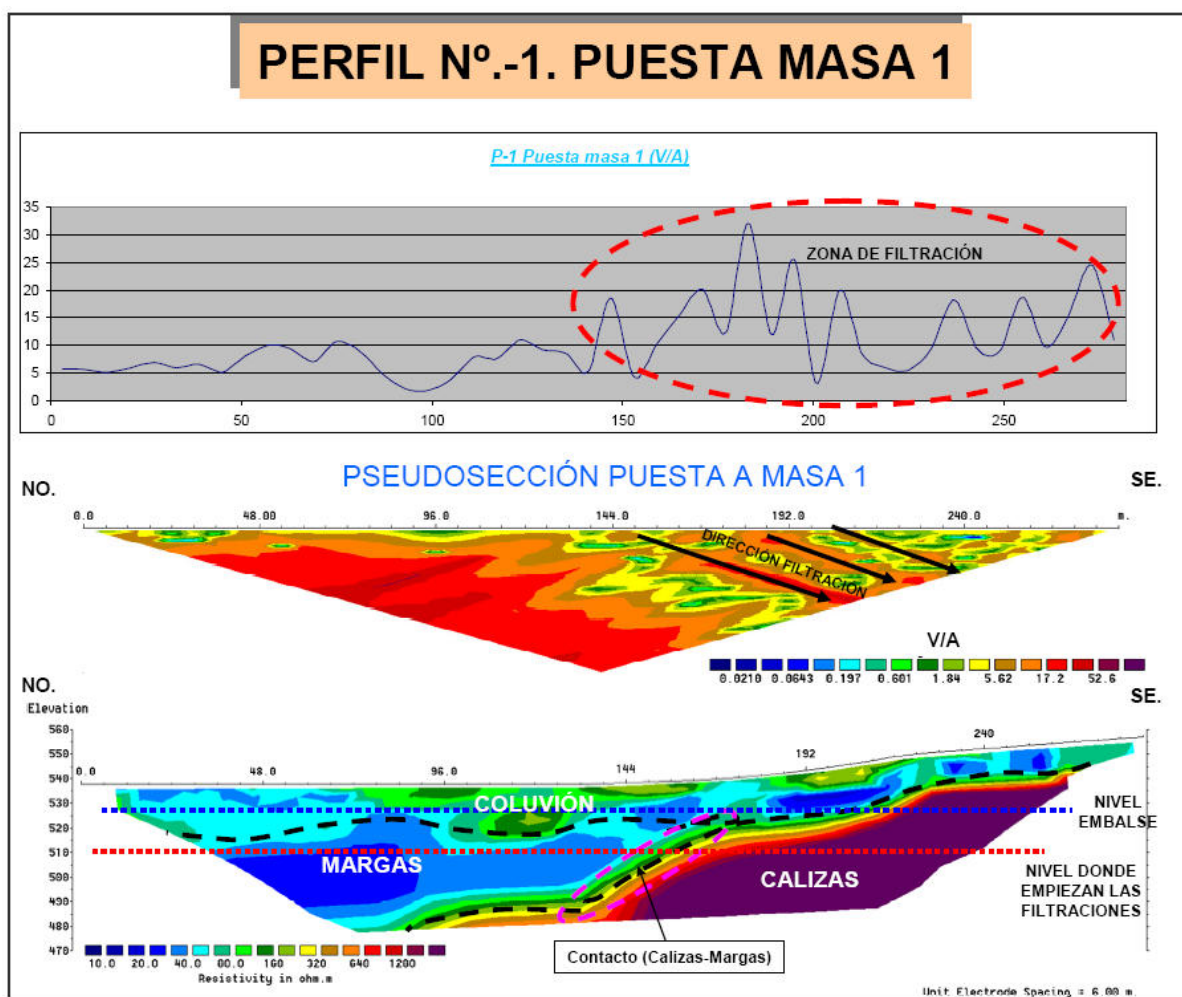


Figura 218. Perfil de Investigación TE-1 y P.M con origen en “Puesta masa 1”

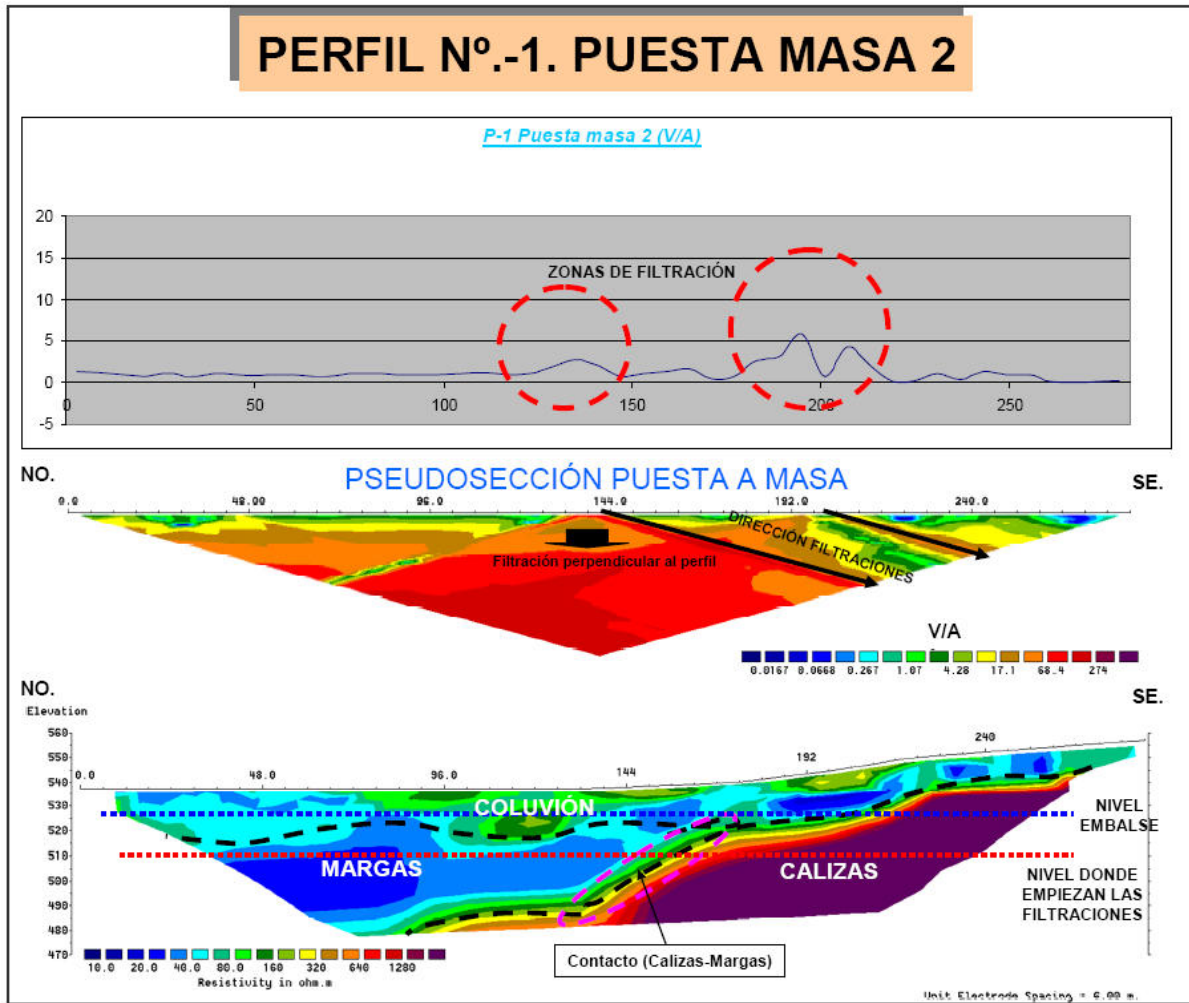


Figura 219. Perfil de Investigación TE-1 y P.M con origen en “Puesta masa 2”



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 2

En el caso del perfil de investigación TE -2, el corte geoelectrico al igual que el caso del perfil anterior presenta una longitud de 282 m. Este perfil de investigación con dirección NE - SO se ha realizado a lo largo de la antigua presa. El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 220.

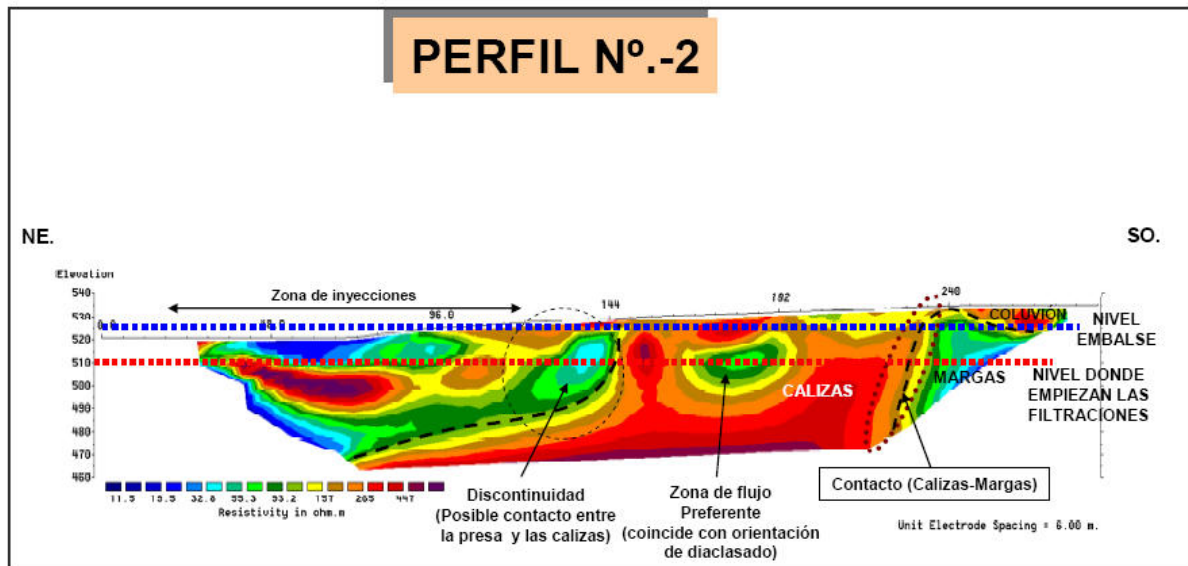


Figura 220. Perfil de Investigación TE-2

En cuanto a la PM (figuras 221 y 222) se encuentran las anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración y sus direcciones.

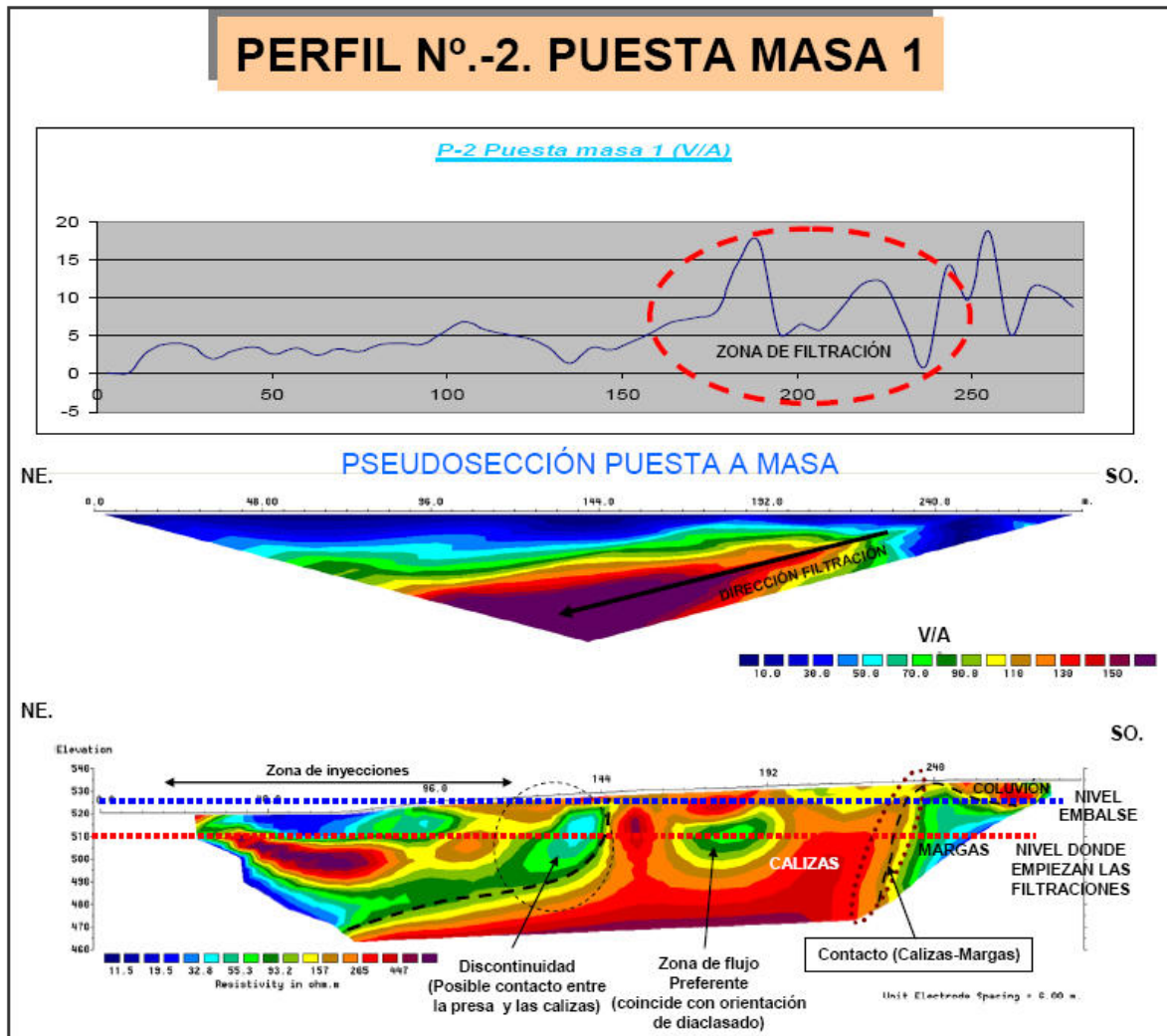


Figura 221. Perfil de Investigación TE-2 y P.M con origen en “Puesta masa 1”

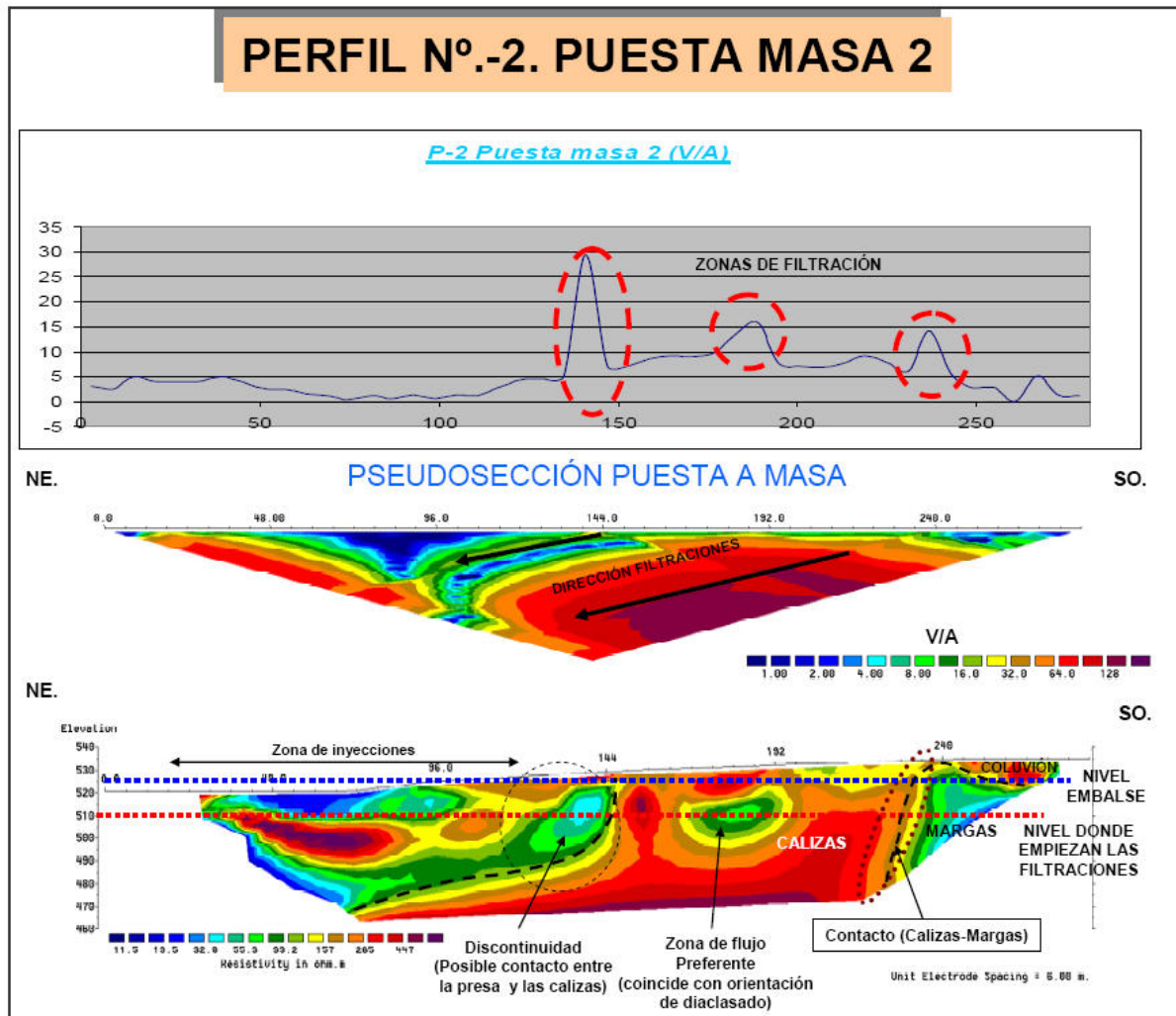


Figura 222. Perfil de Investigación TE-2 y P.M con origen en “Puesta masa 2”

El análisis conjunto de los datos muestra tres zonas de flujo preferente:

- Entorno al metro 138 del perfil (a 10 m de distancia de las actuales inyecciones), posible anomalía estructural relacionada con el contacto calizas-presa (estribo).
- En el metro 180 del perfil de Investigación se localiza una zona de flujo preferente ubicada entre el contacto calizas-margas y el estribo, a la altura de la caseta que hay entre ambos lugares. Se trata de una anomalía que se asocia a una zona de discontinuidad (zona karstificada o de flujo preferente). Es destacable que esta zona de flujo preferente comienza prácticamente en la cota donde se inician las filtraciones del embalse de Mediano.
- Por último, en la zona de contacto calizas – margas (metro 236 del perfil) se localizan anomalías de potencial asociadas a fenómenos de filtración.



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 3

El perfil de investigación TE -3 y PM, presenta una longitud de 282 m y discurre con dirección SO - NE. La traza del mismo se sitúa por el camino que une la carretera del embalse con la antigua cantera.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 223.

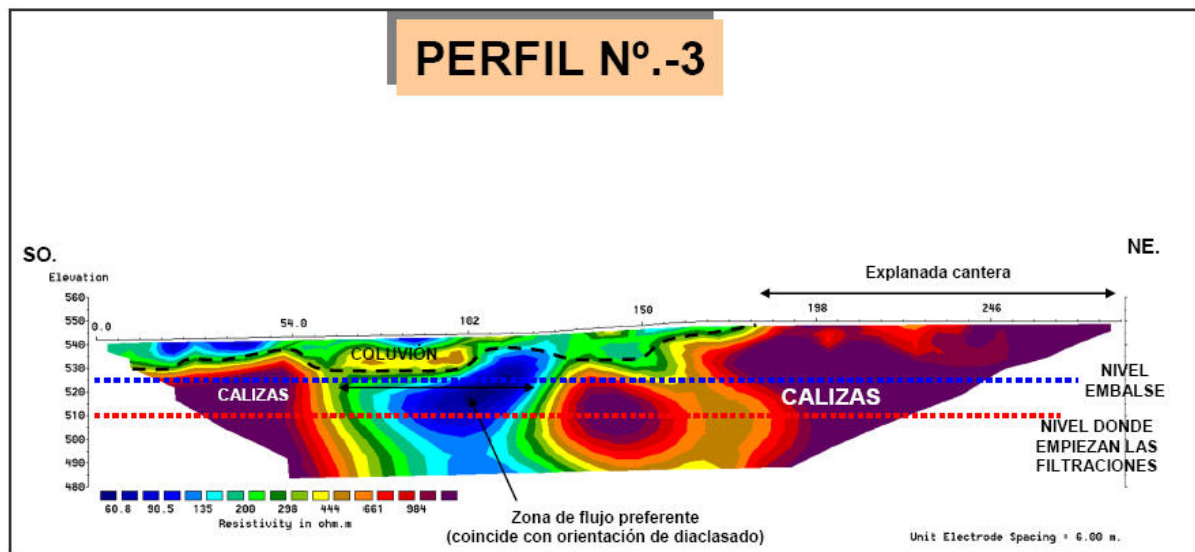


Figura 223. Perfil de Investigación TE-3

En cuanto a la PM, en las figuras 224 y 225 se encuentran anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración relacionados con el agua del embalse y otros de origen natural. Mediante las pseudosecciones de puesta masa se han interpretado las direcciones de filtración.

Mediante la interpretación conjunta de los datos de TE y PM puede observarse que existe una zona de flujo preferente entre los metros 66 y 120 de los perfiles de investigación. Es importante mencionar de cara a las conclusiones que durante estos metros (66 al 120) el perfil mantiene la dirección del diaclasado y que la zona de flujo preferente comienza precisamente en la cota donde se inician las filtraciones del embalse de Mediano. Las otras anomalías que aparecen se consideran relacionadas con fenómenos naturales por lo que dentro del marco de la investigación realizada carecen de importancia.

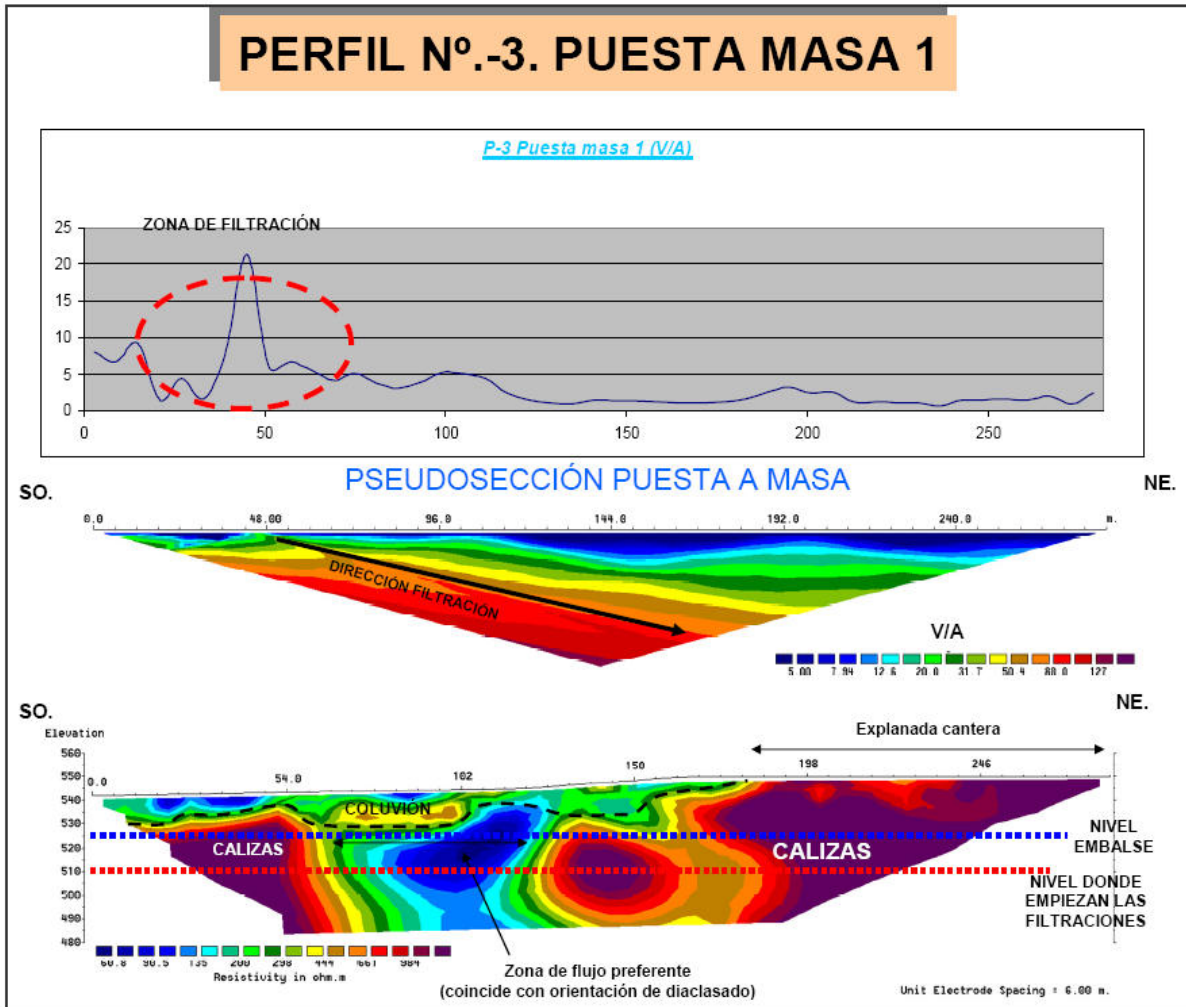


Figura 224. Perfil de Investigación TE-3 y P.M con origen en “Puesta masa 1”

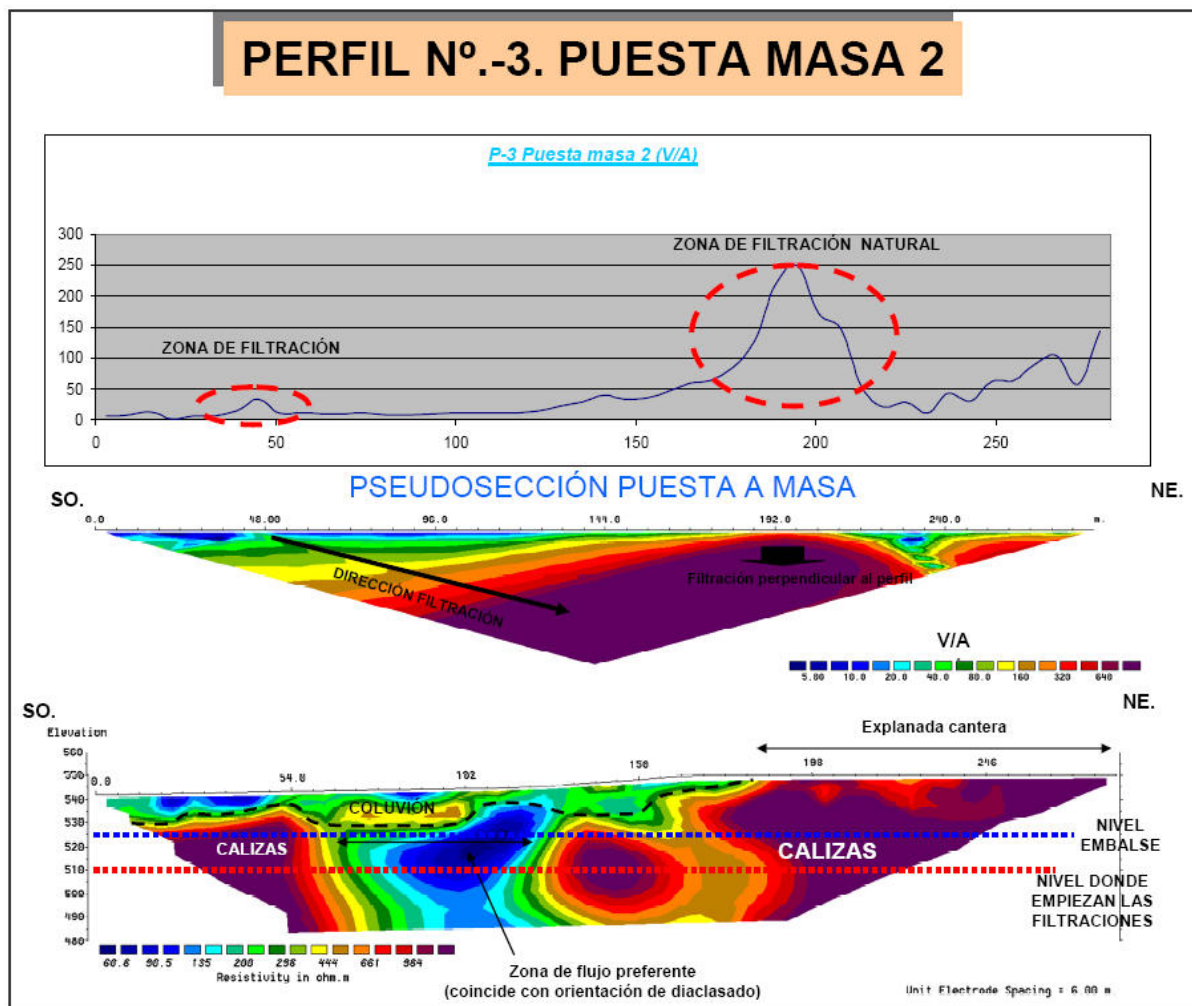


Figura 225. Perfil de Investigación TE-3 y P.M con origen en “Puesta masa 2”



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 4

El perfil de investigación TE -4 y PM, presenta una longitud de 282 m y discurre con dirección NO - SE.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura siguiente.

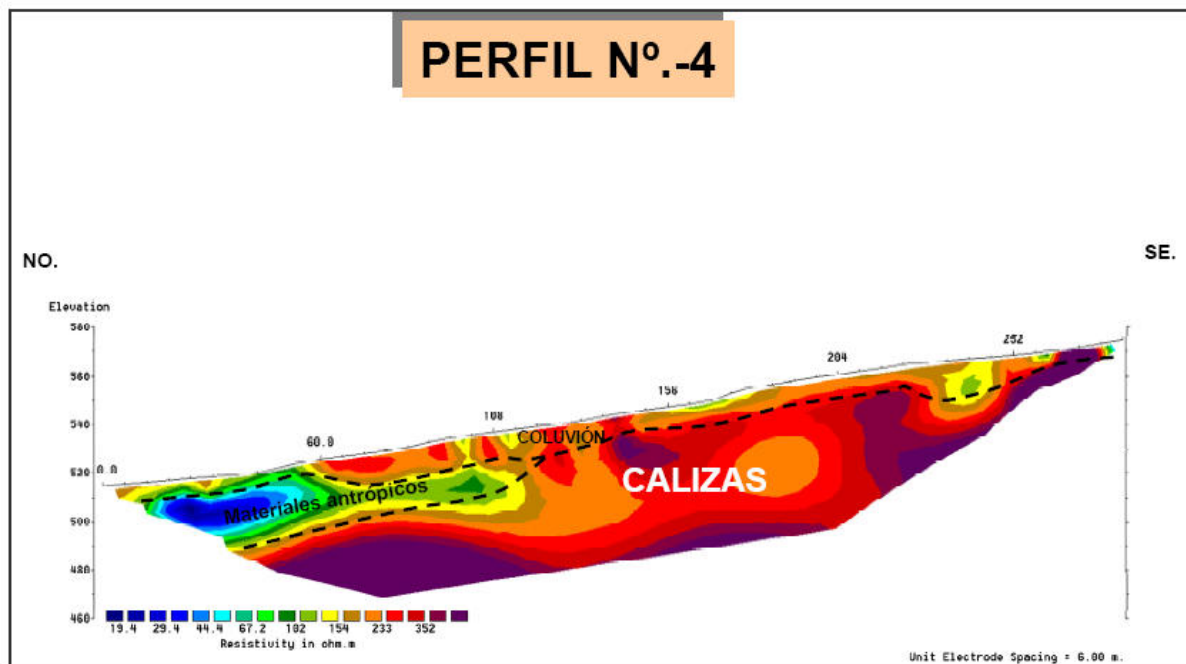


Figura 226. Perfil de Investigación TE-4

En cuanto a la PM, en la “Puesta masa 2” (figura 227) se encuentran dos anomalías de potencial. Una de ellas se asocia a la existencia de fenómenos de filtración a través de las calizas (metros 84 y 144 del perfil). La anomalía localizada entre los metros 0 y 50 del perfil carece de importancia, ya que se asimila a que el perfil pasa justo a lado del canal de agua, el cual se encuentra totalmente cargado debido a que en su parte final se encuentra el electrodo que genera la corriente (“Puesta masa 2”). Mediante la pseudosección de “puesta masa 2” se han interpretado las direcciones de filtración.

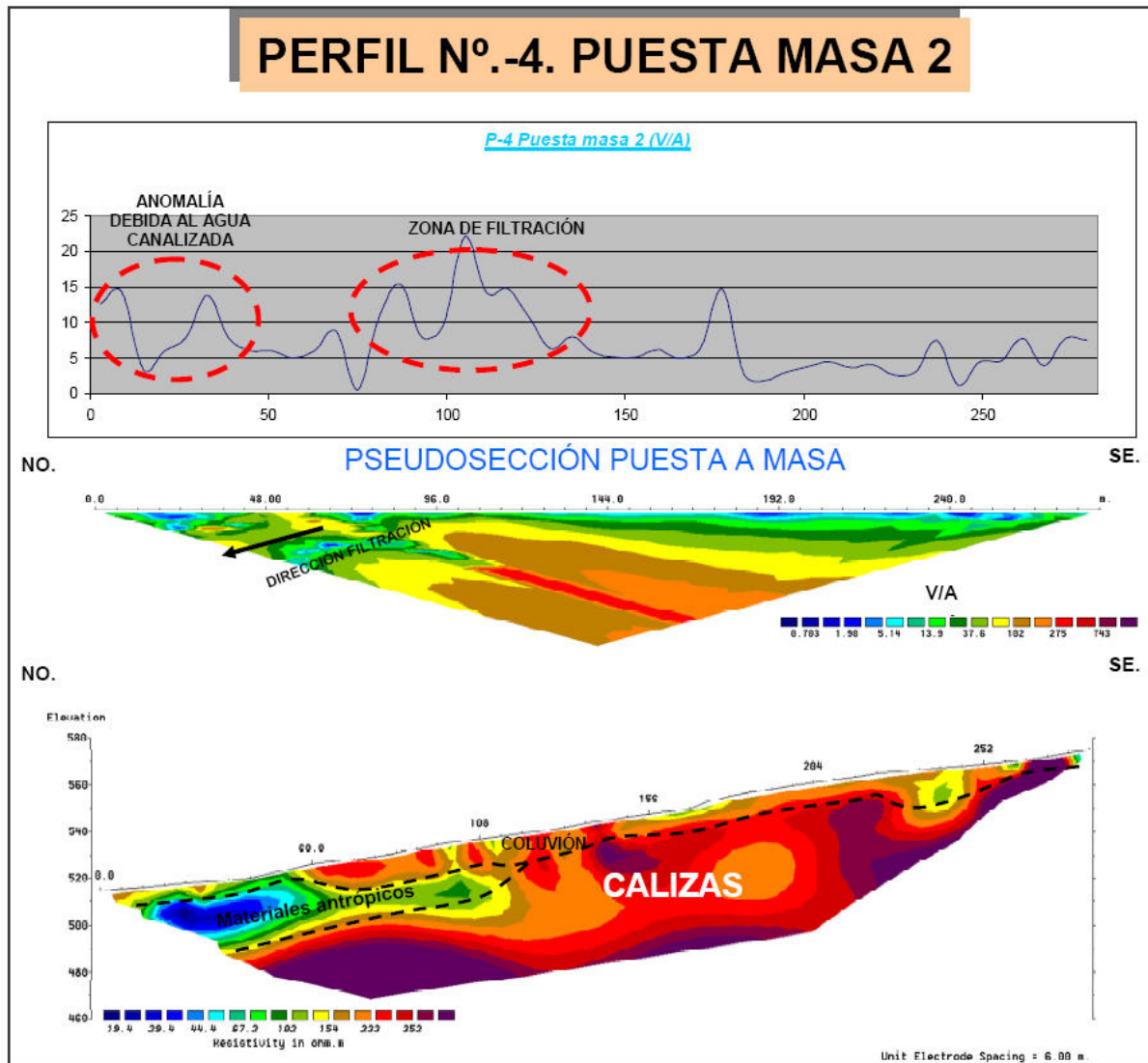


Figura 227. Perfil de Investigación TE-4 y P.M con origen en “Puesta masa 2”

La “Puesta masa 1” (figura 228) no ha aportado ningún dato de relevancia para este perfil de investigación.

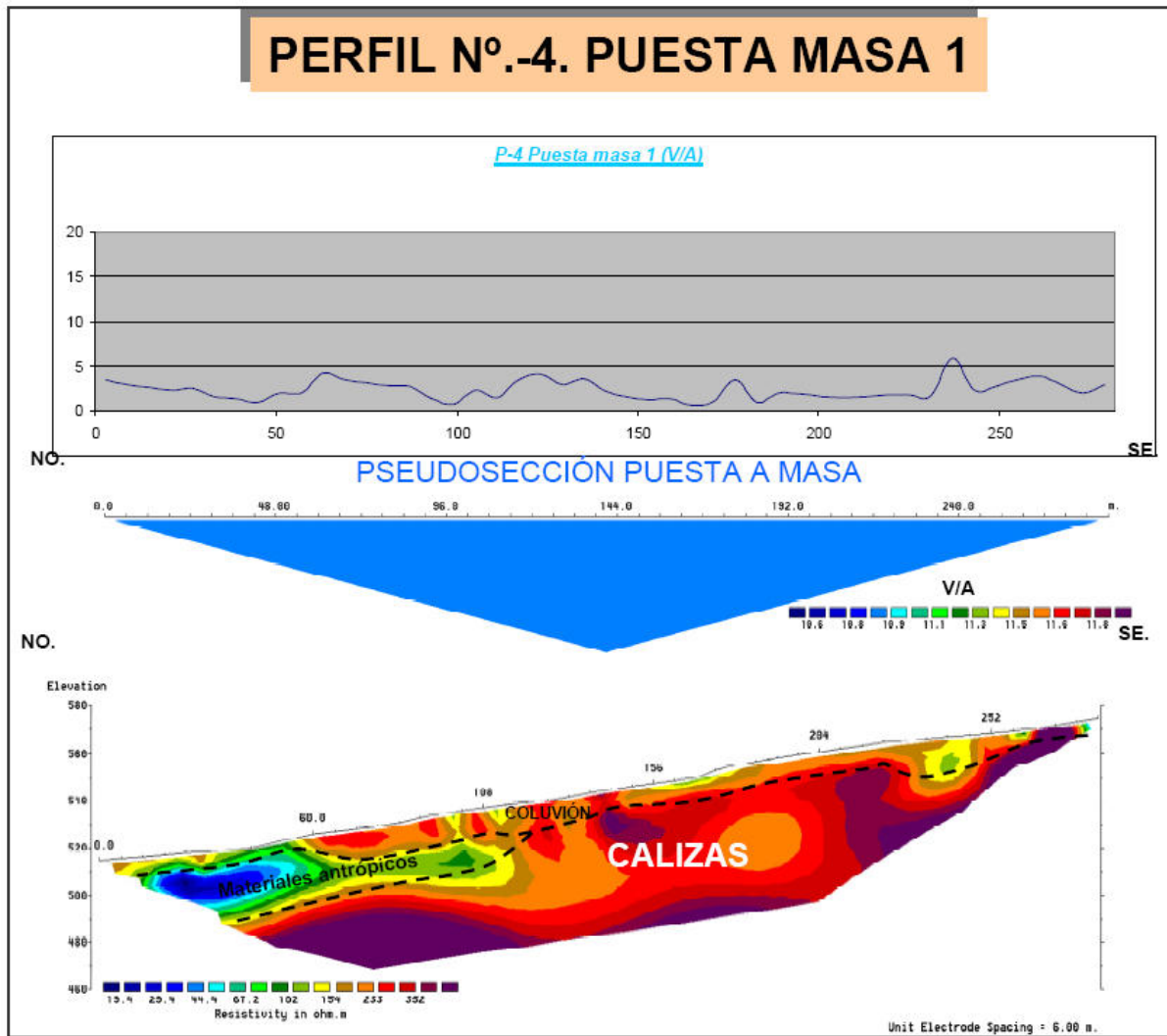


Figura 228. Perfil de Investigación TE-4 y P.M con origen en “Puesta masa 1”



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 5

El perfil de investigación TE -5 y PM, presenta una longitud de 192 m y discurre con dirección NO - NE. La traza del mismo en su parte final se localiza en la explanada de la antigua cantera.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 229. Cabe destacar una zona de fracturación entorno al metro 102 del perfil de investigación.

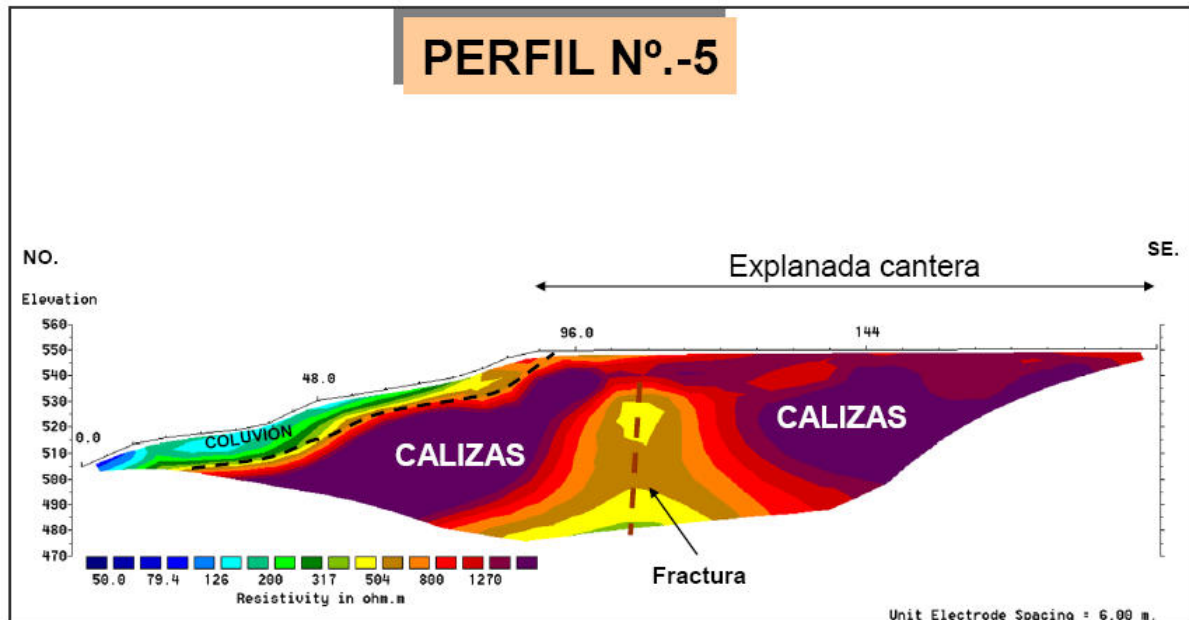


Figura 229. Perfil de Investigación TE-5

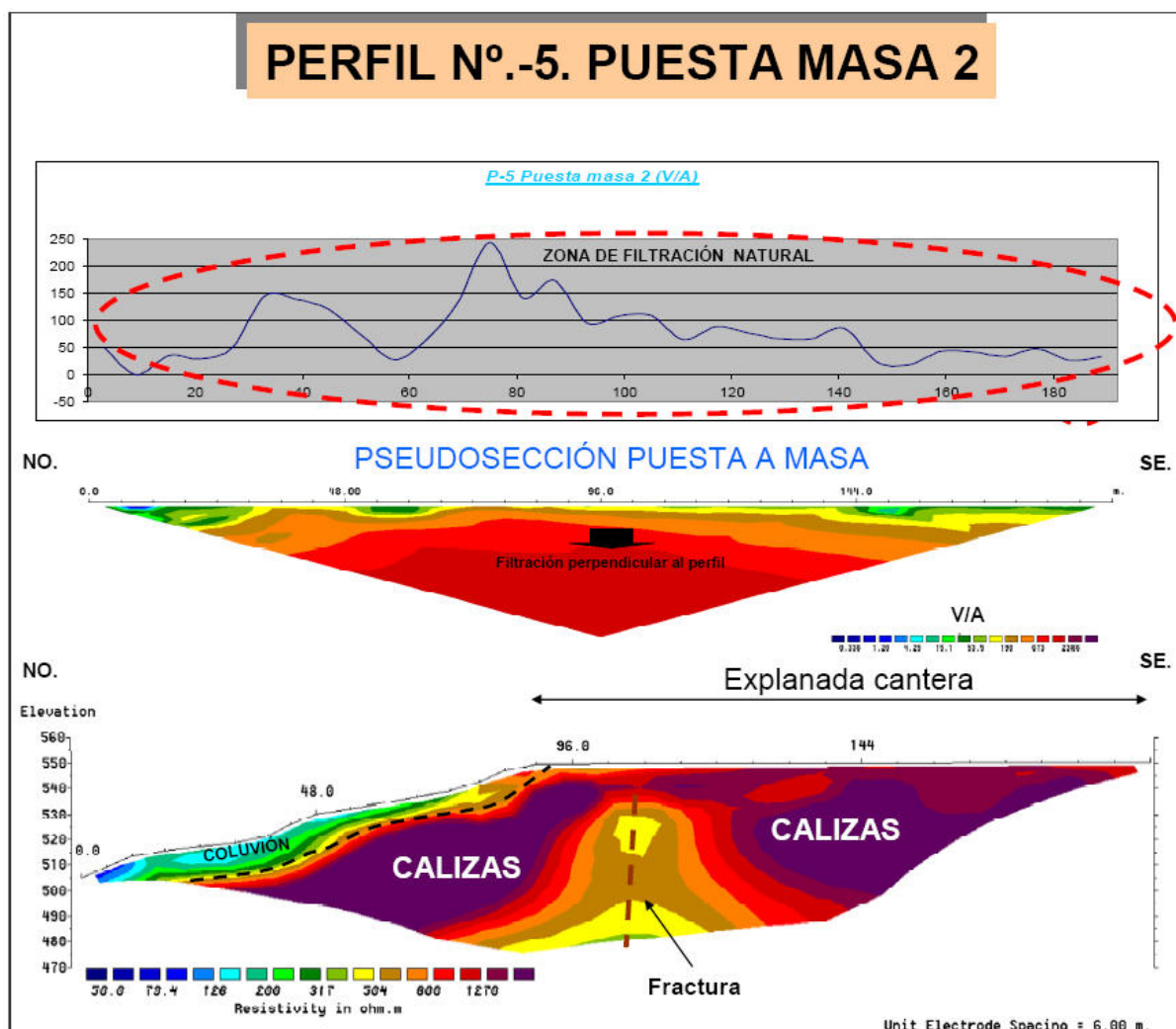


Figura 230. Perfil de Investigación TE-5 y P.M con origen en “Puesta masa 2”

En cuanto a la PM, en la “Puesta masa 2” (figura 230) se encuentran anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración de origen natural. Mediante la pseudosección de “puesta masa 2” se han interpretado las direcciones de filtración.

La “Puesta masa 1” (figura 231) no ha aportado ningún dato de relevancia para este perfil de investigación.

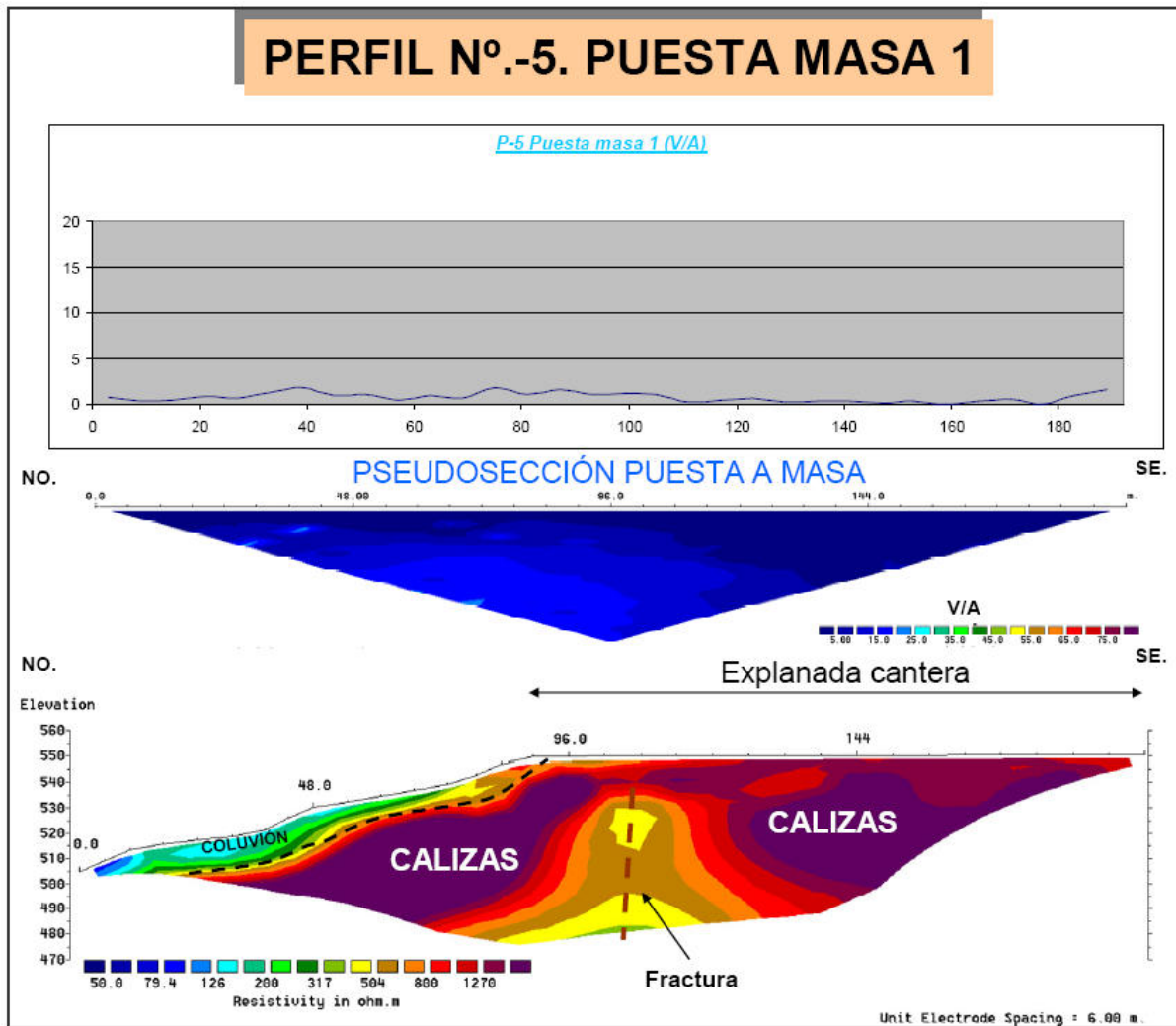


Figura 231. Perfil de Investigación TE-5 y P.M con origen en “Puesta masa 1”



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 6

En el caso del perfil de investigación TE -6, el corte geoelectrico al igual que el caso del perfil anterior presenta una longitud de 282 m. Este perfil de investigación con dirección NE - SO se ha realizado a lo largo del recrecimiento.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 232.

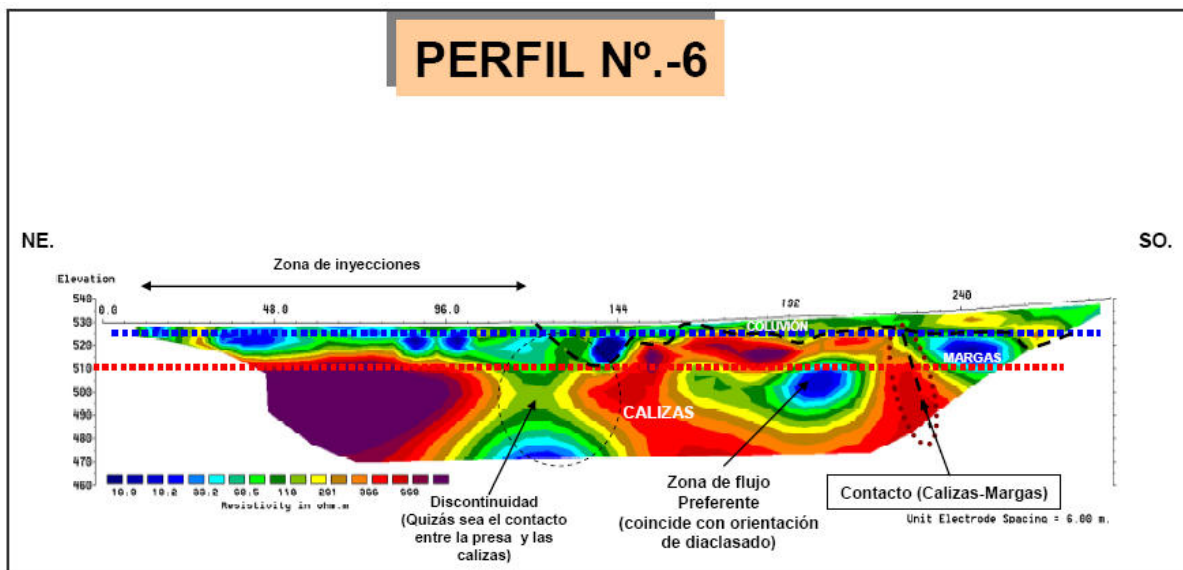


Figura 232. Perfil de Investigación TE-6

En cuanto a la PM (figuras 233 y 234) se encuentran las anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración y sus direcciones.

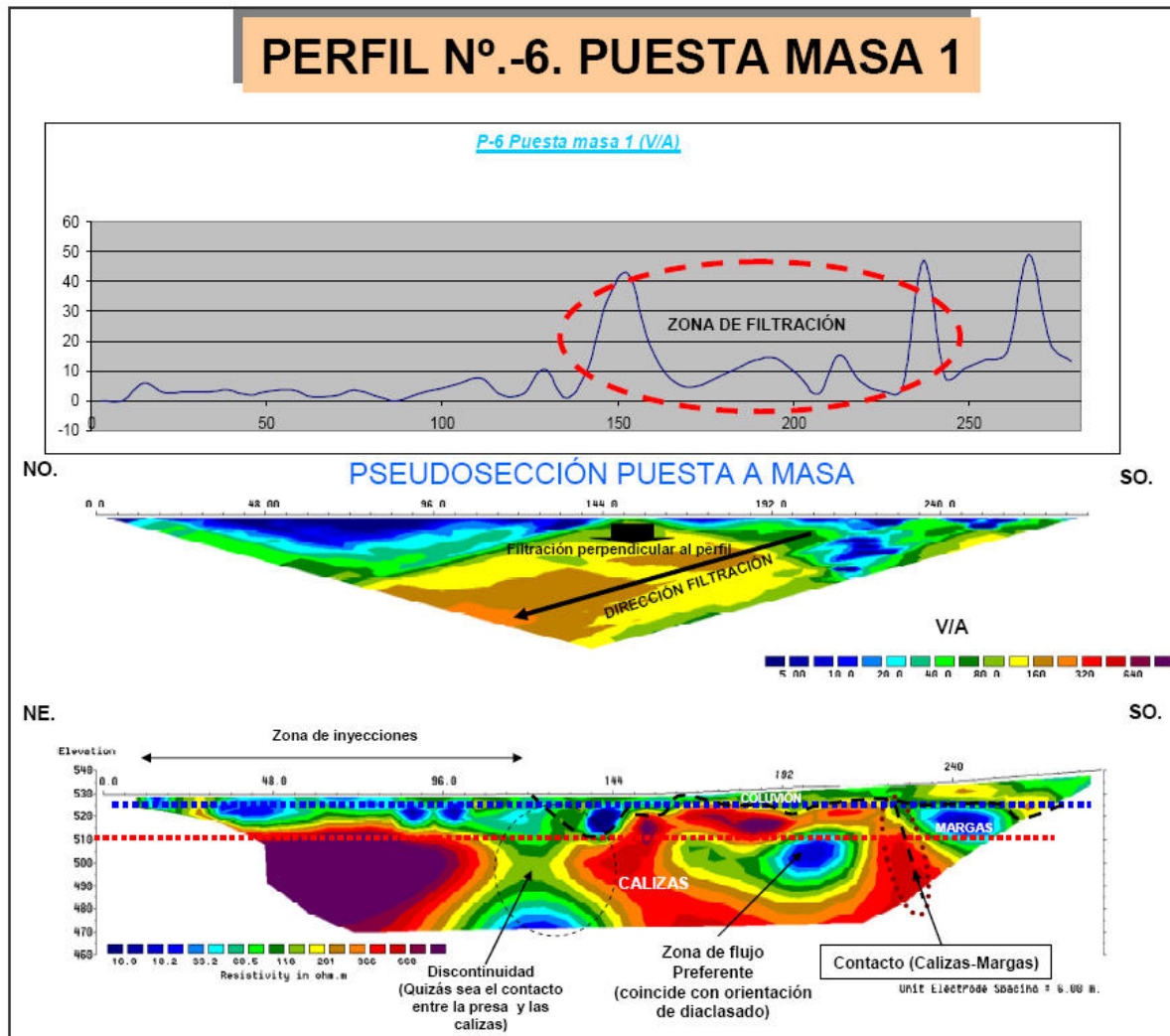


Figura 233. Perfil de Investigación TE-6 y P.M con origen en “Puesta masa 1”

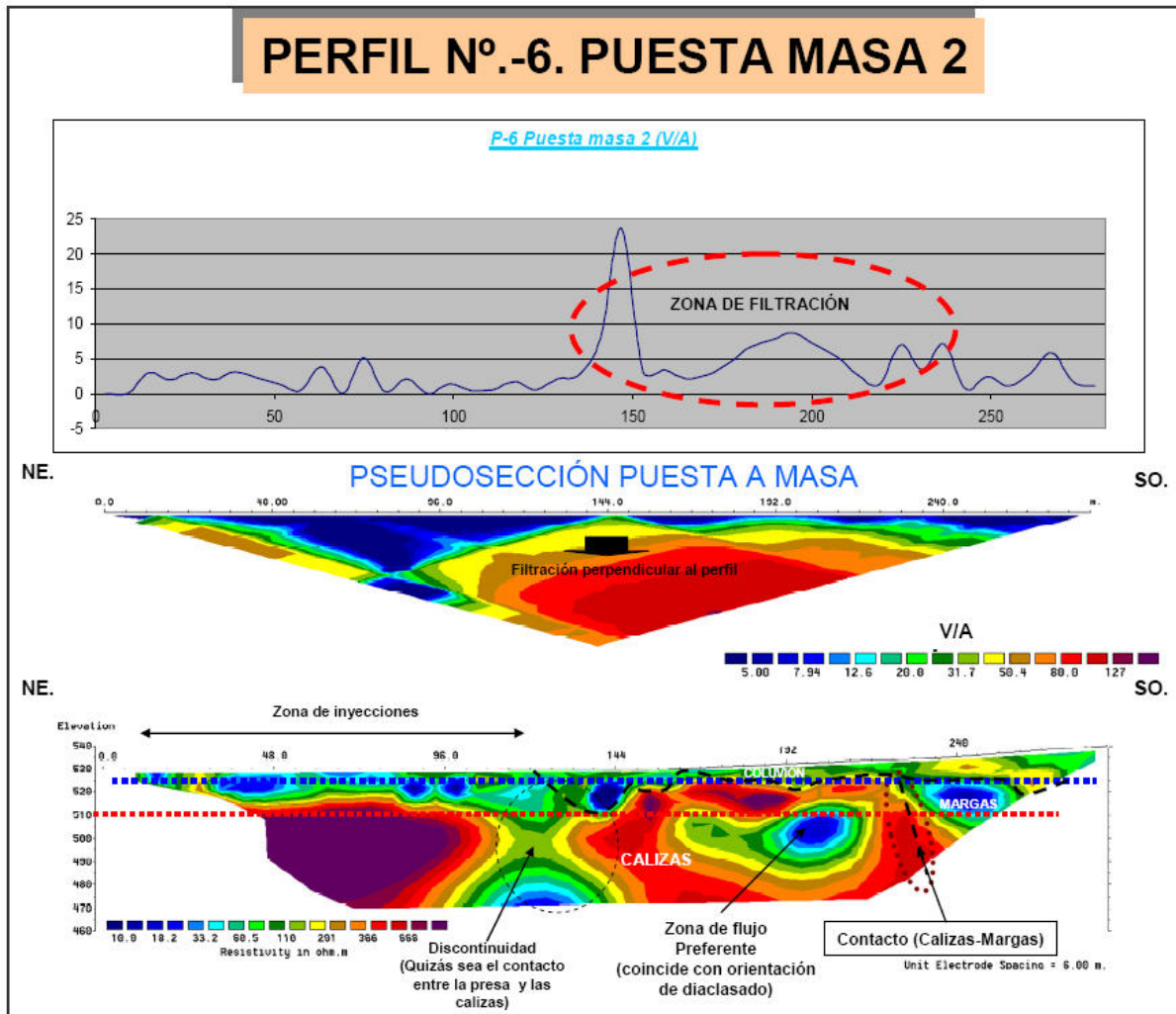


Figura 234. Perfil de Investigación TE-6 y P.M con origen en “Puesta masa 2”.

El análisis conjunto de los datos muestra tres zonas de flujo preferente:

- Entorno al metro 132 del perfil, posible anomalía estructural relacionada con en contacto calizas-presa (estribo).
- En el metro 198 del perfil de Investigación se localiza una zona de flujo preferente ubicada entre el contacto calizas-margas y el estribo, a la altura de la caseta que hay entre ambos lugares. Se trata de una anomalía que se asocia a una zona de discontinuidad (zona karstificada o de flujo preferente). Es destacable que esta zona de flujo preferente tiene continuidad en los perfiles n°2 y n°3 y parece tener una tendencia ascendente lo que concuerda con la anomalía positiva de P.E. (figura 215) localizada en esa zona.
- Por último, en la zona de contacto calizas – margas (metro 230 del perfil) se localizan anomalías de potencial asociadas a fenómenos de filtración.



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 7

El perfil de investigación TE -7 y PM, presenta una longitud de 282 m y discurre con dirección O - E.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 235.

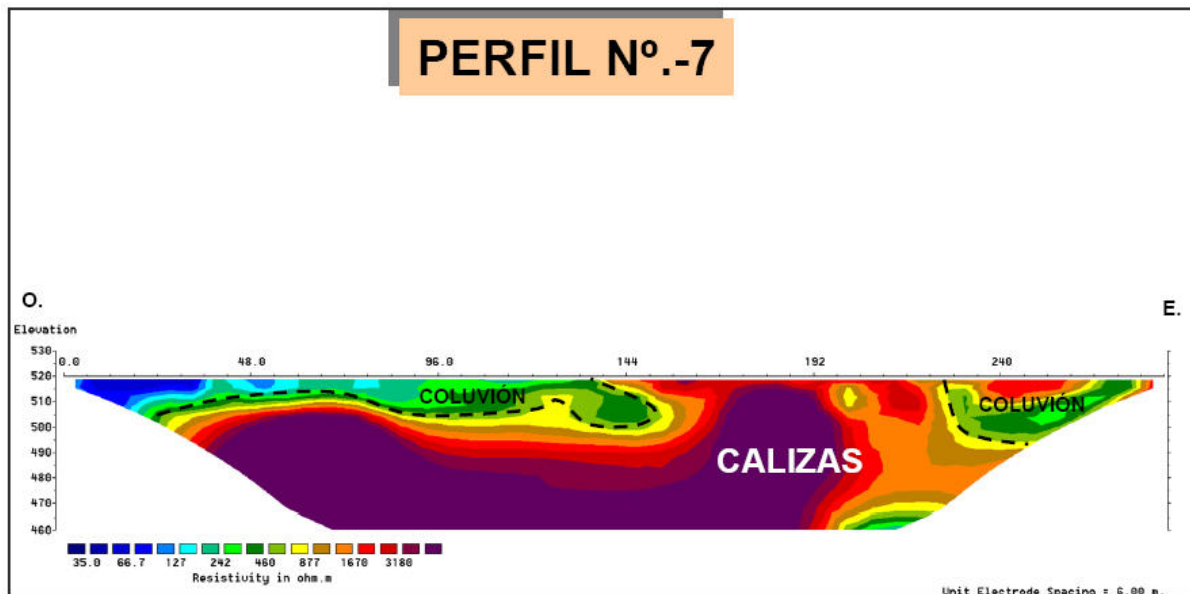


Figura 235. Perfil de Investigación TE-7

Desde el margen izquierdo del embalse de mediano se obtiene una visual del corte geológico en las inmediaciones del Perfil 7, es por esto que se ha realizado una correlación entre la realidad y el perfil de tomografía n°7 (figura 236) de forma que se pueda corroborar la interpretación realizada para este perfil.

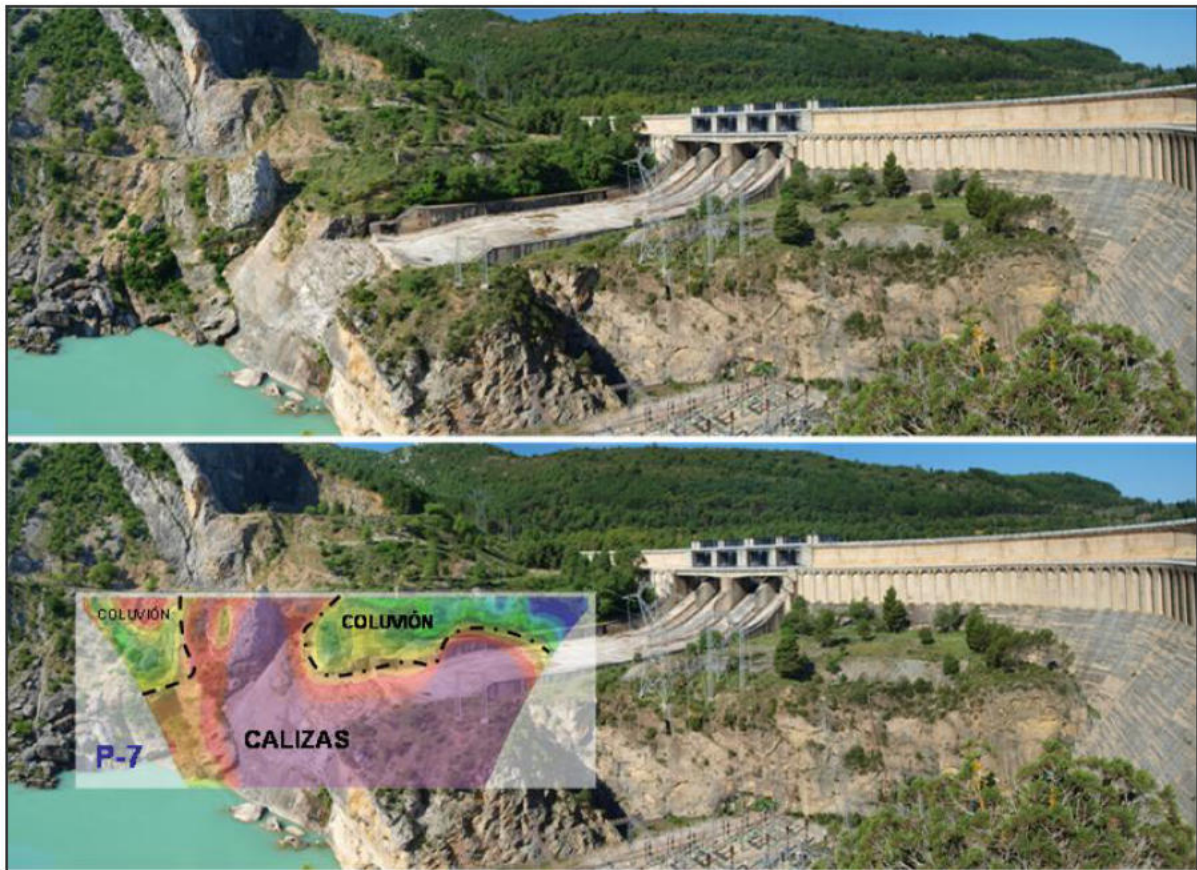


Figura 236. Correlación del perfil de tomografía n°7.

En cuanto a la PM, en la “Puesta masa 2” (figura 237) se encuentran anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración de origen natural. Mediante la pseudosección de “puesta masa 2” se han interpretado las direcciones de filtración.

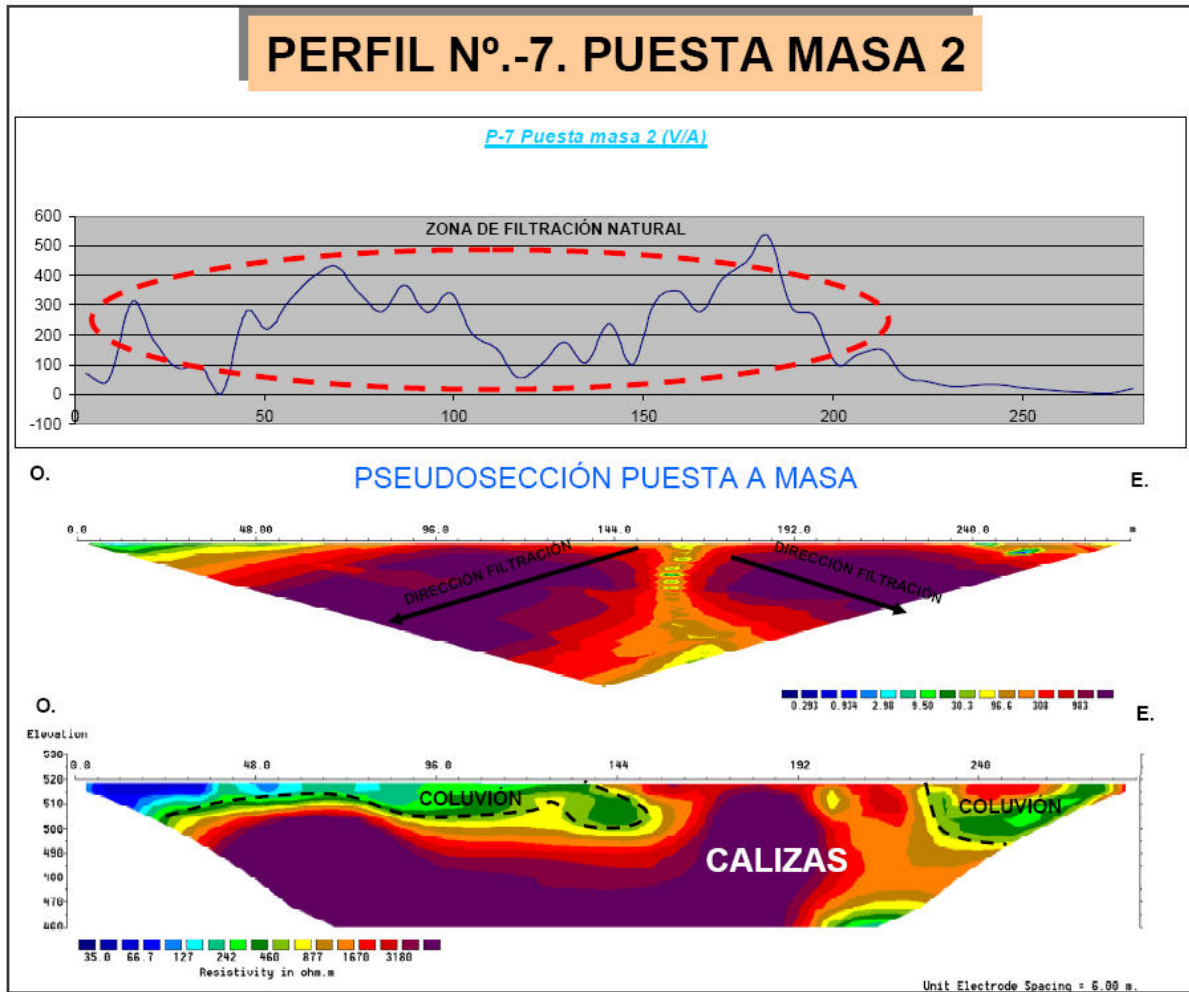


Figura 237. Perfil de Investigación TE-7 y P.M con origen en “Puesta masa 2”.

La “Puesta masa 1” (Figura 238) no ha aportado ningún dato de relevancia para este perfil de investigación.

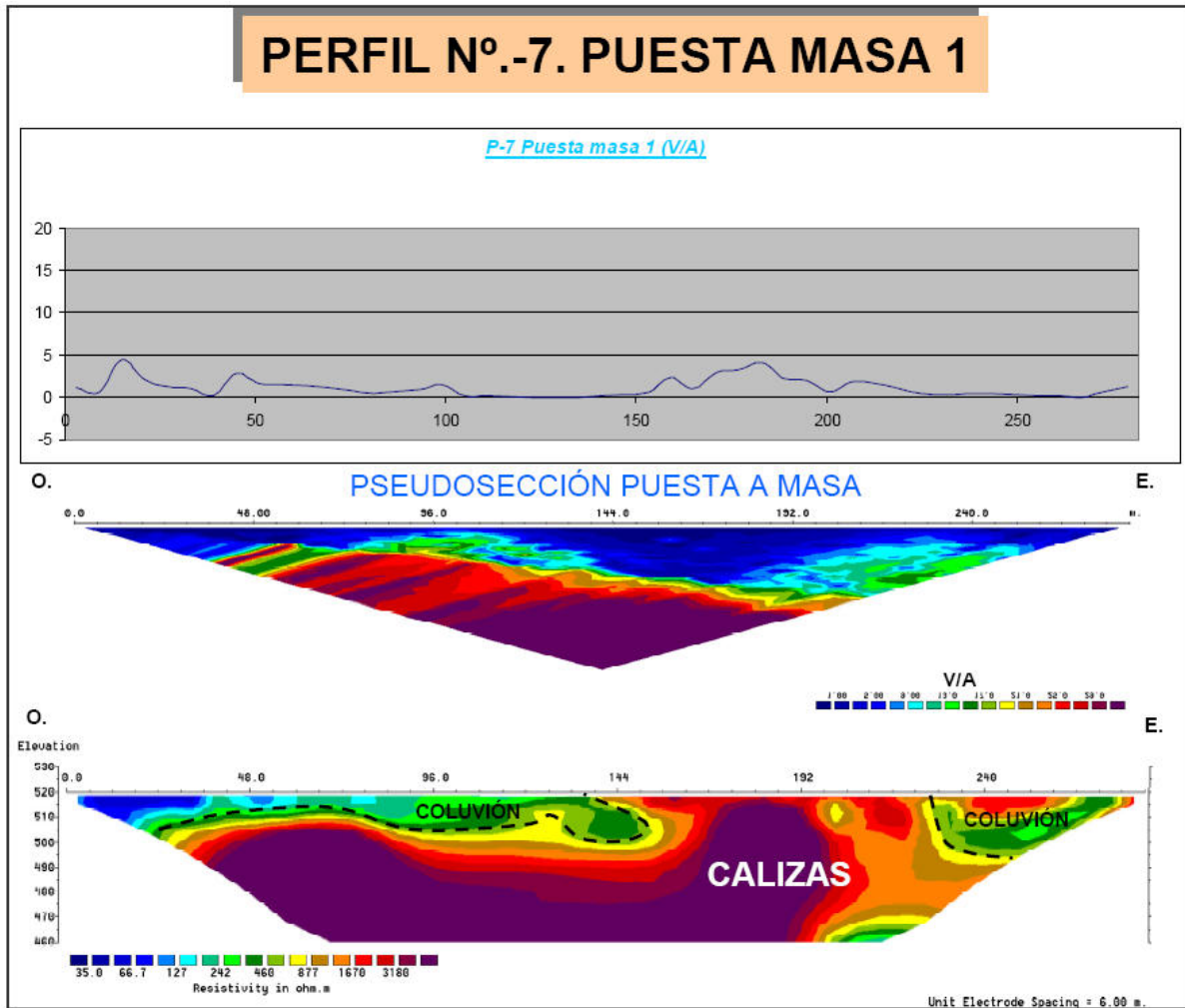


Figura 238. Perfil de Investigación TE-7 y P.M con origen en “Puesta masa 1”



PERFIL DE INVESTIGACIÓN 8

El perfil de investigación TE -8 y PM, presenta una longitud de 141 m y discurre con dirección NO - SE. La traza del mismo tiene por objeto verificar el estado del aliviadero.

El corte geoelectrico obtenido por la TE y su interpretación puede observarse en la figura 239. Cabe destacar una zona de fracturación entorno al metro 70 del perfil de investigación.

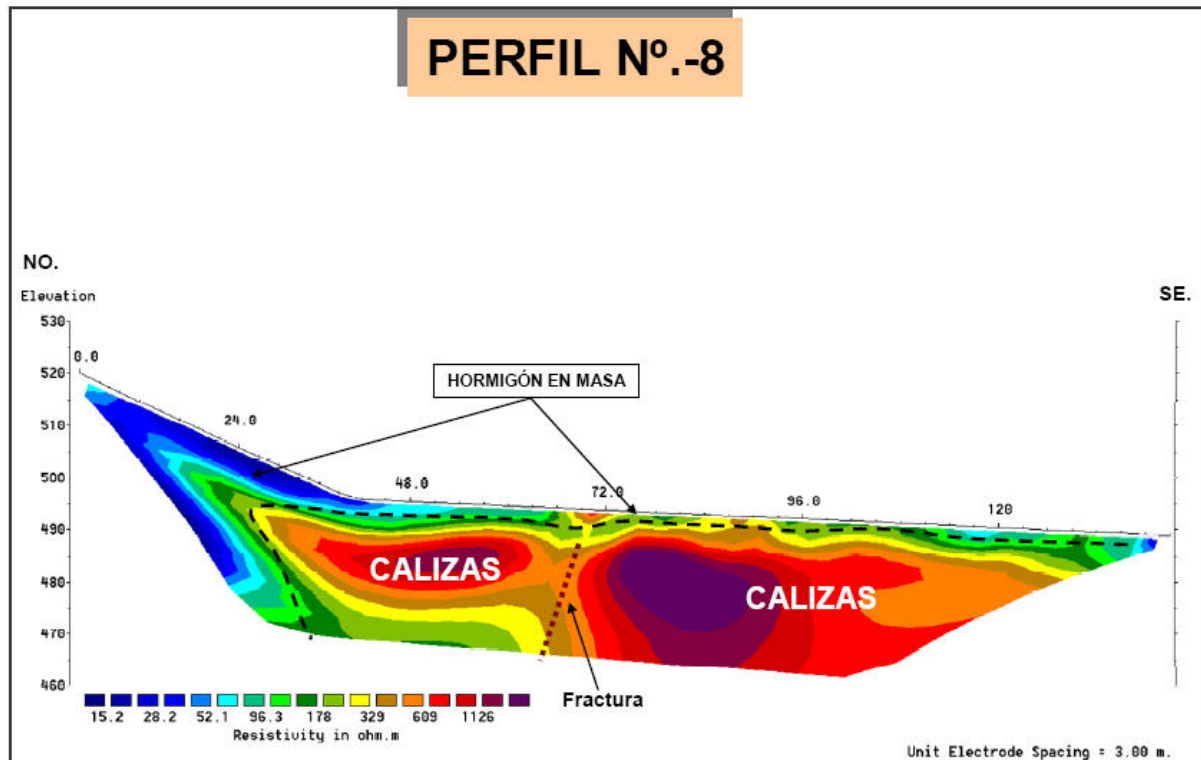


Figura 239. Perfil de Investigación TE-8

En cuanto a la PM, en la “Puesta masa 2” (figura 240) se encuentran anomalías de potencial que se asocian a la existencia de fenómenos de filtración del agua que esta ya canalizada (proveniente de otras filtraciones del embalse) por lo que carece de importancia. Mediante la pseudosección de “puesta masa 2” se han interpretado la dirección de filtración.

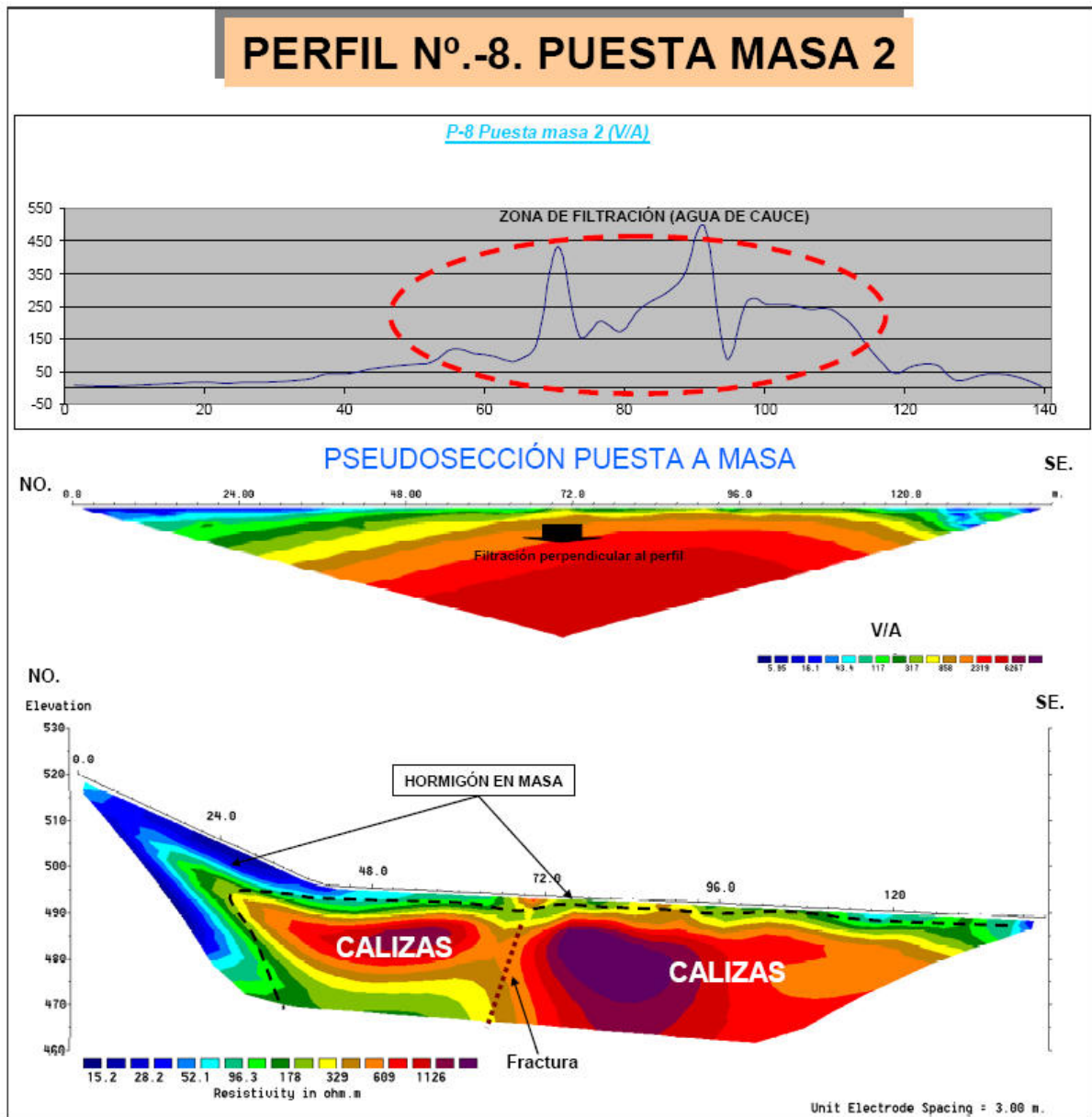


Figura 240. Perfil de Investigación TE-8 y P.M con origen en “Puesta masa”

La “Puesta masa 1” (Figura 241) no ha aportado ningún dato de relevancia para este perfil de investigación.

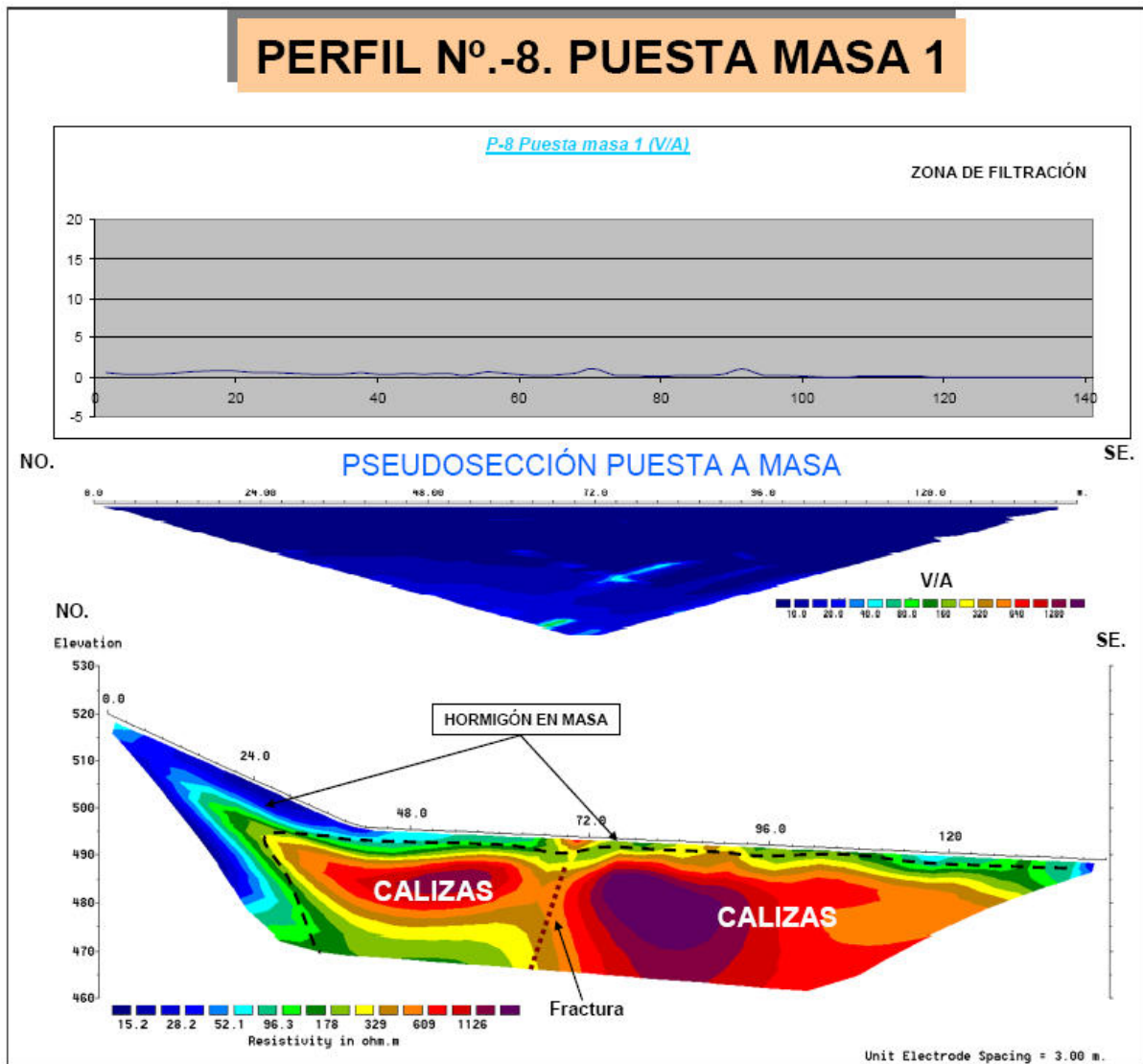


Figura 241. Perfil de Investigación TE-8 y P.M con origen en “Puesta masa 1”

El análisis conjunto de los datos muestra que el aliviadero se encuentra en buen estado.



6.6.- Análisis de la investigación

El análisis conjunto de los perfiles de detalle de P.E., T.E. y P.M. permite obtener las siguientes conclusiones:

- Los trabajos realizados con el sistema de investigación geofísica P.E. ha mostrado posibles zonas de filtración existentes a lo largo de la zona de estudio de la margen derecha del embalse que posteriormente han sido verificadas mediante los sistemas de investigación geofísica T.E. y P.M.
- Los resultados de los perfiles de T.E. muestran que la zona de estudio esta compuesta principalmente por potentes depósitos terciarios de calizas con abundante fracturación (diaclasado) y margas eocenas.
- Los resultados de los perfiles de P.M. muestran la existencia de varias anomalías de mpotencial provocadas por diferentes orígenes estructurales o geológicos, lo que indica que las filtraciones se encuentran dispersas y no pueden asociarse a un único factor mcausante.
- De cara a las futuras inyecciones, el análisis conjunto de los datos muestra tres zonas de flujo preferente en las inmediaciones de la presa del embalse de mediano (figura 242):
 - Se cree que en el “contacto calizas – margas” existen zonas de debilidad con aperturas y oquedades a través de las cuales se están produciendo filtraciones.
 - Entre el contacto calizas-margas y el estribo, a la altura de la caseta que hay entre ambos lugares, se ha localizado una zona de karstificación o de flujo preferente con la misma dirección que el diaclasado presente en las calizas eocenas de la zona de estudio. Dadas las características de resistividad observadas para el mismo (valores más conductores), puede corresponder a la presencia de agua, lo que genera en su conjunto el descenso en la resistividad que presenta. Por último, es importante mencionar que esta zona de flujo preferente encaja perfectamente con la cota donde se inician las filtraciones del embalse de Mediano
 - En el contacto calizas-presa (estribo) se aprecia una anomalía estructural (discontinuidad) que podría ser origen de las filtraciones que se están produciendo en el interior de la presa. No obstante, al carecer de planos y datos detallados de la presa del Embalse de Mediano e inyecciones, no se ha podido realizar interpretación geofísica de esta zona con la rigurosidad necesaria.

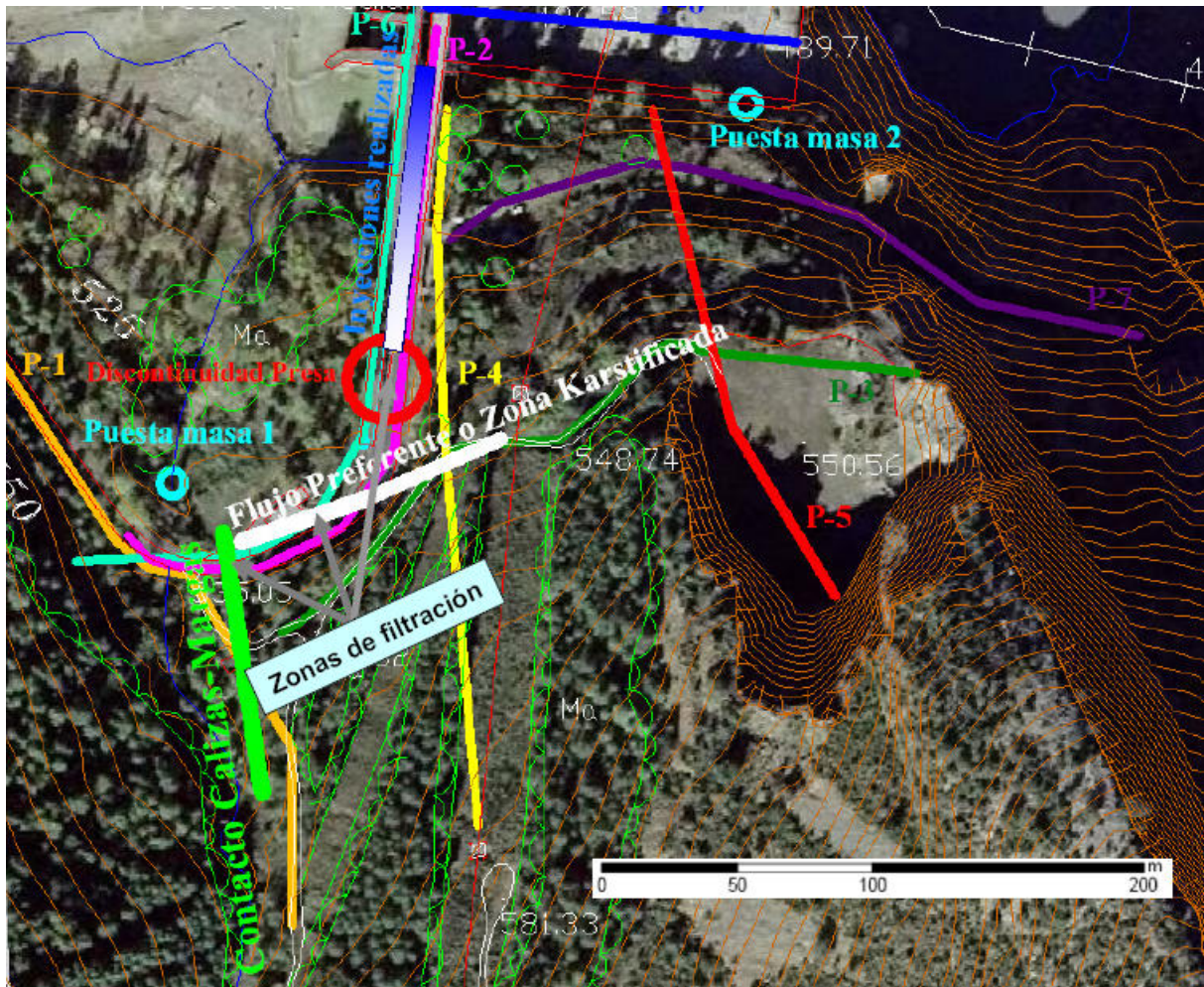


Figura 242. Zonas de filtración en las inmediaciones de la presa del Embalse de Mediano

6.7.- Recomendaciones y propuestas de actuación

Los trabajos de investigación realizados en la zona del estribo derecho de la Presa del Embalse de Mediano han permitido la definición de las zonas de filtración estableciendo la posición de las mismas, su morfología así como el modelo genético de las mismas.

El análisis de los resultados del sistema P.E., T.E. y P.M. ha permitido delimitar la zona que por sus características, presenta la mejor disposición de cara a la ejecución de obras de remediación de las filtraciones. El perfil de inyecciones propuesto comienza en el estribo derecho y termina en el “contacto calizas-margas” (figura 243).

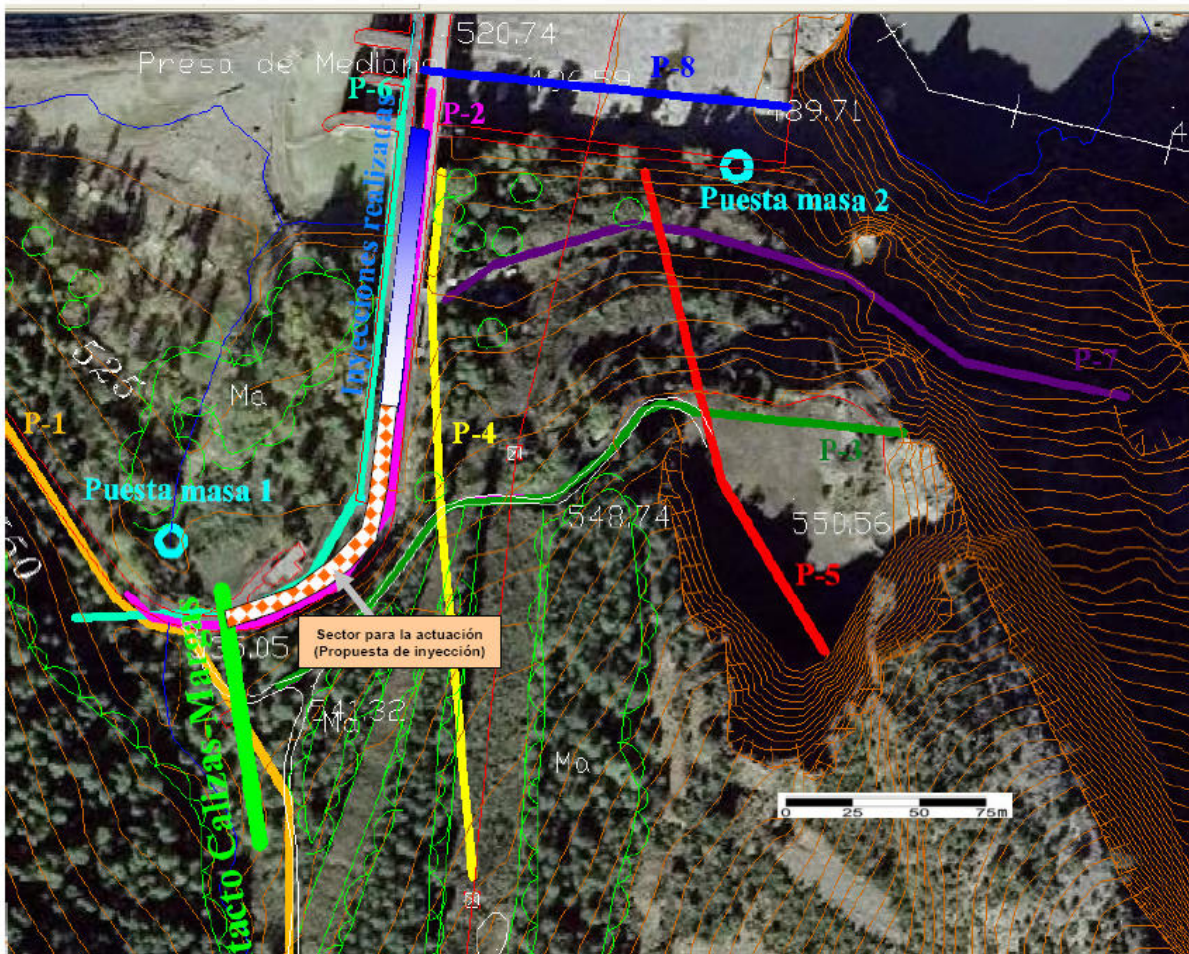


Figura 243. Plano de situación del perfil de inyecciones

No obstante, todo estudio geofísico está basado en medidas indirectas, siendo necesario para su corroboración la ejecución de varios sondeos mecánicos de reconocimiento, estratégicamente ubicados (figura 244). De esta forma se podrá constatar la información refrendada en este informe. Los sondeos de reconocimiento recomendados son los siguientes:

- El sondeo n°1 se ubica entre el contacto calizas-margas y el estribo, a la altura de la caseta, (cercano al S-3). Se trata de comprobar una anomalía que se asocia a una zona karstificada o de flujo preferente.
- El sondeo n°2 se ubica a 10 m de distancia de las actuales inyecciones, y se asocia, en principio, a una anomalía estructural relacionada con el contacto calizas-presas (estribo). Se ha detectado un posible flujo a través del citado contacto.
- El sondeo n°3 se ubica entre el contacto calizas-margas y el estribo, a la altura de la caseta que hay entre ambos lugares (cercano al S-1). Se trata de una anomalía que se asocia a la misma zona karstificada o de flujo preferente que la del S-1. Su objeto sería la verificación de la dirección de este flujo (coincide con la dirección de diaclasado de la zona de estudio).

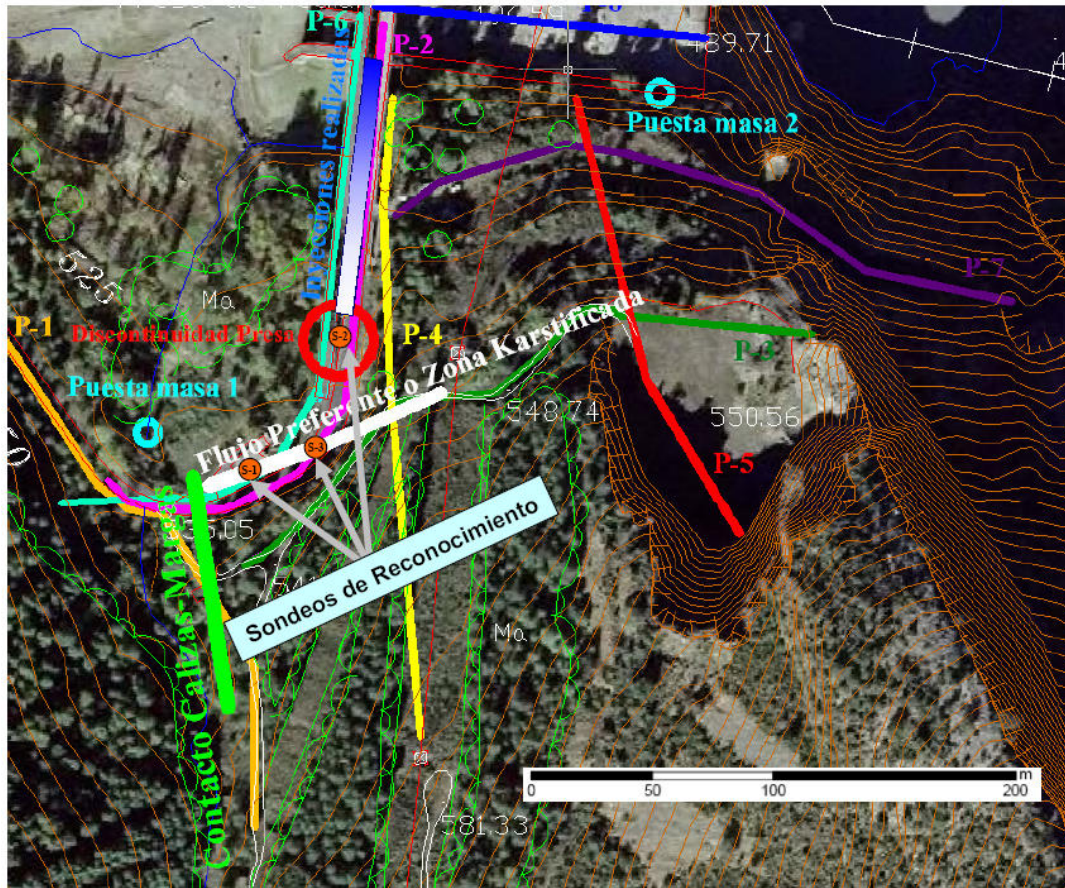


Figura 244. Plano de situación del perfil de sondeos de reconocimiento

Las especificaciones de los sondeos de reconocimiento y los perfiles de investigación T.E. que los atraviesan quedan plasmados en las figura 245 y 246.

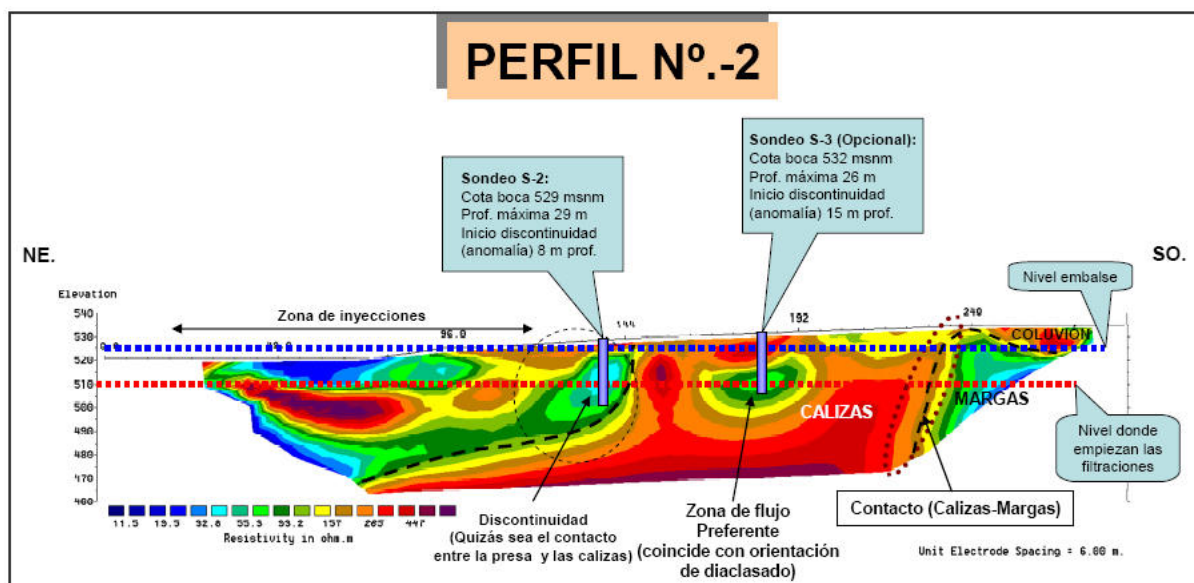


Figura 245. Perfil de investigación TE-2 y sondeos de reconocimiento S-2 y S-3

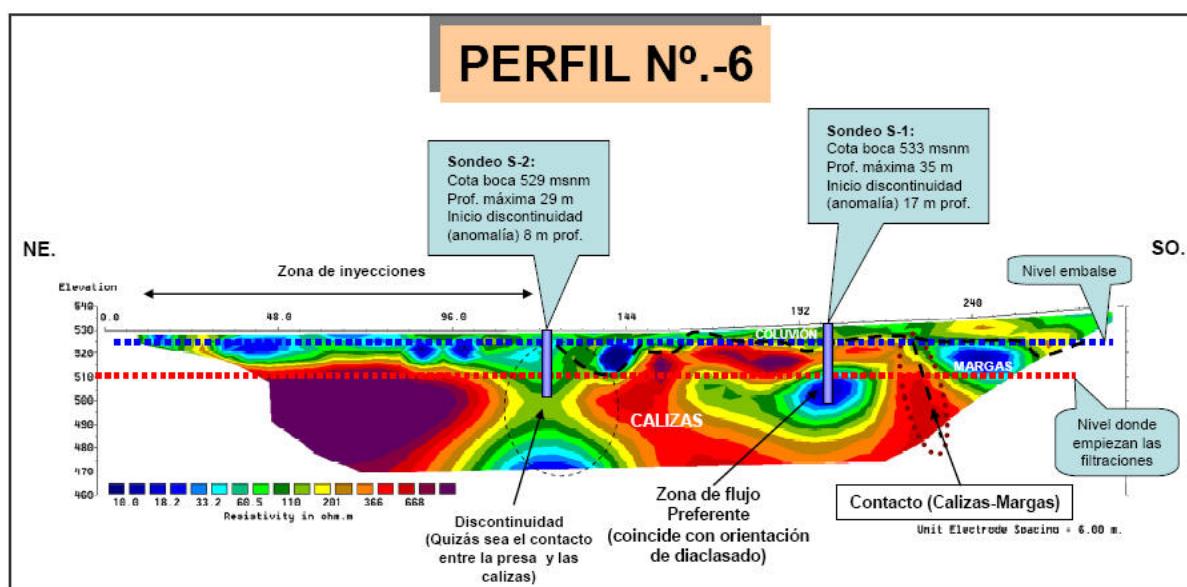


Figura 246. Perfil de investigación TE-6 y sondeos de reconocimiento S-1 y S-2

Por otro lado, no hay que olvidar que existen algunos trabajos sencillos que podrían ayudar a esclarecer ciertas incertidumbres sobre las filtraciones:

- Sería recomendable la realización de aforos diferenciales en los cauces de salida de filtraciones, para descartar o corroborar la existencia de drenajes provenientes de otras zonas.
- Además, sería conveniente la caracterización físico-química de tales drenajes, mediante la toma de datos de conductividad y pH.
- También sería recomendable la realización de un análisis temporal comparado de los caudales aforados, lámina del embalse, pluviometría y niveles piezométricos. En este análisis se podría esclarecer la posible influencia de recargas no provenientes de filtraciones, la influencia pluviométrica y la evolución temporal del efecto de las inyecciones realizadas.



| Profundidad (m) | Tipo de perforación | | | | Columna litológica | Descripción litológica | Prof. Inferior (m) | Espesor (m) | Final maniobra (m) | Recuperación (%) | R.Q.D. | Metazonización |
|-----------------|--|---------------|---------------|-------|--------------------|---|--------------------|-------------|--------------------|------------------|--------|----------------|
| | Fecha | Revestimiento | Nivel de agua | Notas | | | | | | | | |
| 24.0 | ROTACIÓN DIRECTA BS φ 86 WIDIA 14/10/2008 - 23/10/2008 ENTUBACACIÓN φ 128 mm | | | | [Brick pattern] | Caliza gris con bioclastos (biomicrita) Perdida de agua de perforación entre 28,6 y 29,5m. Fracturas de 45° en 28,6 y 29,1m | 30 | 24,7 | | 20 | 100% | V |
| 25.0 | | | | | | | | | | 40 | | |
| 28.0 | 60 | II | | | | | | | | | | |
| 30.0 | 80 | | III | | | | | | | | | |
| | | IV | | | | | | | | | | |
| | | V | | | | | | | | | | |

Figura 248. Sondeo n°1. Parte 2.



| Profundidad (m) | Tipo de perforación | Fecha | Revestimiento | Nivel de agua | Notas | Columna litológica | Descripción litológica | Prof. Inferior (m) | Espesor (m) | Final maniobra (m) | Recuperación (%) | | R.Q.D. | Mineralización | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|-------|---|---|--------------------|-------------|--------------------|------------------|----|---|----------------|------|----|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | 20 | 40 | | | 60 | 80 | | | |
| 0.0 | ROTACIÓN DIRECTA BD φ 86 WIDIA | 14/10/2008 - 23/10/2008 | | | | | Relleno antrópico. Bolos calcareos y bloques procedentes de las excavaciones de la presa. | 7? | 7? | | | | | | | | | | |
| 1.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.0 | | | | | | | | | | | | | Hormigon de la presa | 7,5? | 0,5? | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Caliza gris | 9,5 | 2 | | | | |
| 10.0 | | | | | | | | | | | | | Nivel de caliza arenosa. Contactos con oxidos de hierro | 10 | 0,2 | | | | |
| 15.0 | | | | | | | | | | | | | Caliza gris con restos de fósiles (biomicrita). A los 15m hay una fractura a 45° con matriz limo-arenosa. A los 19m hay varias fracturas a 45°. | 21,5 | 11,5 | | | | |
| 20.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.0 | | | | | | | | | | | | | Caliza arenosa laminada. Contactos abiertos y alterados. | 22 | 0,5 | | | | |
| | | | | | | Caliza gris. Disminuye el numero de fracturas a partir de los 23 metros. A los 23,5m hay mineralizaciones de malaquita. | 24 | 2 | | | | | | | | | | | |
| 24.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 249. Sondeo n°2. Parte 1.



| Profundidad (m) | Tipo de perforación | | | | Columna litológica | Descripción litológica | Prof. Inferior (m) | Espesor (m) | Final maniobra (m) | Recuperación (%) | R.Q.D. | Metamorfización |
|-----------------|---|---------------|---------------|-------|--------------------|--|--------------------|-------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Fecha | Revestimiento | Nivel de agua | Notas | | | | | | | | |
| 24.0 | ROTACIÓN DIRECTA BD φ 86 WIDIA 14/10/2008 - 23/10/2008 | | | | [Brick pattern] | Caliza gris. Disminuye el numero de fracturas a partir de los 23 metros. | 30 | 8 | | 20 40 60 80 | 20 40 60 80 | V IV III II |
| 25.0 | | | | | | | | | | | | |
| 30.0 | | | | | | | | | | | | |

Figura 250. Sondeo n°2. Parte 2.



7.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DE LA PRESA DE CERVERA Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

7.1.- Introducción y objetivos

El presente estudio trata de detectar las zonas de filtración en la cerrada de la margen derecha de la presa de Cervera así como el análisis y propuesta de actuación para eliminar dichas filtraciones

La presa de Cervera viene presentando filtraciones en ambos estribos, las cuales se producen a través de los carbonatos que constituyen la cerrada. En la actualidad, las filtraciones de mayor caudal se producen en la zona del estribo derecho, ya que el estribo izquierdo fue tratado con inyecciones. La zona de filtración parece estar situada en un entrante del embalse situado a unos 200 m de la presa en la cual, se pueden observar burbujeos en varias zonas. Para evitar dichas filtraciones se ejecutó de forma inicial, una losa impermeabilizante de hormigón (Imagen 37) así como el vertido directo de hormigón en una cavidad cercana a la losa.



Imagen 37. Losa impermeabilizante (izda) y cavidad objeto de hormigonado (dcha) en la margen derecha

Las filtraciones salen al exterior a través de las calizas por una surgencia situada en la margen derecha a unos 80 m del pie de presa (Imagen 38).



Imagen 38. Azud de recogida de las filtraciones del estribo derecho (izda) y surgencia de las filtraciones (dcha)



Por tanto, los objetivos del estudio presentan dos vertientes:

- Localización de las posibles zonas de filtración existentes en la margen derecha de la cerrada de la presa.
- Análisis y propuestas de actuación encaminadas a la eliminación de dichas filtraciones.

Para ello, se han ejecutado una serie de actividades consecutivas y relacionadas entre si enfocadas a la localización y caracterización de las zonas de filtración. Las actividades desarrolladas han sido las siguientes:

- Revisión bibliográfica de todos aquellos datos concernientes a la geología de la cerrada, datos constructivos de la presa y tratamientos anteriores realizados en la zona de estudio. Dicho análisis ha prestado especial hincapié en todos aquellos datos concernientes a la geología de la cerrada, sondeos, datos constructivos de la presa, tratamientos anteriores realizados para la remediación de las filtraciones, etc.).
- Revisión de la cartografía geológica existente así como realización de una cartografía geológica de detalle de la zona de la cerrada de la Presa de Cervera tratando de realizar una análisis estratigráfico y estructural de los materiales que conforman la cerrada de la presa de Cervera con el objetivo de analizar la posible relación de las zonas de filtración y descarga con dichas lineaciones.
- Aplicación de las técnicas geofísicas de Potencial Espontáneo (en adelante PE), Potencial Inducido (en adelante PI) y Tomografía Eléctrica (en adelante TE).
- Análisis de propuestas de remediación, propuestas de actuación y emisión del informe.

7.2.- Marco geológico

La presa de Cervera se halla al norte de la provincia de Palencia, enclavada en una región con elevada complejidad tectónica y afectada por grandes estructuras de importante entidad en la zona cantábrica (Figura 251).

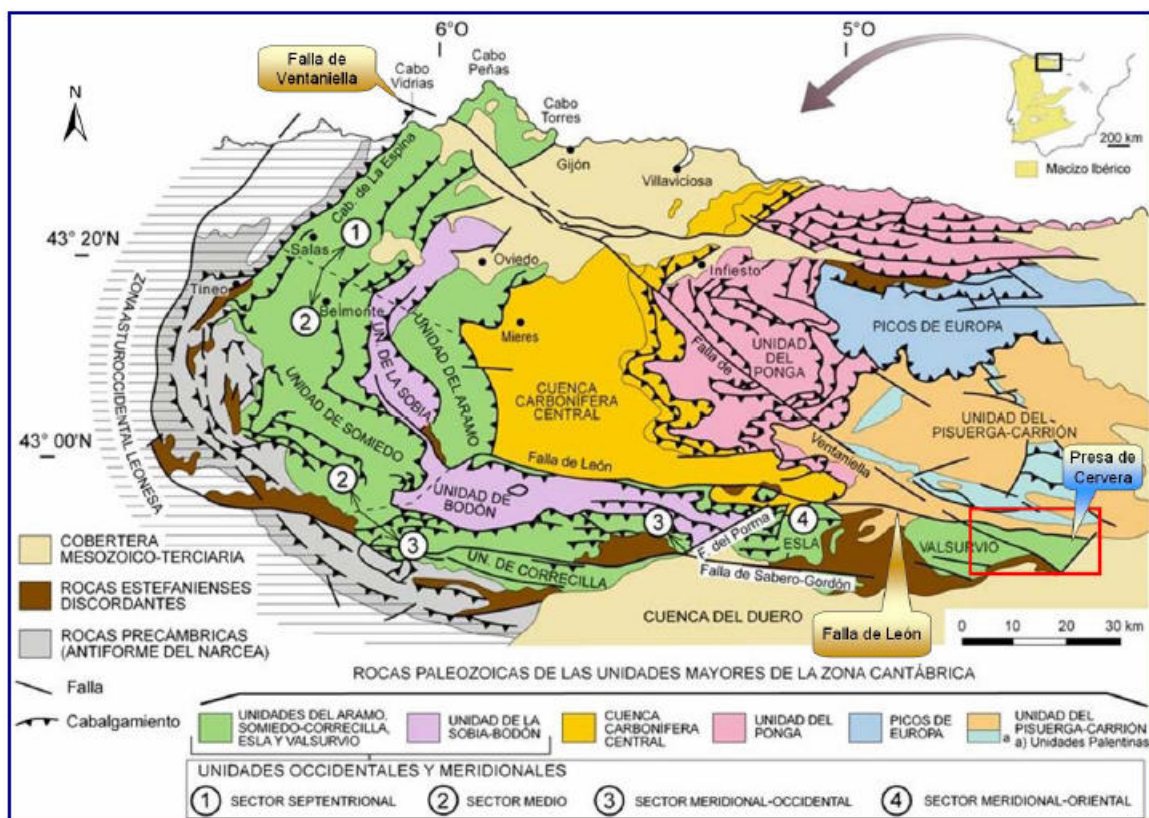


Figura 251. Regiones de la Zona Cantábrica (Julivert, 1967) modificado de Pérez-Estaún et al.(1988)

La presa se halla en materiales que corresponden a la denominada Región de Pliegues y Mantos (Julivert, 1967), en su sector más oriental. En este sector se diferencian dos grandes subunidades:

- Domo de Valsurvio: conjunto de escamas y pliegues isoclinales vergentes hacia el N o NE, plegados configurando una gran antiforma con plano axial subvertical.
- Separado del Domo de Valsurvio por la Falla de Ventaniella se halla la Unidad de la Sierra del Brezo (o de San Martín-Ventaniella), en la cual se enclava por entero el embalse y la presa de Cervera: se trata de un conjunto de escamas vergentes hacia el N, con configuración típica de la Región de Pliegues y Mantos, y relación discutible con el Domo de Valsurvio, dada a entidad de la gran estructura que los separa, la Falla de Ventaniella.

En la siguiente figura (Figura 252) se muestra en detalle la geología de la Unidad de la Sierra del Brezo.

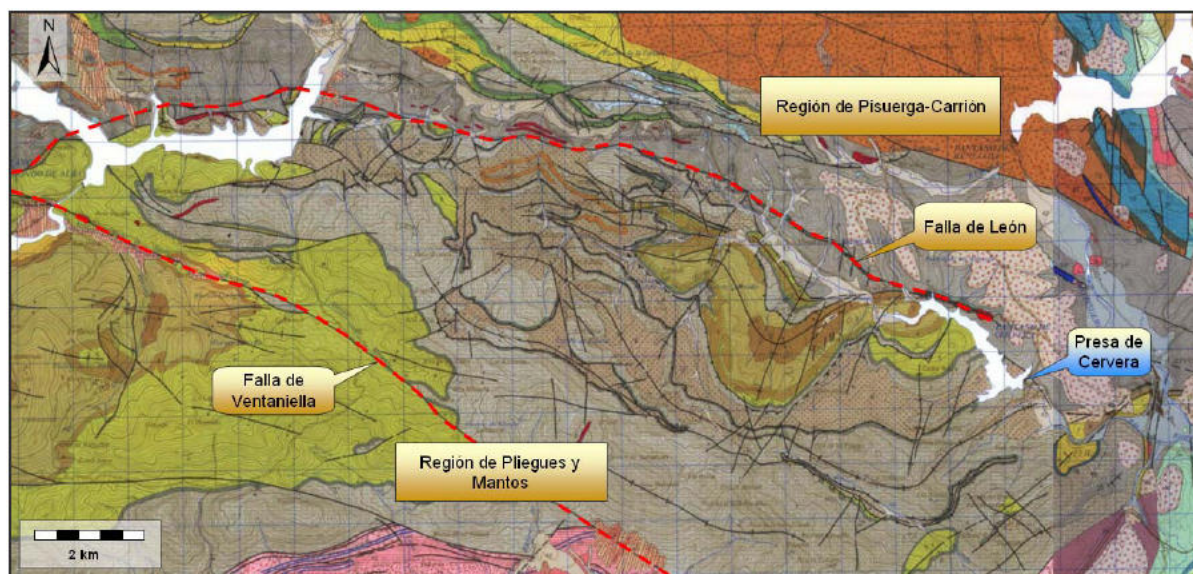


Figura 252. Unidad de la Sierra del Brezo (fuente. MAGNA)

Como se puede observar, la unidad se halla delimitada por dos grandes estructuras tardihercínicas:

- **Falla de Ventaniella:** se trata de una enorme falla que atraviesa todo el territorio asturiano, con dirección NW-SE, provocando la terminación brusca de estructuras existentes a ambos lados de la misma. Se trata de una estructura que estuvo activa durante todo el Carbonífero. En la zona del embalse, esta falla separa la Unidad de la Sierra del Brezo del Domo de Valsurvio.
- **Falla de León:** se trata de una fractura de entidad que recorre el S de Asturias y N de León con orientación W-E. Hay que destacar que al N de Camporredondo de Alba, la falla de Ventaniella desplaza a la de León. En la zona del embalse, esta falla actúa de límite con la Región del Pisuerga-Carrión.

El conjunto de materiales que quedan delimitados entre las dos estructuras descritas, constituye la base sobre el que se asienta la presa de Cervera, la cual se halla muy próxima a la falla de León, y por lo tanto, al contacto entre la Región de Pliegues y Mantos y la de Pisuerga-Carrión.

Unidad de la Sierra del Brezo

Como ya se ha comentado anteriormente, la Unidad de la Sierra del Brezo se ha definido como tal debido a sus características litoestructurales, constituye el conjunto de materiales sobre el que se asienta la presa de Cervera.

Las características generales de esta Unidad son las siguientes:

- El horizonte de despegue de los cabalgamientos se sitúa en las calizas nodulosas de la Formación Alba o Genicera (Carbonífero inferior). Cabe destacar el paralelismo de la



superficie de despegue con respecto a la estratificación del alóctono, el cual se ubica en materiales siliciclásticos por encima de la caliza de montaña. Esta característica configura una disposición estructural clásica de los cabalgamientos, en forma de “escaleras”, con rampas cortas y superficies planas continuas.

- De acuerdo con la estructura en “escalera”, se superponen varias escamas que aparecen en la zona:
 - Escama de Ramadores. Constituye el relieve más destacado al S de la presa de Cervera y de la población de Ruesga (Pico del Roblillo, Peña Redonda). Es la escama que cabalga al resto de unidades y tiene como horizonte de despegue la formación Alba. Se trata de la escama sobre la que se asienta la presa de Cervera.

Esta escama muestra una estructura de gran continuidad, si bien hacia el SW de la presa de Cervera sufre un giro, cambiando la orientación de NW-SE a SW-NE, finalizando en la falla de León junto a la cerrada de la presa. Este detalle es importante puesto que condiciona la disposición estructural de los materiales en el entorno inmediato de la presa.

Por otro lado, al SE de la población de Rabal de los Llanos (S de la cola del embalse de Cervera), la escama de Ramadores se imbrica de forma que se individualiza una subescama de la misma.



Imagen 39. Población de Ruesga y Pico del Roblillo, en la escama de Ramadores

- Escama de la Mata. La escama de Ramadores se superpone a la escama de la Mata, la cual llega a aflorar en alguna ventana tectónica en el pico Roblillo, y sobre todo en el valle que llega al embalse de Cervera desde el Sur, y en todo el entorno del Alto del Sestil

y Castro Negro, cimas dominantes del embalse por el SW. El horizonte de despegue de esta escama suele ser la caliza de Montaña (Carbonífero inferior- Namuriense), o bien formaciones devónicas.

Esta escama presenta mayor espesor de materiales terrígenos (lutitas, areniscas y conglomerados) de edad Carbonífero superior (Westfaliense) que la escama de Ramadores, en la cual aparecen en Ruesga. Constituye los materiales del vaso del embalse, junto con los materiales devónicos del autóctono relativo.

La siguiente figura (Figura 253) muestra la ubicación de las escamas descritas, en relación con el embalse de Cervera.

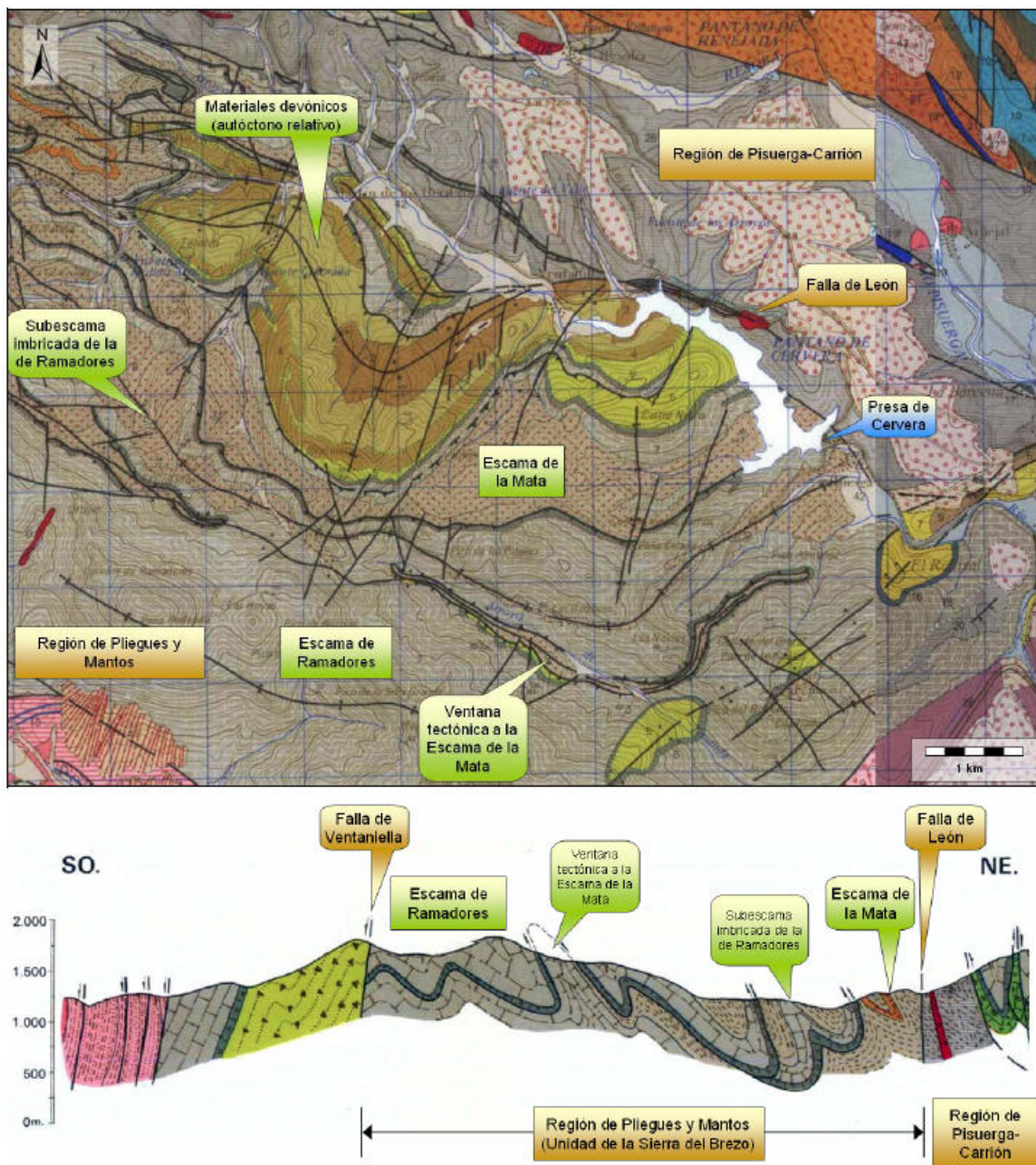


Figura 253. Geología y corte orientativo mostrando las escamas de la Unidad de la Sierra del Brezo



Imagen 40. Escamas en el SW del vaso del embalse

Detalles litológico-estructurales de la Unidad de la Sierra del Brezo

De acuerdo con las descripciones anteriores, y con objeto de centrar la geología de detalle en el entorno inmediato de la cerrada del embalse de Cervera, se destacan las siguientes características:

- Existen dos secuencias de materiales carboníferos en el vaso del embalse, que corresponden a dos escamas diferentes, aunque de constitución similar:
 - La escama más superficial, denominada *escama de Ramadores*, despega en la formación Alba (calizas nodulosas del Carbonífero inferior), y contiene por encima de ella un paquete de Calizas de Montaña y, localmente (en Ruesga), lutitas, areniscas y conglomerados del Carbonífero superior- Westfaliense. La presa de Cervera se apoya directamente en las Calizas de Montaña.
 - La escama subyacente, denominada *escama de la Mata*, muestra a techo un mayor espesor de lutitas, areniscas y conglomerados del Carbonífero superior- Westfaliense (sobre los que se halla buena parte del vaso del embalse), y por debajo de ellos se halla la caliza de montaña, la formación Alba y después la serie devónica.

Por lo tanto, es de prever que en la cerrada de la presa de Ruesga se halle la caliza de montaña (la cual aflora), y por debajo la formación Alba y la secuencia completa de la *escama de la Mata*.

- De acuerdo con la orientación estructural general de la Unidad, se produce una flexión de todas las estructuras, con cambio de orientación principal de NW-SE a SW-NE, finalizando bruscamente contra la falla de León.

Este hecho va a condicionar que los principales ejes de pliegue y cabalgamientos, muestren orientación SW-NE, y por lo tanto, los buzamientos más frecuentes sean NW o SE, si bien, así como a gran escala las estructuras son muy homogéneas, a pequeña escala existen numerosas estructuras y deformaciones de adaptación a las escamas.

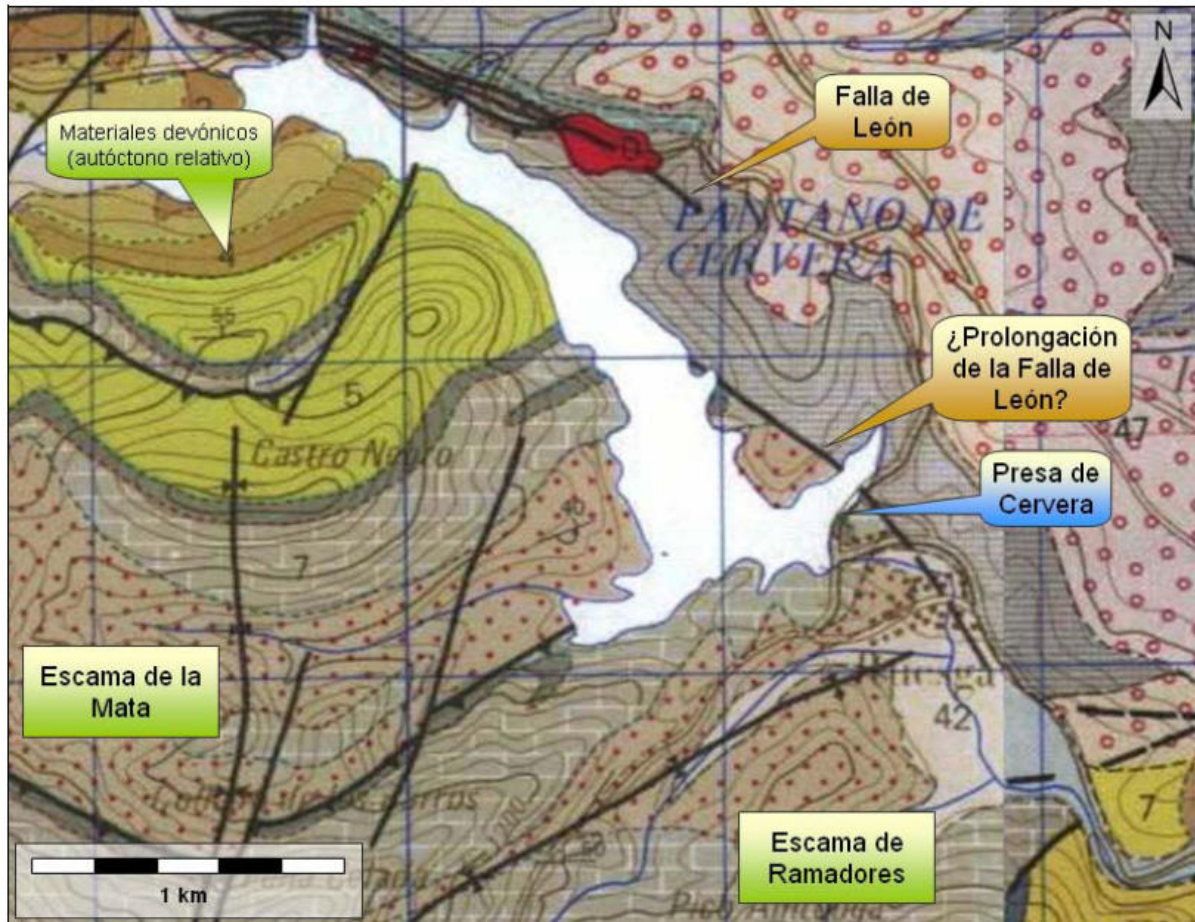


Figura 254. Detalle estructural en el entorno del embalse (MAGNA).

- Los dos valles transversales junto a la cerrada, los cuales vierten aguas hacia el valle principal, tienen su origen en el cabalgamiento basal de la *escama de Ramadores*. Tal hecho sugiere una cierta continuidad de las calizas de montaña hasta la falla de León.
- Se pueden apreciar pliegues en la formación Alba y en las calizas de montaña que indican la presencia de la falla de León y el “choque” de estas formaciones contra la misma. Tal hecho tiene lugar en la cerrada de la presa y su entorno inmediato. La falla de León no coincide exactamente en este sector con la trayectoria a cola del embalse, por ello, es conocida en este sector como “*falla de Ruesga*”.
- La presencia de un mayor espesor de materiales del Carbonífero superior en Ruesga, por encima de la caliza de montaña, indica la inmersión del eje sinclinal que viene del SW, y por lo tanto la presencia de mayores espesores de caliza de montaña en la cerrada.

- Si se observa la foto de satélite de la zona (Figura 255), se puede apreciar una cierta orientación de las estructuras, que permite adivinar una adaptación a la falla de León en la cerrada de la presa. Tales observaciones serán objeto de revisión en campo.



Figura 255. Foto de satélite con interpretación estructural de visu

7.3.- Antecedentes históricos

La problemática que suscita el presente trabajo, se relaciona con la presencia de filtraciones de entidad en la presa, asociadas con desarrollo kárstico a favor de fracturas y/o diaclasas existentes en la caliza de montaña. Tales filtraciones son más importantes en la margen derecha de la presa, pero también existen en la izquierda, aunque son de menor entidad.

Como reseñas sobre las filtraciones y otros aspectos importantes, cabe destacar de forma cronológica:

- La presa se comienza a construir en el año 1.914 y se termina en el año 1.923. La presa se ubica sobre calizas, las cuales están “acentuadamente fisuradas y cavernosas” en el estribo derecho.

- En mayo de 1961 se realiza una visita de inspección en la que se destaca que se registran pérdidas importantes en el terreno de cimentación y en el estribo derecho, por lo que se recomienda inyectar el macizo de la presa. Aconsejan hacer correcciones locales de las filtraciones, como ya en otras ocasiones se había hecho.
- En abril de 1963 se destaca la existencia de una sima en la caliza a cota aproximada 1.040 msnm en la que se producen grandes pérdidas. En la visita se destacan también filtraciones en el cuerpo de presa, y sobre todo en el contacto presa-terreno. El conjunto de filtraciones se estima en 1,3 m³/s.

Se propone estudiar la sima de la ladera derecha y drenar el contacto presacimiento mediante taladros.

- En mayo de 1964 la lámina se halla a 20 cm del labio del aliviadero (casi lleno) y las filtraciones se estiman en 2,5 m³/s (conjunto margen derecha y cimiento). Se trata de 0,5 m³/s más que el año anterior a la misma cota. Se cita que la sima de la ladera derecha ha aumentado considerablemente. Se recomienda la ejecución de taladros, de acuerdo con el siguiente esquema:

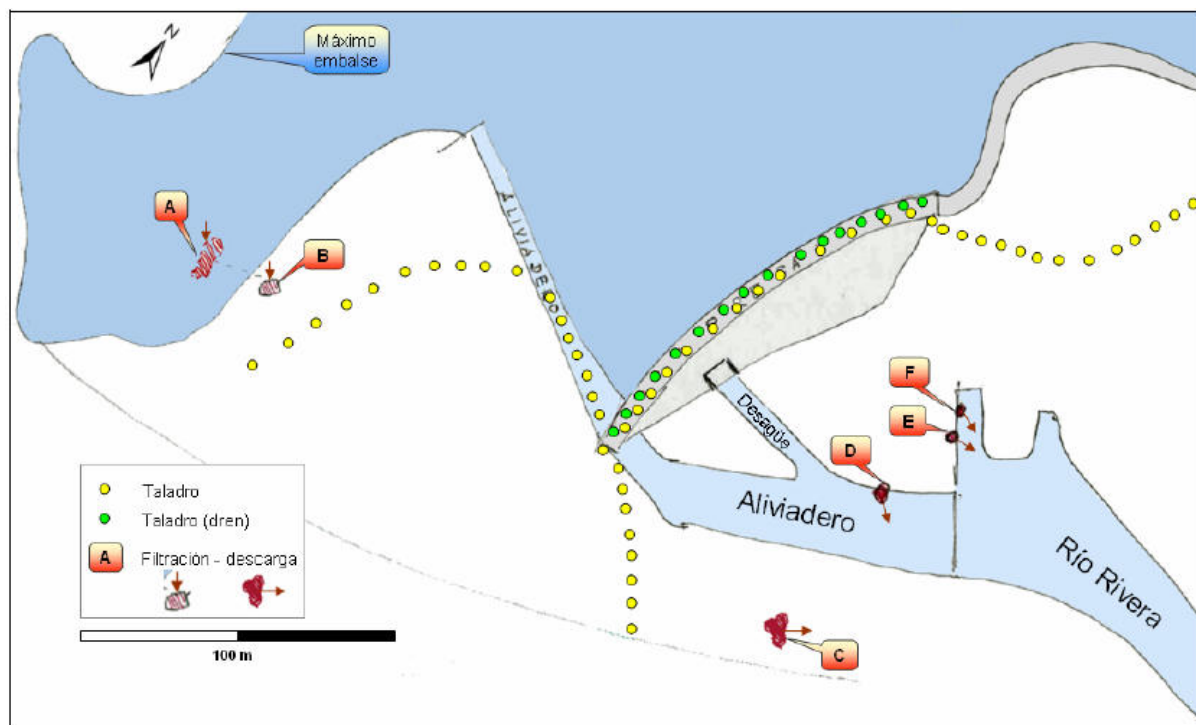


Figura 256. Esquema de proyecto de impermeabilización y mejora de la presa e instalaciones del embalse de Cervera (Ingeniero Don Manuel M^a Jiménez Espuelas)

El 1 de mayo de este mes, se ha producido un embudo en B y en las salidas C, E y F sale agua turbia.



El día 18 de mayo, sin que el agua alcance la boca A, se aforan 1,8 m³/s de filtración (el año anterior eran de 1,5 m³/s con la misma cota). El día 22 de mayo, al bajar el embalse 3 m, deja de salir agua por C y D, manteniéndose E y F.

Se destaca el aumento significativo del volumen de filtraciones en el último año, y el desplazamiento antiguo de una estalactita y una estalagmita en el soplado, con la iniciación de una nueva estalactita.

- En agosto de 1.964 se realiza una visita de inspección, y se destaca en la nota informativa correspondiente el “sobrecogimiento del ánimo de cualquier ingeniero ante la lectura de todas las notas informativas, ya que se ponen de manifiesto todos los posibles defectos de las presas...”. Ante tal situación, se propone que no se vuelva a embalsar en el embalse de Cervera, ante la posibilidad de un desastre.
- En enero de 1.965 se redacta un informe en el que se cita que al intentar taponar temporalmente las entradas visibles de filtraciones para reducir su caudal en el momento que se lleve a cabo la impermeabilización, se descubren amplias cavernas en el macizo calizo del estribo derecho, con secciones transversales máximas de 20 m² y mínimas de 0,5 m², con recorrido visitable de 80 m, y niveles de agua comprendidos entre el nivel máximo de embalse y la cota del río. Como medidas de precaución se ejecutan tapones urgentes en zonas estrechas de la galería, y se mantienen los desagües de fondo permanentemente abiertos.
- Un mes después, en febrero de 1.965, se realiza una nueva visita al embalse y la cueva, estando el embalse completamente vacío (desagües de fondo abiertos). Se corroboran las enormes dimensiones, así como el desplazamiento entre la bóveda y el suelo (movimientos antiguos, anteriores a la presa).

También se cita la existencia de una surgencia en caverna, también en la margen derecha del embalse, pero hacia la cola del mismo, y se asegura que procede de una filtración en la margen izquierda del embalse de Camporredondo.

Las turbiedades detectadas en las filtraciones y citadas en notas anteriores (mayo 1.964) se achacan a desprendimientos junto a las entradas de agua, unos 100 m aguas arriba de la presa, y en el último metro del embalse.

Se propone una galería de drenaje en el macizo kárstico, a ambos lados de la presa. En el corte siguiente se puede apreciar el macizo carbonatado limitado por afloramientos de “cayuela” o pizarra a muro y a techo (Figura 257).

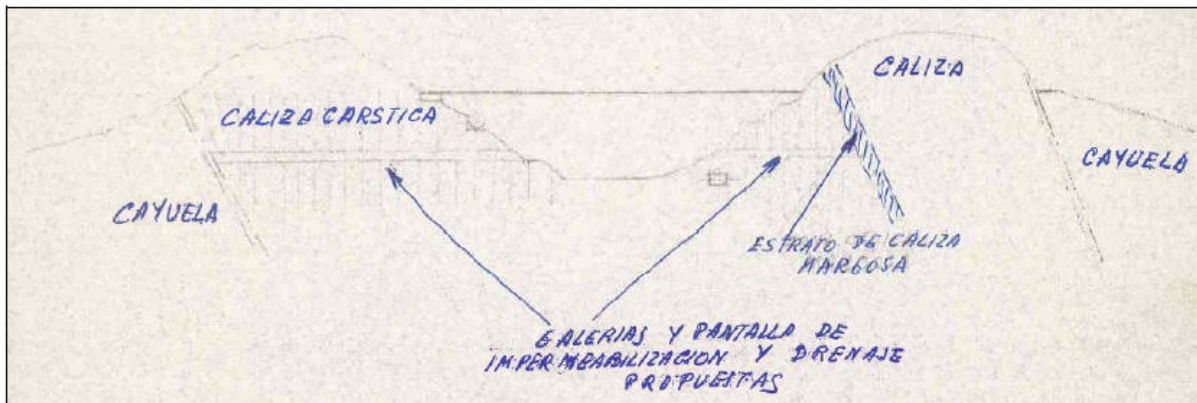


Figura 257. Corte (S-N) de la presa y galerías de drenaje

En marzo de 1.965 se precisan mejor las particularidades de las futuras obras de impermeabilización y drenaje (Figura 258).

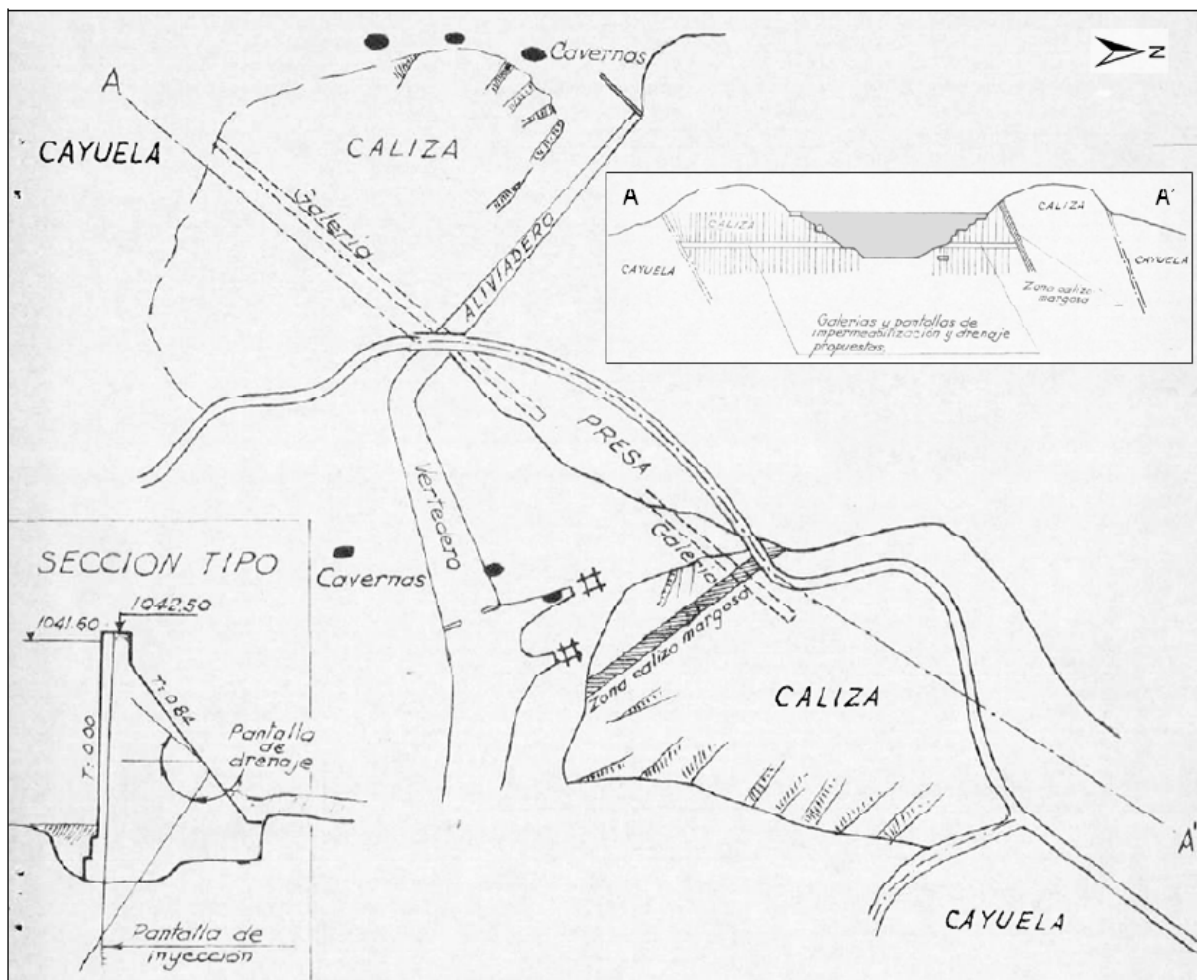


Figura 258. Detalles de las futuras obras de impermeabilización de la presa



- En abril de 1.965 se visita la presa, y ya se han hecho tapones en soplados y grietas de la margen derecha, pero se duda de su eficacia. Se indica que los trabajos del proyecto de impermeabilización deben de comenzarse en verano, aprovechando el estiaje.
- En agosto de 1.965 se visita la caverna, y se supervisan los tapones realizados que alcanzan una cota próxima a 10 m por encima del río. Se comprueba que la caverna no está inundada. Se discute la ejecución de la doble pantalla de impermeabilización y drenaje en la presa, planteándose la posibilidad de hacer una de ellas al pie, aguas abajo. La Confederación Hidrográfica del Duero no es partidaria de la ejecución de las galerías de drenaje, y por lo tanto las inyecciones se realizarán desde el exterior.
- En septiembre de 1965 comienzan los trabajos de impermeabilización, consistentes en taladros de 4-5 m de profundidad separados 6 m entre si. Se inyecta el relleno, con baja admisión y sin energía eléctrica.
- En octubre de 1.965 se reperforan los taladros y se inyectan 3 profundos (nº1 de 22,5 m, nº5 de 34 m y nº7 de 36,4 m). En casi todas las inyecciones se observa salida de lechada por el paramento y/o la calzada de la carretera, observándose además, una fuerte fisura en la misma. Es frecuente la comunicación de lechada entre taladros y además, no se consigue cerrar totalmente el desague de fondo.
- Entre noviembre y diciembre de 1965, los taladros de coronación de presa se han inyectado hasta 30-35 m y se han prolongado hasta 50 m sin inyectar. En la margen izquierda se han perforado 3-4 de 50 m salvo uno que se abandonó a 18 m por pérdida total de agua (1 l/s). En la margen derecha se perforan los taladros hasta pérdida total. En general, se perfora hasta 50 m siempre que no haya grandes pérdidas, en cuyo caso, se pasa 1 m por debajo de la fuga. Si se exceptúa la presa, en general, en los 30 m superiores no se han hecho inyecciones.

Se ha perforado un taladro de 100 m de profundidad en el centro de la presa para investigar la posibilidad de encontrar pizarras, ya que se interpretó que las pizarras de la margen derecha se situarían por debajo de la caliza, terminando la caliza en un pliegue muy fuerte en la cerrada (sinclinal de eje inclinado), que ha motivado el espigón calizo de la cerrada, y el hecho de que aparezcan pizarras por debajo (en la margen derecha) y por encima de la misma (en la margen izquierda).

Las fugas parecen localizarse en la zona del aliviadero, en donde se van a hacer ensayos con colorantes.

En la cresta del estribo derecho se han localizado unas zonas de pizarra que no se conocían, y que podrían acortar sensiblemente la pantalla en esta zona. Los sondeos en esta zona dan, a poca profundidad, una arcilla gris que pudiera estar relacionada con estas pizarras.

- En febrero de 1.966 se realiza una visita, y las obras de impermeabilización están casi finalizadas. La profundidad media de las inyecciones es de 50 m, excepto algunos



taladros del aliviadero, que por dar pérdidas importantes a escasa profundidad están pendientes de inyección. Las pruebas de colorantes se han realizado, para marcar los caminos de permeabilidad más fuertes (no hay datos).

- En abril de 1.966, el embalse alcanza la cota 1.038,60 (3 m por debajo del labio del aliviadero). En estas circunstancias, a la misma cota el año anterior las filtraciones se evaluaban en 1,3 m³/s, mientras que ahora son de 10 l/s entre los puntos F.1 y F.2 (ver figura). Estas filtraciones se deben en parte a los túneles de toma de la margen izquierda, los cuales se hallan sin revestir.

Cuando el embalse alcanzó su cota máxima (26 de abril), la filtración total alcanzó los 200 l/s, frente a los 1.800 l/s de la campaña anterior. Surgen las filtraciones F.3 y F.4 (Figura 259), siendo esta última de cota excepcionalmente elevada (1.035 msnm).

Como conclusión de los trabajos realizados, se destaca la efectividad de los mismos, dada la reducción de las filtraciones.

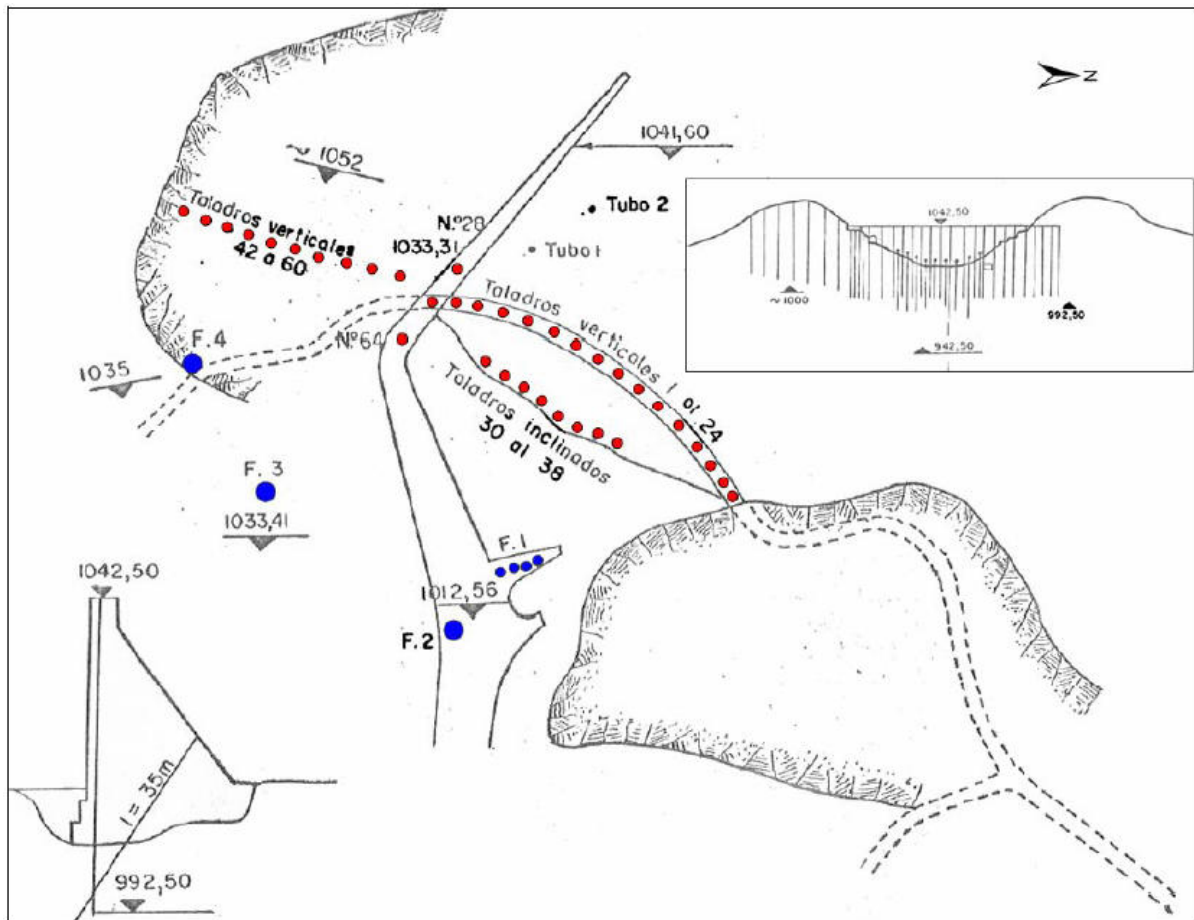


Figura 259. Ubicación de taladros, filtraciones y acotaciones



- En junio de 1966, el embalse se halla 1,40 m por debajo de su cota máxima, y el caudal de filtraciones aforado es de 30 l/s. Se estaban perforando taladros en el contacto entre pizarras y calizas en el acceso a la presa por la margen derecha, en donde quedaba una pequeña filtración (F4?) cuando se produce un nuevo afloramiento de agua en 3 ó 4 puntos distintos. Además se observan dos salidas de agua en el hastial derecho del canal del aliviadero.
- En julio de 1966 quedan únicamente unas pequeñas surgencias en la margen derecha a cota elevada, lo cual denota la sensible elevación alcanzada en el nivel freático, y por lo tanto la eficacia de las inyecciones realizadas. Las fugas de la margen izquierda se consideran especiales y la inyección no es factible.
- Se propone el revestimiento de las diaclasas en el interior de los túneles, e incluso el cierre de los mismos aguas arriba. El caudal total aforado, con el embalse lleno, es de 50 l/s.
- En diciembre de 1967, el estado de las filtraciones se mantiene, por lo que no se teme por la seguridad de la presa.
- En mayo de 1968, la filtración existente en el estribo derecho, en el contacto entre las pizarras y las calizas en las que se apoya la presa, aumenta de 30 l/s a 105 l/s (frente a los 2.500 l/s existentes antes de la impermeabilización). En el comienzo de este aumento, se ha detectado turbidez que se interpreta como de lavado de arcillas (destaponamiento), o de inyecciones. La descarga de los 105 l/s tiene lugar por la parte baja de la margen derecha. Se han hecho pruebas con colorantes, y se evalúa el tiempo de recorrido en 30 minutos (rápida, y por tanto kárstica).

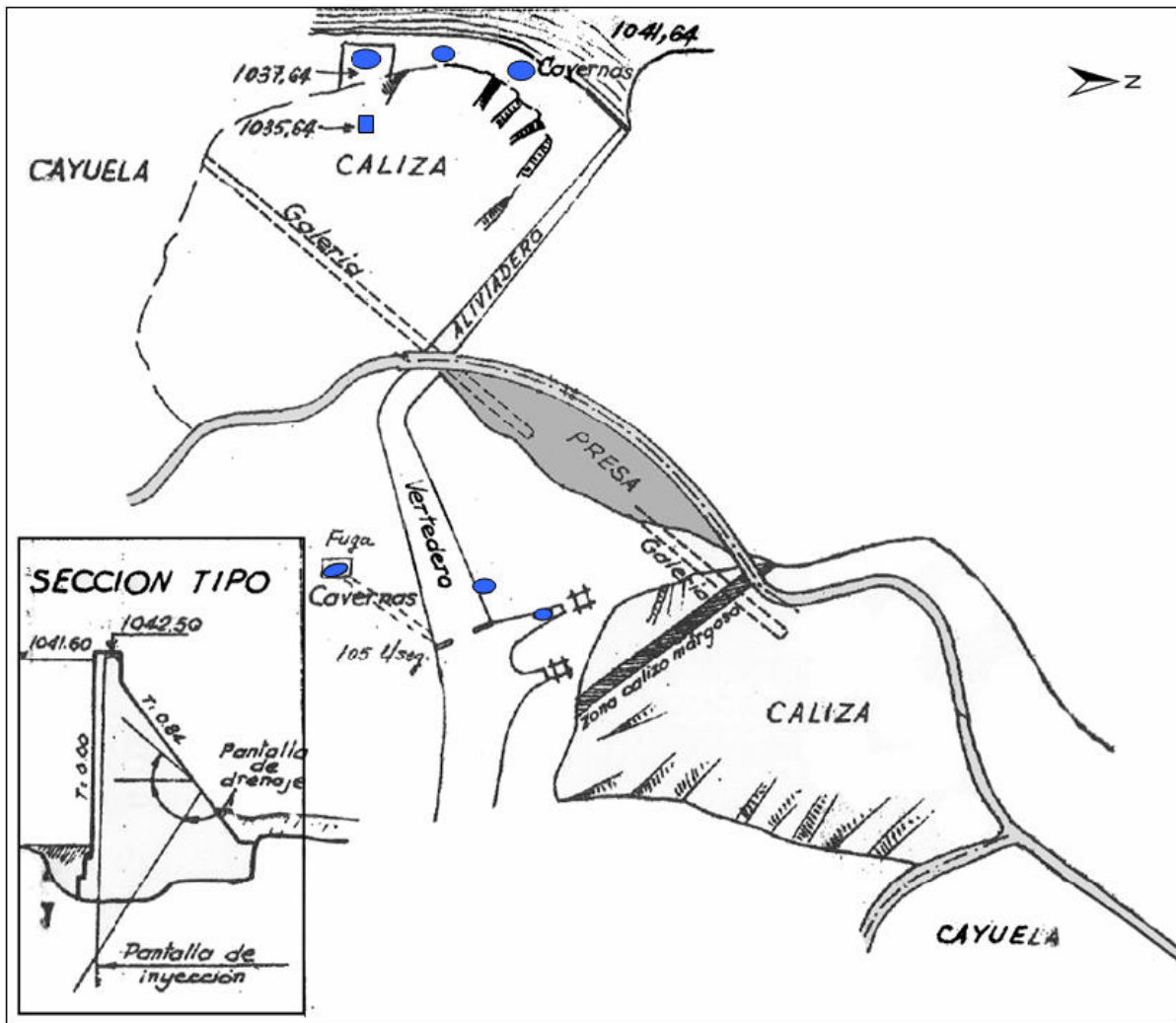


Figura 260. Ubicación de filtraciones y acotaciones

Se cita que se van a llevar a cabo impermeabilizaciones en las entradas situadas aguas arriba de la presa.

Entre mayo y septiembre de 1.968, se lleva a cabo un seguimiento de las filtraciones, y se comprueba que la respuesta de las mismas por debajo de la cota 1.039 msnm es normal y coherente con las inyecciones realizadas. En cambio, entre las cotas 1.039 y 1.042 msnm la respuesta corresponde al funcionamiento de las cavernas (ver gráfica Figura 261).

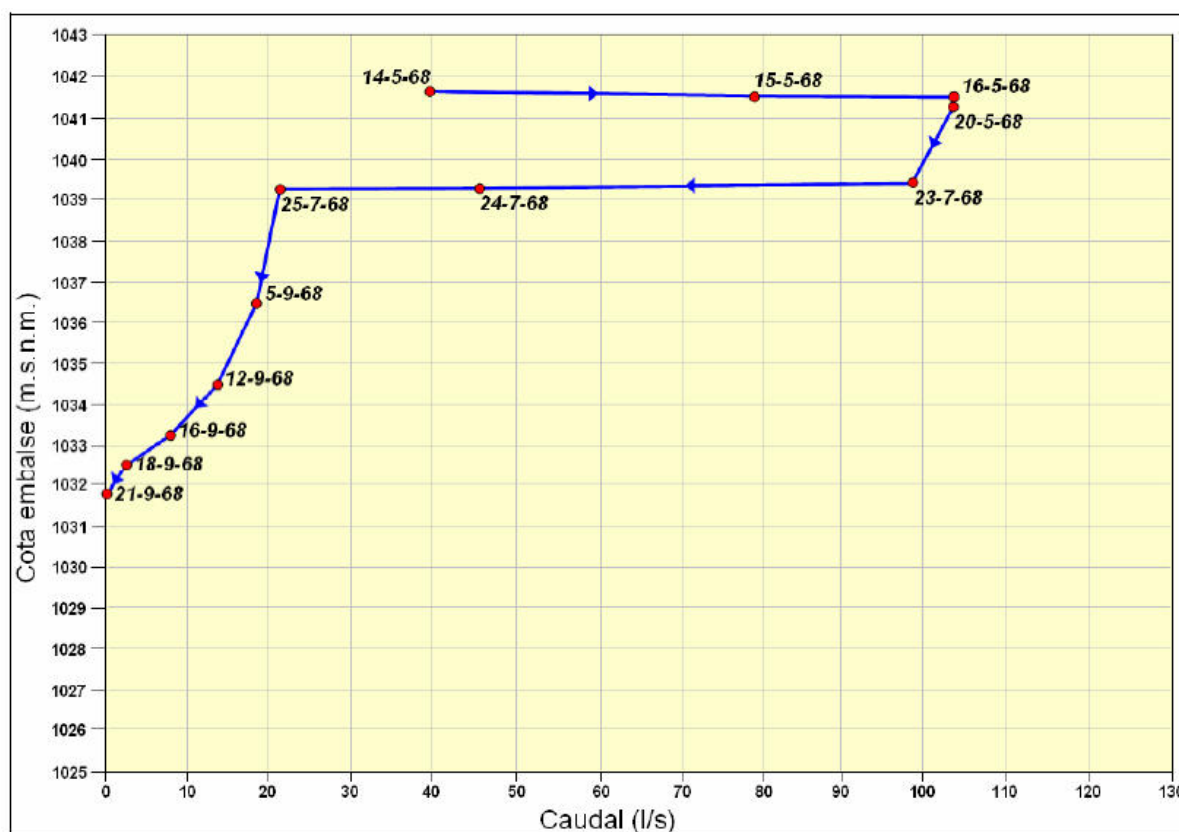


Figura 261. Evolución de filtraciones con la lámina de embalse

Se plantea la posibilidad de rellenar la caverna, la cual es visitable hasta cota 1.027 msnm, mediante la realización de un filtro invertido, haciendo circular arena y grava, después arena fina, arcilla de relleno y finalmente hormigón.

- Después de un lapso importante de tiempo, en abril de 1.978 las filtraciones se cuantifican en 350 l/s con el embalse lleno. Se ha localizado la filtración en la cueva, por lo que se ha rellenado el hueco con mortero, disminuyendo las filtraciones hasta 28 l/s.
- En abril de 1979, se detecta un aumento de turbidez y aumento de caudal de filtraciones hasta 350 l/s, debido a que probablemente ha fallado el relleno de la cueva.

En mayo de 2.005, las filtraciones se cuantifican en 1.000 l/s, ya que estas han comenzado a aumentar en el año 2.000. Se han realizado las siguientes observaciones:

- Se comprueba que cuando la lámina de embalse baja a cota 1.032, las filtraciones desaparecen.
- En años anteriores se han detectado remolinos en la lámina de agua, en la zona del embarcadero, en donde la roca está revestida de hormigón.



- Se lleva a cabo una visita a la cueva, cuando la lámina se halla a menos de 20 m sobre el cauce. A la cueva se desciende por unas escaleras que finalizan en una plataforma de hormigón. Desde ahí se avanza longitudinalmente 8 m, mientras que hacia la derecha se puede observar una caída en la que se observan varios huecos, y que finalmente se concretan en dos galerías. Se desciende por ambas galerías hasta una cota que se aproxima a la 1.021,34 y 1.025,01 en cada una de ellas (el río se halla a cota 1.012 msnm), observándose que la más limpia y con probable circulación es la primera.

Se propone el hormigonado de estas dos galerías en su fondo, con objeto de taponar la salida de aguas abajo.

Por lo que respecta al estribo izquierdo, el número de fugas es mayor, pero su volumen es mucho menor y se propone una pantalla de impermeabilización.

En junio de 2.005 se lleva a cabo un levantamiento espeleológico, en la que el espeleólogo logra alcanzar casi la cota de F3 (1.033,45 msnm). En horizontal se recorrieron unos 20 m (a unos 200 m de la surgencia). Se destaca la existencia de pizarras en el collado situado a 150 m al Sur del estribo derecho de la presa, y su posible existencia en la zona de surgencia, justificando la descarga. Su existencia bajo la presa quedó descartada al realizar un sondeo desde coronación (sondeo nº11) que alcanzó la cota 942,50 msnm (100 m de profundidad), sin que se encontrara pizarra alguna.

En este mes, las filtraciones totales alcanzaban los 1.100 l/s, correspondiendo 900 l/s a la surgencia kárstica.

En el año 2.008 se realiza el documento XYZT de la Presa de Cervera, en el cual se recoge una breve descripción del encuadre geológico del embalse y cerrada, junto con un mapa geológico regional.

A modo de resumen, y a la vista de todos estos datos, podrían destacarse desde un punto de vista geológico e hidrogeológico los siguientes aspectos:

1. Históricamente ha existido una confusión entre las pizarras (denominadas en algunas notas “*cayuelas*”) situadas en la margen izquierda y la derecha. Se pensó que se trataba de la misma formación y ello condicionó el pensamiento de que debían situarse debajo de la presa y girar en forma de sinclinal con flanco invertido. Este aspecto se aclarará más adelante.
2. Es evidente que las inyecciones han contribuido notablemente al descenso de volumen de filtraciones (2,5 m³/s en mayo de 1.964), y su efectividad permanece, al menos en la presa. La evolución del volumen de descarga en el sistema kárstico indica que el hormigonado en el interior de la cueva ha dejado de ser efectivo, y vuelve a estar funcionando normalmente.
3. Se indica la existencia en la cueva de un desplazamiento entre la bóveda y el suelo, debido a la existencia de una estalactita desplazada respecto a su estalagmita. Esta información ha de ser tomada en cuenta con mucha precaución, deben de analizarse otros aspectos, ya que un desplazamiento (en principio brusco) muestra signos evidentes del mismo. En cualquier caso,



estos hechos son muy anteriores a la construcción de la presa, y por lo tanto no son una consecuencia de la misma.

4. Un aspecto importante que se cita en noviembre de 1.965, es que los taladros han alcanzado una profundidad promedio de 50 m, y las inyecciones no se han hecho en los 30 m superiores (excepto en la presa, donde la inyección es completa). Tal hecho enlaza con la aparición de una surgencia (denominada F.4) a una cota elevada (1.035 msnm) y más alejada de la presa (hacia las pizarras), y otra surgencia (F3) a una cota menor (1033,41 msnm) en abril de 1.966. En junio del mismo año las filtraciones no superan los 30 l/s con el embalse a 1,40 m de su cota máxima, y aparecen nuevas surgencias en 3 ó 4 puntos a misma cota y en el hastial derecho del canal del aliviadero. Estos datos han de interpretarse como que la caverna se halla casi totalmente taponada y el agua no ha encontrado otra salida, circulando a través de diaclasas superficiales independientes del sistema kárstico. Es decir, no existen otros sistemas kársticos o fracturas de importancia por las que pueda circular el agua, únicamente la caverna por todos conocida.

5. En coronación de presa se llevo a cabo la ejecución de un sondeo (sondeo n°11) de 100 m de profundidad con objeto de alcanzar las pizarras que supuestamente se hallaban por debajo de la misma. Se alcanzó la cota 942,50 y no se halló pizarra alguna (78 m por debajo de la surgencia kárstica) (Figura 262).

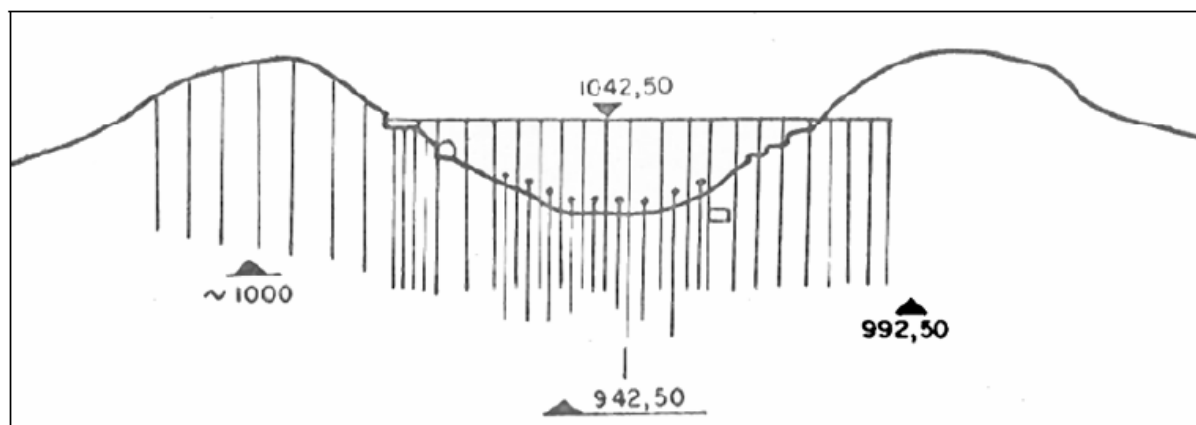


Figura 262. Esquema de profundidades de taladros (no a escala)

En febrero de 1.966 se hicieron pruebas de colorantes con objeto de marcar los caminos de permeabilidad preferente. De tales pruebas no existe información alguna. En mayo de 1.968 se hicieron pruebas con colorantes y se evaluó el tiempo de recorrido de la filtración en 30 minutos.

7. En noviembre de 1.965 existe un comentario sobre las pizarras sobre el que no existe otra referencia en texto alguno. Se detecta la existencia de un afloramiento de pizarra no conocido hasta el momento, y se relaciona con la aparición de una arcilla gris en algunos taladros. Sobre esta pizarra se comentará más adelante.



8. Entre mayo y septiembre de 1.968 se llevó a cabo un seguimiento de las filtraciones, en el que destaca el funcionamiento uniforme de las filtraciones hasta cota de embalsado 1.039 msnm. A partir de esta cota debe de interpretarse los volúmenes registrados de la siguiente manera:

- El volumen de filtración aumenta bruscamente cuando la lámina alcanza la cota 1.039,2 hasta llegar a la cota 1.039,3. Se ha de buscar una entrada a esta cota.
- El volumen se mantiene más o menos constante (aumenta ligeramente) entre las cotas 1.039,3 y 1.041,5. Se alcanza un volumen máximo de 105 l/s. Esto se ha de interpretar como no existencia de más entradas entre estas cotas y un aumento de filtraciones por presión hidrostática.

En los diferentes croquis y esquemas existentes, se muestran diferentes entradas de agua existentes en una zona próxima a la línea de máximo embalse. En concreto, en el esquema de mayo de 1968, se indican tres filtraciones situadas por debajo de la caverna (cota de la boca a 1.041 msnm), a cota 1.037,64. Se trata de filtraciones sobre las que no existe información alguna, que en teoría han sido obturadas mediante un hormigonado. Estas filtraciones coinciden con la situación de observaciones de remolinos en tiempos recientes.

7.4.- Reconocimiento geológico de detalle

Se ha realizado un reconocimiento geológico de detalle en campo, con el objetivo de corroborar las observaciones realizadas en las diferentes visitas previas, y servir de base para los trabajos de geofísica. A modo de síntesis, las principales observaciones de relevancia geo/hidrogeológica recopiladas en las diferentes notas se muestran en la siguiente figura (Figura 263):



Figura 263. Principales observaciones recopiladas de bibliografía

Teniendo presentes estas observaciones, se ha llevado a cabo un reconocimiento de campo, que puede ser dividido en 4 sectores:

1. Estribo izquierdo de la presa.
2. Estribo derecho de la presa y cerro¹⁹.
3. Surgencia.
4. Sector suroeste del cerro.

Estribo izquierdo de la presa

En el primer caso, en el estribo izquierdo de la presa (Figura 264), existe un importante afloramiento calizo en cuyo techo aparente aparecen pizarras y areniscas de forma concordante.

¹⁹ Se designa como “cerro” a la colina que constituye la margen derecha de la cerrada, en el cual se ubican las filtraciones objeto de estudio.



Figura 264. Observaciones en el estribo izquierdo de la presa

Cabe destacar que:

- Existen estrías de falla junto a la carretera (curva encima de la casa de la presa). Aunque los buzamientos entre la caliza de montaña y las pizarras y areniscas de la región de Pisuerga-Carrión (Formación Cervera) son similares, el contacto entre ambas formaciones es mecánico mediante una fractura N-S que se encamina hacia la zona de surgencia. La formación Cervera cambia de orientación a medida que nos alejamos de la presa.
- Se aprecia una estructura en forma de sinclinal tumbado en la caliza de montaña sobre la que se apoya la presa. Para justificar esta estructura, es necesario pensar que lo que se observa en superficie es el flanco invertido, hecho que apoyaría la ausencia de calizas hacia el Norte.

Estribo derecho de la presa y cerro

En el caso del estribo derecho de la presa, y el cerro que se sitúa sobre ella (Figura 265), se resumen en la siguiente figura las siguientes observaciones:



Figura 265. Observaciones en el estribo derecho de la presa y en el cerro

Se trata de un sector en el que se aprecia una cierta “flexión” en la orientación de las estructuras, pasando de orientaciones de buzamiento 45°N a 10°N .

- Existe un cambio muy importante entre el sector NE y el SO de la caverna: se aprecia en el terreno la ausencia de afloramientos de caliza y el predominio de dolomías con grandes cristales de espato masivo hacia el SO. En cambio, los afloramientos de caliza hacia el NE son abundantes. Este hecho ha de interpretarse por la existencia de una fractura importante, dada la abundancia de dolomías.
- Existen lineaciones visibles de ortofoto, en las que en el campo se encuentran dolomías. Esas lineaciones corresponden a fracturas de gran ángulo (80°) que terminan bruscamente en la gran fractura anteriormente citada.
- Resulta complejo diferenciar entre buzamientos de capas y el sistema de fracturación del macizo. En principio, los buzamientos de la caliza oscilan entre 38 y 50° con inclinación del buzamiento hacia el N. El diaclasado o fracturación del macizo buza hacia el S-SO con buzamientos próximos a 60° .



- Las pizarras que aparecen bajo las calizas muestran buzamientos ligeramente inferiores a las calizas (30°). Estas pizarras y areniscas muestran una tectonización interna muy importante, y corresponden a las lutitas, areniscas y conglomerados del Carbonífero Superior (Westfaliense), por lo que deberían de situarse a techo de las calizas de montaña. Esto quiere decir que la serie se halla invertida en este sector.



Imagen 41. Pliegues en las areniscas de la formación westfaliense



Imagen 42. Detalle del contacto caliza de montaña-pizarras westfalienses

- En el contacto con las pizarras se detecta además, un afloramiento de un paquete calizo con niveles de lutitas a techo (Imagen 43). Es probable que se trate de un pinzamiento o una falla imbricada de otra mayor.



Imagen 43. Paquete de caliza de montaña con un pequeño afloramiento lutítico a techo (y debajo)

- Existe un pequeño afloramiento lutítico-pizarroso entre el mirador y la presa, el cual ya se citaba en la bibliografía (noviembre de 1965). Es posible la relación entre este afloramiento y el paquete anteriormente citado, lo que indicaría la proximidad a la superficie de las pizarras westfalienses en el sector central del cerro.
- Se detecta en las pizarras westfalienses el cambio en la orientación detectado en las calizas del cerro.
- Se intuyen ciertas estructuras de plegamiento, pero el afloramiento existente no facilita su reconocimiento en campo.

Entorno de la surgencia

En el caso del entorno de la surgencia, los afloramientos calizos tienen tal disposición que no facilitan su interpretación. Llama la atención la apariencia del entorno inmediato de la surgencia, la cual parece indicar una excavación artificial. Se ha preguntado en campo por la posibilidad de que el lugar hubiera sido utilizado para extraer material, pero se desconoce tal hecho. En un reconocimiento hecho en la pared se han encontrado marcas de barrenos o taladros, lo cual corroboraría la excavación del lugar. Por otro lado, no se ha encontrado prueba alguna de afloramiento de pizarras en el lugar.



Sector Suroeste del cerro

Con objeto de comprender u obtener información adicional sobre la compleja existente en el cerro, se ha realizado un reconocimiento geológico de la zona Suroeste (Figura 266), zona en la que los afloramientos son más claros (probablemente porque presenten un grado menor de tectonización).



Figura 266 . Observaciones en el sector Suroeste del cerro

Como se puede observar en la figura anterior, la estructura general de la zona es homogénea (apreciable a simple vista en ortofoto), con lineaciones de orientación SO-NE y buzamientos hacia el NO y SE. Todo el sector corresponde a la escama de Ramadores y se tartariza en esta zona por pliegues en la caliza de montaña (incluyendo la superficie de despegue, con la aparición de ventanas tectónicas). La siguiente imagen muestra algunas de estas lineaciones plegadas (Imagen 44):



Imagen 44. Lineaciones plegadas en la ladera de la montaña

Al aproximarse al cerro, en el brazo de embalse situado al NO del cerro se produce una interferencia estructural importante, con un cambio brusco de orientación casi ortogonal. Además, se ha encontrado una zona de dolomitización (posible fractura) que corta bruscamente un eje anticlinal de orientación SO-NE con cierta inmersión en la zona de choque. A partir de este punto los buzamientos son coherentes con los encontrados en el cerro.



Imagen 45. Buzamientos hacia el Norte en la orilla del embalse (15°N/50°)



INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

A la vista del reconocimiento realizado en campo, y como base para la geofísica que se lleve a cabo, la zona se interpreta como sigue:

1. Formación de calizas de montaña plegada con ejes de orientación SO-NE que al aproximarse al embarcadero del embalse sufre un brusco cambio ortogonal (NE-SO).
2. En el borde meridional del cerro situado junto al embarcadero (estribo derecho de la presa) afloran las pizarras y areniscas westfalienses a muro de las calizas de montaña, cuando en realidad deberían de estar a techo en secuencia normal. Esta inversión debe estar relacionada con el cambio brusco de orientación anteriormente citado y debe explicarse mediante un pliegue (probablemente relacionado con alguna falla). Resulta de muy difícil justificación el asumir que todos los materiales calizos del cerro se hallan invertidos, por lo que se supone la existencia de una estructura (pliegue o falla) que coloque las calizas en secuencia normal. En este cerro también se produce una leve flexión de la orientación de las estructuras existentes, arqueándose desde orientaciones NO-SE a NE-SO (en dirección a la surgencia).
3. En el cerro existe un afloramiento de pizarras que a pesar de sus reducidas dimensiones, tiene difícil justificación. Tales pizarras se hallan junto a una zona dolomitizada, por lo que se plantea la existencia de una falla que muestre el comienzo de las pizarras westfalienses en el bloque Sur, y levante el bloque Norte. Tal elevación supondría que el contacto de techo de la caliza de montaña con las pizarras westfalienses debería de hallarse próximo al fondo del valle, y muy cerca de la surgencia. Este hecho justificaría la formación de este valle encajado por erosión de tales pizarras, favoreciendo la aparición de un estrechamiento aprovechado para la construcción de la presa.
4. El cerro situado en el estribo izquierdo de la presa muestra una estructura que parece indicar la existencia de un sinclinal tumbado. Esta estructura indicaría una nueva elevación de las calizas de montaña justificada por la presencia de la falla de Ruesga (y probablemente falla de León), que supondría la terminación repentina de la caliza de montaña.
5. En el lugar de surgencia existen calizas aguas bajo de la misma. Según la interpretación estructural deberían de existir pizarras próximas (aunque escasas), y se ha de tener presente que la surgencia tiene el aspecto de situarse en una zona excavada (posible antigua cantera).

Las figuras inferiores corresponden a la posición y perfil geológico de interpretación realizado en las inmediaciones de la cerrada de la presa de Cervera de dirección NE – SW en el que se muestran los principales aspectos estructurales y tectónicos de la zona (Figura 268).



Figura 267. Situación del perfil geológico de interpretación

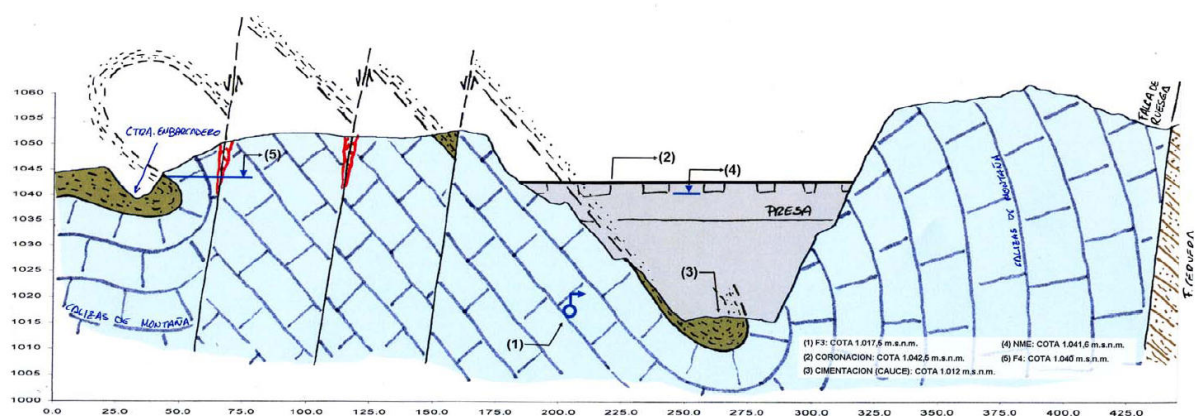


Figura 268. Perfil geológico de interpretación realizado en las inmediaciones de la cerrada de la presa de Cervera de dirección NE – SW en el que se muestran los principales aspectos estructurales y tectónicos de la zona.



7.5.- Ensayos con trazador salino

Se ha realizado una serie de ensayos con un trazador salino, para comprobar el tiempo de respuesta entre la caverna y el manantial, así como el grado de dispersión del flujo (relacionado directamente con el carácter kárstico).

Se han llevado a cabo 4 inyecciones de trazador salino, con las siguientes características:

1. Inyección a las 16:13 del día 4 de agosto, de 1 kg de trazador disuelto en agua (10 l), a través de la rejilla de la caverna.
2. Inyección a las 10:23 del día 5 de agosto, de 4 kg de trazador disuelto en agua (10 l), a través de la rejilla de la caverna.
3. Inyección a las 11:04 del día 5 de agosto, de 4 kg de trazador disuelto en agua (10 l), en la zona cementada en la orilla del embalse, a la altura de la caverna
4. Inyección a las 11:47 del día 5 de agosto, de 4 kg de trazador disuelto en agua (10 l), al Noreste de la zona anterior, en dirección al aliviadero y junto a los primeros afloramientos no hormigonados en el embalse.

Se ha controlado la respuesta de la surgencia mediante la medida continua de la conductividad, esperando la llegada de la onda salina y el registro de su paso. Caben destacar los bajos valores de conductividad registrados (del orden de 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$), como corresponde a un agua que ha estado poco tiempo en contacto con materiales solubles, y por lo tanto escaso recorrido.

En la siguiente figura (Figura 269) se muestran los puntos de inyección y las cotas aproximadas de cada punto.



Figura 269. Ubicación de inyecciones y cotas aproximadas

La distancia existente entre la rejilla de la caverna (situada a pocos metros de la bocade la misma) y el punto de surgencia aguas abajo es de 200 m, siendo el desnivel aproximado entre ambos de aproximadamente 20 m (si bien, bajo la rejilla es probable que el nivel se halle a una cota muy inferior, dadas las características de la cavidad).

Tras realizar la primera inyección a las 16:13, se ha detectado un incremento de conductividad a las 16:33, es decir, 20 minutos después. El punto de salinidad más elevada se ha registrado a las 16:42 y se considera que el trazador ha pasado en su totalidad a las 17:05.

- Cantidad de trazador: 1 kg.
- Tiempo de llegada de la onda: 20 minutos.
- Variación máxima de conductividad: 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Tiempo de llegada del máximo de la onda desde detección: 9 minutos.
- Duración de la onda: 32 minutos.
- Evolución de la conductividad: ascendente (0,05°C/hora).

La siguiente gráfica muestra el registro de conductividad en tiempo real (Figura 270).

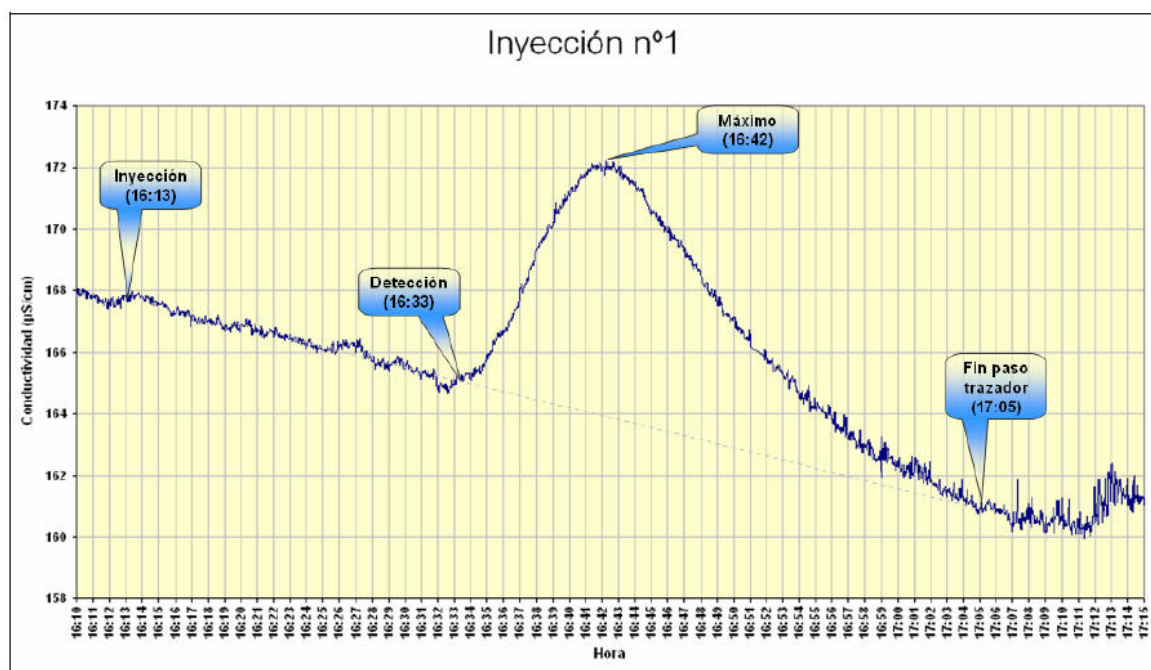


Figura 270. Registro de conductividad en la surgencia durante la inyección n°1

Tras este registro, al día siguiente se ha procedido a realizar 3 inyecciones con mayor cantidad de trazador salino (4 kg). Se ha utilizado la inyección n°1 para controlar las siguientes inyecciones (la n°2 se realiza en el mismo lugar, y la 3 y 4 más lejanas).

La siguiente gráfica (Figura 271) muestra el registro de conductividad obtenido en la surgencia en tiempo real.

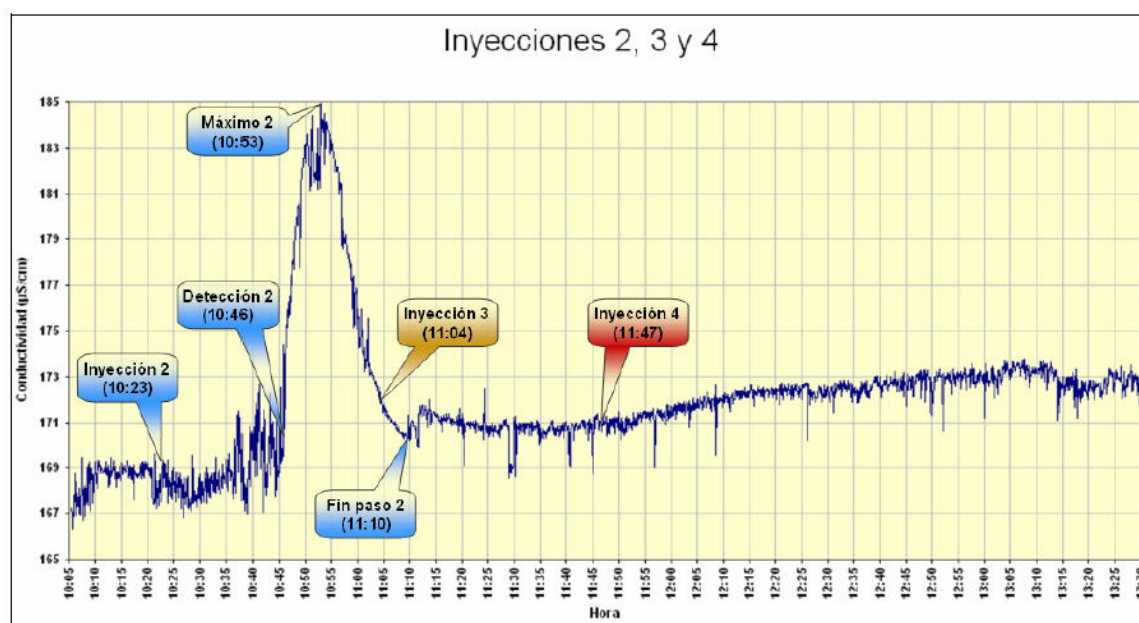


Figura 271. Registro de conductividad en la surgencia durante las inyecciones 2, 3 y 4



La inyección nº2 se ha realizado a las 10:23, registrándose su llegada a las 10:46, es decir, 23 minutos después. El punto de salinidad más elevado se ha registrado a las 10:53 y se considera que el trazador ha pasado en su totalidad a las 11:10.

- Cantidad de trazador: 4 kg.
- Tiempo de llegada de la onda: 23 minutos.
- Variación máxima de conductividad: $16 \mu\text{S}/\text{cm}$.
- Tiempo de llegada del máximo de la onda desde detección: 7 minutos.
- Duración de la onda: 24 minutos.
- Evolución de la conductividad: ascendente ($0,09^\circ\text{C}/\text{hora}$).

En cuanto al resto de inyecciones, se considera que no han sido detectadas, dado que la inyección se ha realizado en la orilla del embalse, en donde se produce una mayor dispersión del trazador.

En la siguiente figura (Figura 272) se muestran las inyecciones llevadas a un mismo origen (t_0) y se comprueba la coincidencia casi exacta de los registros.

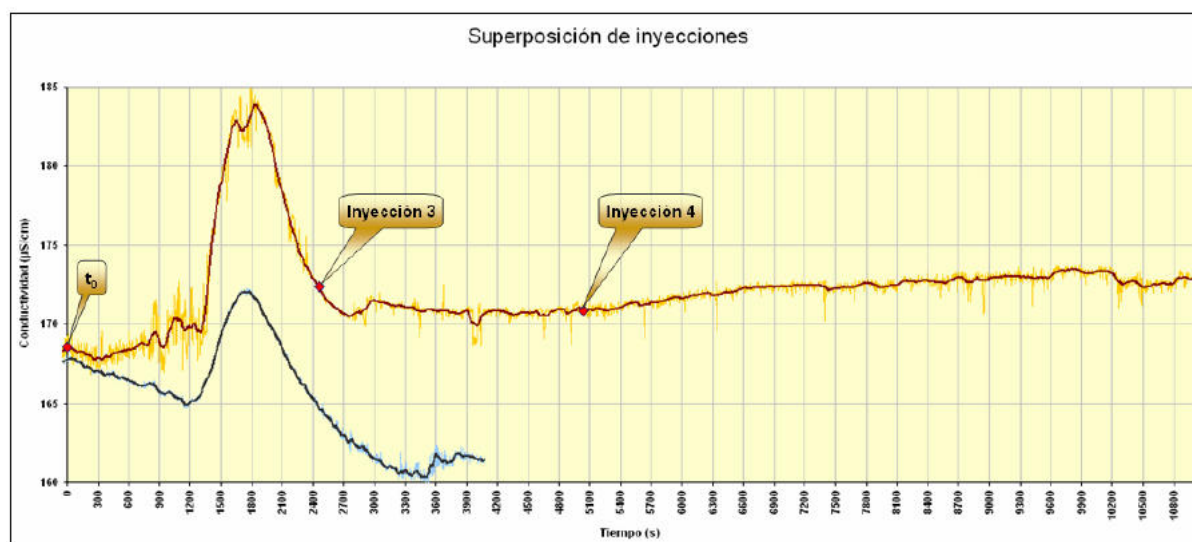


Figura 272. Registros de conductividad con origen común (con suavizado)

Cabe destacar que la inyección nº2 (más concentración salina) ha llegado ligeramente después que la nº1, aunque se han detectado saltos anómalos antes de recibir el ascenso claro. Además, la duración de la onda de la inyección nº1 ha sido sensiblemente más larga (32 minutos) que la de la nº2 (24 minutos).

En cualquier caso, quedan claros los siguientes aspectos:

- La conductividad medida en la orilla del embalse y en la surgencia son muy similares (del orden de $170 \mu\text{S}/\text{cm}$), lo que induce a pensar en una circulación rápida y por lo tanto, disolución casi inexistente (poco tiempo de contacto con la formación permeable).



- La conexión entre la galería y la surgencia es clara y rápida (kárstica), circulando el agua a una velocidad media aproximada de 0,16 m/s (15,5 cm/s).
- El tiempo de paso de la onda salina indica una cierta tortuosidad, puesto que se necesita un tiempo medio de 28 minutos para que pase todo el trazador salino. Esta tortuosidad se asociaría a la existencia de recovecos (una fractura limpia registraría un paso rápido).
- El trazador ha sufrido una dispersión/difusión muy importante, influido por el importante caudal circulante, y probablemente por un flujo turbulento (un flujo laminar no difuminaría tanto la onda salina). El trazador tenía una conductividad en origen superior a 199 mS.
- Cabe la duda sobre el posible registro de un trazador muy diluido en la inyección n°3 y 4, dado que se registra un aumento continuo de conductividad durante 1,5 horas. No queda claro tal registro debido a que también se registra un aumento paulatino de la temperatura. Este efecto podría aclararse mediante una inyección de más cantidad de trazador y un registro superior.

En las siguientes figuras se muestra la evolución de la temperatura durante los registros.

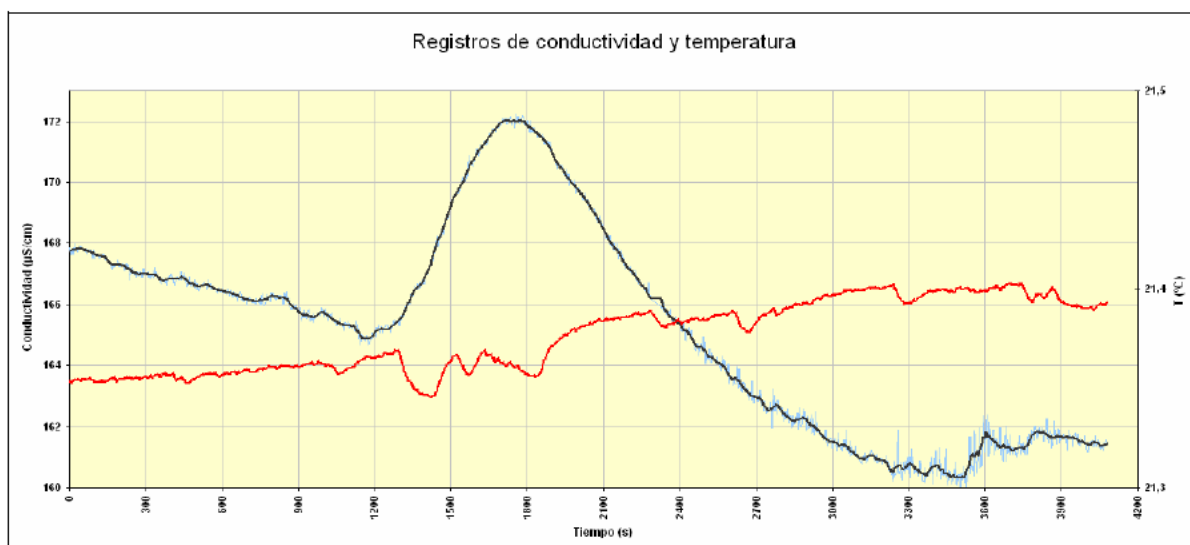


Figura 273. Registros de conductividad y temperatura durante la inyección n°1

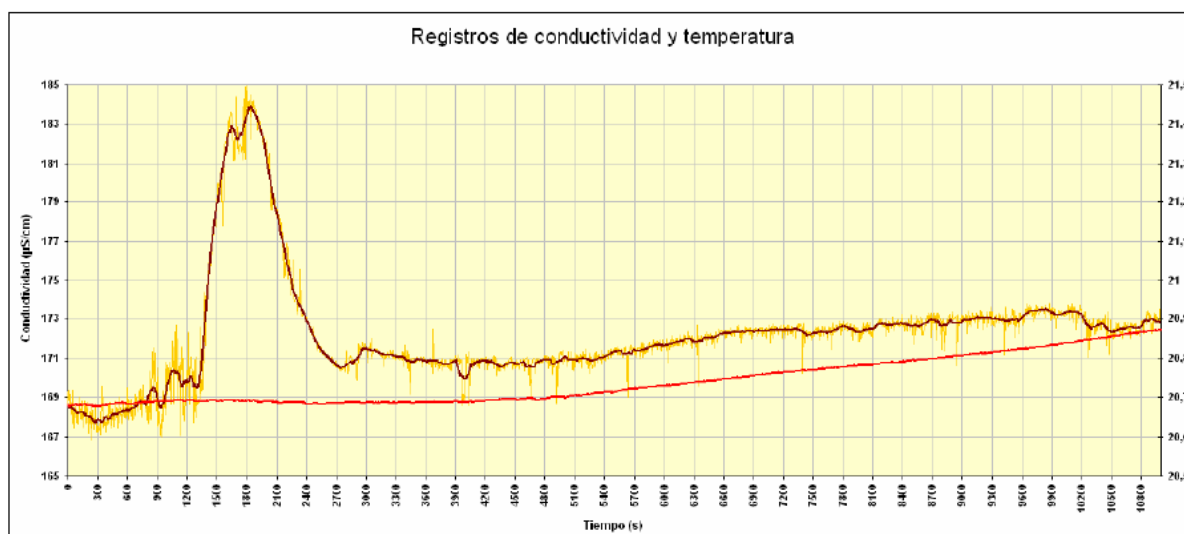


Figura 274. Registros de conductividad y temperatura durante las inyecciones n°1, 2 y 3

7.6.- Investigaciones geofísicas

En este apartado se detallan los trabajos realizados en la campaña de investigaciones geofísicas efectuadas en el proyecto.

Como parte fundamental del proyecto se han empleado una serie sistemas de investigación geofísica que dadas las características de los mismos, así como de los objetos de estudio permitan obtener los datos necesarios para cumplir los alcances definidos. Dichas tecnologías, así como las localizaciones de aplicación de las mismas han sido:

Para la detección de zonas de filtración, los trabajos comienzan por la ejecución del sistema de **Potencial Espontáneo** (Fase 1). Este sistema, realiza una investigación areal cubriendo la totalidad de la zona de estudio, indicándonos que zonas presentan anomalías relacionadas con posibles fenómenos de filtración y por tanto, susceptibles de ser analizadas con un mayor grado de detalle.

Una vez seleccionadas las zonas de interés, estas se analizan mediante los sistemas de **Tomografía Eléctrica** (T.E.) y **Potencial Inducido** (P.I.) (Fase 2), las cuales tratan de localizar, de forma más precisa, la zona por la que se pueden estar produciendo las filtraciones (fracturas y/o huecos kársticos).

Existen otras técnicas de investigación geofísica que suelen emplearse con éxito en la localización de zonas de fractura y oquedades como por ejemplo, la microgravimetría, georradar, sísmica de refracción, etc.. El uso de las mismas dentro del estudio se desestimo debido a los siguientes condicionantes de la zona y objeto de estudio:

- Georradar: La profundidad a la que se emplazan los objetos de interés así como el tamaño y morfología de los mismos supera la capacidad de penetración y resolución de este sistema de investigación. Además de este factor, la superficie agreste del terreno con



abundantes irregularidades en ciertos sectores impediría el correcto desplazamiento de las antenas de registro realizando una mala adquisición.

- Microgravimetría. La anomalía gravimétrica generada por los posibles conductos kársticos rellenos de agua de pequeño tamaño a profundidades tan elevadas carece de la intensidad suficiente para permitir su detección. La previsible morfología irregular de este tipo de conductos de morfología no esférica hacen que en caso de detección no permitan una interpretación sencilla. Además de estos factores, hemos de tener en cuenta que para la correcta ejecución de esta técnica de investigación es necesario un levantamiento topográfico de gran precisión en la cota del punto de investigación.
- Sísmica de refracción. Técnica de investigación no resolutive en la zona de trabajo al situarse los objetos de interés a demasiada profundidad para su detección debido al cambio lateral en las velocidades de propagación que generan.
- En el caso de sistemas de investigación electromagnéticos, la existencia de un repetidor en la zona de estudio impide la aplicación de los mismos debido al alto nivel de interferencias que genera.

JUSTIFICACION DE LOS TRABAJOS

El empleo de las técnicas de investigación geofísicas propuestas (P.E., T.E. y P.I.) responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad de los parámetros registrados (campo eléctrico natural y resistividad) a la existencia de flujos de filtración en el medio rocoso así como a los cambios litológicos y zonas de alteración de los materiales existentes en profundidad.
- Obtención de planos en planta de los potenciales eléctricos que permitirán la delimitación espacial de las zonas de filtración situadas en profundidad.
- Obtención de secciones de bidimensionales de resistividad que permitirán determinar aspectos tanto estructurales (buzamientos, fracturas, diaclasas, etc.) como cambios litológicos y/u oquedades en la roca debidos a la existencia de fenómenos de karstificación. Estos perfiles bi-dimensionales permitirán cartografiar en 3D las posibles zonas de filtración.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente. Los dispositivos a emplear en la TE, así como la longitud de los perfiles y espaciado interelectródico permitirán una alta resolución en la determinación de los valores de resistividad.

Además, con el fin de mejorar la calidad de los datos obtenidos se harán pasar los perfiles de investigación TE y puntos de investigación de PE y PI junto a sondeos de reconocimiento



existentes o zonas de interés (cuevas, contactos litológicos en taludes para su uso de forma paramétrica²⁰

7.6.1.- Potencial espontáneo

Los trabajos realizados con el sistema de investigación geofísica de PE pretenden localizar las posibles zonas de filtración existentes a lo largo de la zona de estudio de la margen derecha del embalse.

Los trabajos de PE han consistido en la realización de un mallado de 214 puntos de investigación que cubre la zona de estudio de la forma mas regular posible (Figura 275).

El objetivo del sistema de PE es doble. Por un lado trata de determinar posibles anomalías generadas por el flujo del agua procedente del embalse a través del medio rocoso y, en base a dichos resultados, situar²¹ los perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica (TE) y Potencial Inducido (PI) los cuales trataran de investigar con gran detalle, la posición en profundidad de dichas zonas de filtración .



Figura 275. Puntos de Investigación de PE.

²⁰ Empleo de la información aportada por sondeos mecánicos o otras fuentes de información existentes en la zona de estudio con objeto de comprobar y calibrar los resultados geofísicos obtenidos con las columnas litológicas existentes. De esta manera, se obtienen valores válidos de comparación entre puntos de características conocidas con otros en los que se está realizando la investigación.



El tratamiento de los datos de PE permite generar un plano en planta con los valores de potencial observados en campo (Figura 276). Dicho plano permite delimitar espacialmente las zonas de anomalía que pueden estar asociadas a fenómenos de filtración.

La Figura 277 muestra los resultados del tratamiento de los puntos de registro del P.E. en la zona de estudio. La delimitación de las zonas de filtración a partir de los datos de PE es relativamente sencilla ya que los flujos de filtración suelen generar anomalías de potencial de carácter negativo²². El análisis del plano de resultados de P.E. muestra las siguientes características:

- La zona de estudio puede dividirse en dos sectores bien diferenciados, noroeste (zona A) y este (zona B). Dicha división se realiza en base a la presencia de una franja de valores elevados de potencial (zona C) en la parte central de la zona de estudio la cual presenta una alineación noreste-suroeste.
- La zona de valores de potencial de carácter negativo situada en la parte noroeste (zona A) parece indicar, dadas sus características, la existencia a lo largo de la misma de flujos de filtración que se dirigen desde el embalse hacia la ladera. En detalle, si observamos las características del campo de potencial espontáneo, podemos ver como el mismo va perdiendo intensidad gradualmente a medida que nos alejamos de la orilla del embalse lo cual puede deberse a que las zonas de filtración se sitúen a una mayor profundidad a medida que penetran en la zona de estudio, por lo que la anomalía que generan es cada vez más débil. El carácter homogéneo de la misma parece indicar la existencia de múltiples zonas de filtración en esta zona si bien, un análisis más en detalle parece definir una zona donde el flujo puede ser de mayor entidad (flecha amarilla discontinua (Figura 277)) la cual coincide con la posición de la “cueva” existente en la zona de estudio.
- La zona B, se caracteriza por presentar valores de potencial de carácter negativo, pero de menor intensidad que el caso de la zona A exceptuando dos zonas que presentan mínimos relativos de potencial, las cuales analizamos a continuación:
 - Zona B1, localizada en la parte sur de la zona de estudio, presenta un carácter lineal de dirección prácticamente este – oeste la cual parece perder intensidad a medida que avanzamos al este.
 - Zona B2, localizada en la parte noreste de la zona de estudio en las inmediaciones de la zona de descarga de las filtraciones, se relaciona en su proceso genético, por la somerización y afloramiento del flujo de filtración en la zona de descarga.

²¹ Existen otros mecanismos en la naturaleza que pueden generar anomalías de potencial negativo, como zonas de oxidación reducción, presencia de menas metálicas, etc. Por esta razón, los resultados del sistema P.E. se consideran siempre como indicadores de posibles zonas de filtración, los cuales han de ser siempre comprobados con otras técnicas de investigación.

²² Existen otros mecanismos en la naturaleza que pueden generar anomalías de potencial negativo, como zonas de oxidación reducción, presencia de menas metálicas, etc. Por esta razón, los resultados del sistema P.E. se consideran siempre como indicadores de posibles zonas de filtración, los cuales han de ser siempre comprobados con otras técnicas de investigación.

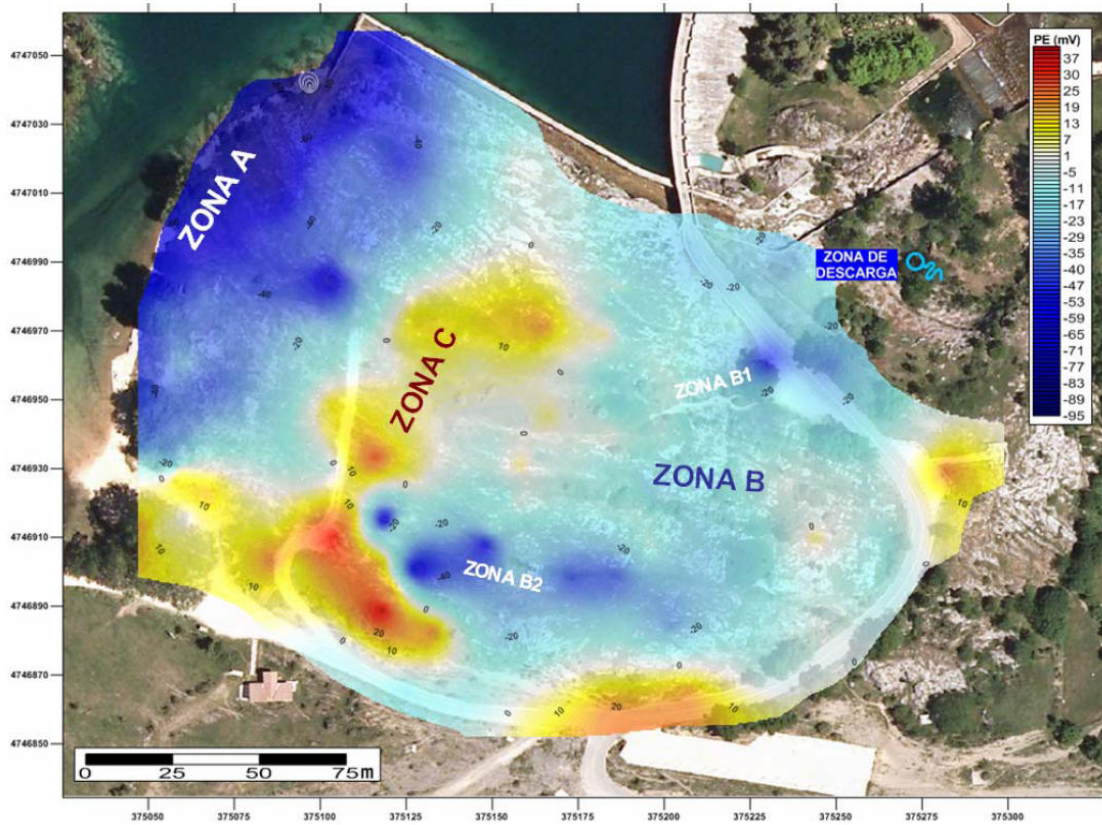


Figura 276. Plano de resultados del sistema PE

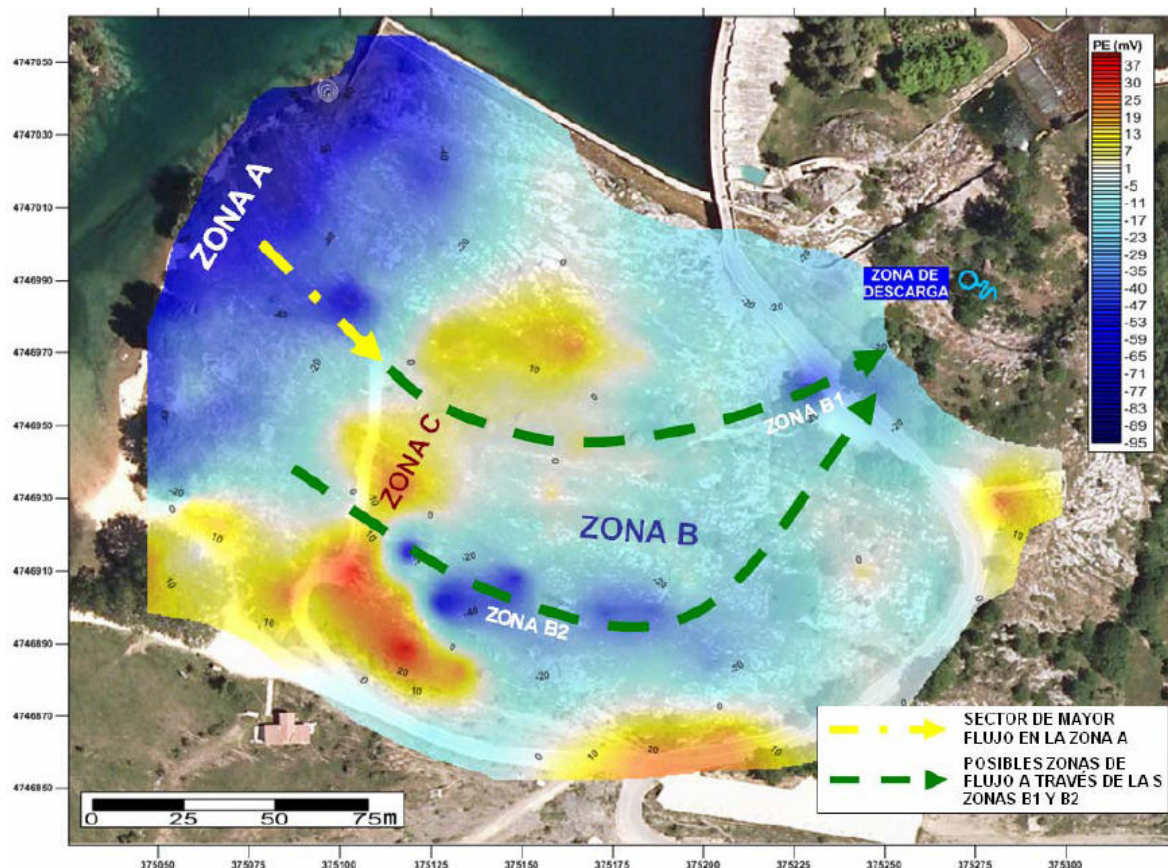


Figura 277. Plano de interpretación de resultados del sistema PE

Si se interpretan las anomalías de carácter lineal de las zonas B1 y B2 como posibles zonas en las que se concentran las filtraciones del embalse (y por tanto generan la anomalía de potencial negativa) entre la zona A y el punto de descarga, se pueden predefinir una serie de pasillos o zonas por las que debe discurrir el flujo de filtración (flecha verdes discontinuas (Figura 277)).

A partir de estos resultados se ha dispuesto la traza de los perfiles de investigación de T.E. y P.I. teniendo en cuenta además los resultados de la revisión cartográfica. La posición final de los perfiles de investigación se muestra en Figura 278.

7.6.2.- Tomografía Eléctrica (T.E.)

La campaña de campo realizada con el sistema de Tomografía Eléctrica (T.E.) ha consistido en la realización de un total de 11 perfiles de investigación. El espaciado interelectródico empleado, dados los condicionantes de penetración necesarios²³, ha sido de 3 m

²³ Se ha estimado una penetración mínima de 40 m. Dicha penetración permite investigar en cualquiera de los perfiles de investigación realizados cotas situadas al menos 10 m por debajo de la cota de descarga de las filtraciones.



exceptuando el caso del perfil de investigación n°9, el cual presenta un espaciado interelectrónico de 10 m.

Las características de los perfiles de investigación figuran en la tabla 10 mientras que la posición de los mismos se puede visualizar en la figura 278.

| PERFIL | COORDENADAS | | LONGITUD |
|--------|-------------|---------|------------|
| | INICIO | FINAL | |
| N°.-1 | 375107 | 375040 | 164 metros |
| | 4747060 | 4746911 | |
| N°.- 2 | 375107 | 375085 | 168 metros |
| | 4747060 | 4746897 | |
| N°.-3 | 375134 | 375113 | 156 metros |
| | 4747041 | 4746885 | |
| N°.- 4 | 375150 | 375133 | 168 metros |
| | 4747032 | 4746865 | |
| N°.-5 | 375175 | 375169 | 156 metros |
| | 4747018 | 4746863 | |
| N°.-6 | 375196 | 375184 | 140 metros |
| | 4747006 | 4746865 | |
| N°.-7 | 375079 | 375238 | 164 metros |
| | 4746902 | 4746951 | |
| N°.-8 | 375208 | 375306 | 141 metros |
| | 4747003 | 4746897 | |
| N°.- 9 | 375157 | 374933 | 390 metros |
| | 4747024 | 4746709 | |
| N°.-10 | 375196 | 375202 | 141 metros |
| | 4747006 | 4746870 | |
| N°.-11 | 375196 | 375248 | 126 metros |
| | 4747006 | 4746891 | |

Tabla 10. Características de los perfiles de TE y PI realizados. El perfil 9 solo se ha realizado con TE

La posición de los perfiles de investigación se ha definido a partir de los resultados preliminares obtenidos con el sistema PE y puede verse en la imagen inferior (Figura 278).

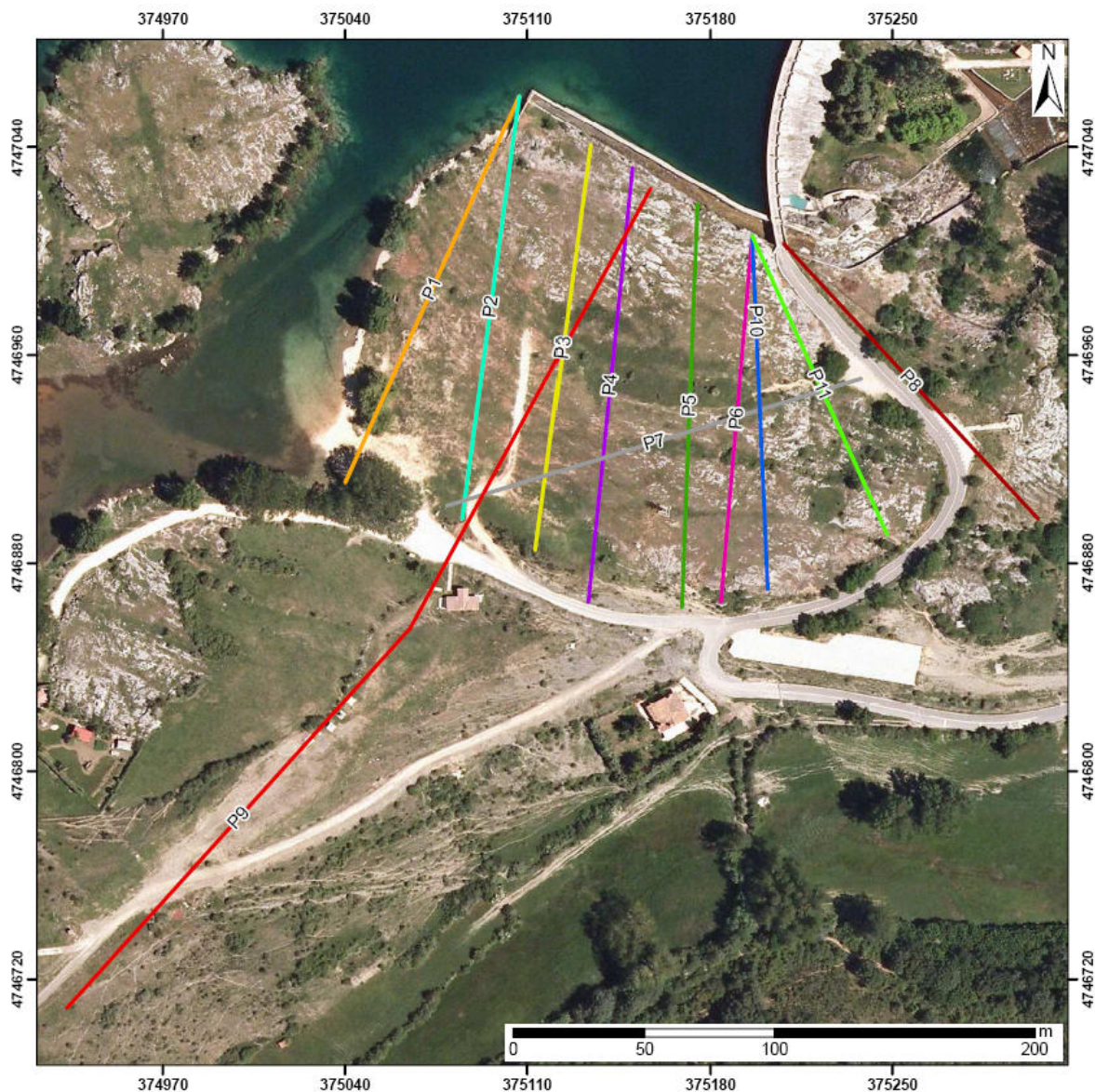


Figura 278. Posición de los perfiles de investigación TE realizados en la zona de estudio.

El objetivo de los perfiles de investigación ha sido la obtención de secciones bidimensionales de resistividad de los materiales del subsuelo permitiendo hacer diferenciaciones litológicas y en caso de interpretación conjunta con los resultados del P.I, localizar zonas alteración y/o flujo dentro de los materiales del subsuelo. Por este motivo, la interpretación de los perfiles de investigación T.E. no se realiza en este apartado, sino de forma conjunta con los resultados de PI a continuación.

En el caso del perfil TE-9, dotado de una mayor penetración y longitud, el objetivo del mismo ha sido el apoyar las conclusiones obtenidas en la cartografía geológica realizada en la zona.



7.6.3.- Potencial Inducido (P.I.)

El empleo de la técnica de Potencial Inducido (P.I.) tiene como objetivo en este estudio el servir de apoyo a la localización de posibles zonas de filtración a través de los materiales que conforman el estribo derecho de la presa predefinidas por los resultados del sistema P.E.



Figura 279. Puntos de Investigación de PI

El tratamiento de los datos de PI permite generar un plano en planta con los valores de potencial observados en campo. Dicho plano permite delimitar espacialmente las zonas de anomalía que pueden estar asociadas a fenómenos de filtración. En el caso del sistema P.I. las anomalías de potencial se asocian a la existencia de fenómenos de filtración a través del medio.

Los trabajos han consistido en la realización de un total de diez perfiles de investigación (Tabla 10). Dadas las características y metodología de la toma de datos, los perfiles realizados son coincidentes con los perfiles de Tomografía Eléctrica ejecutados en el proyecto (excepto el perfil TE-9). En total, se han registrado 423 puntos de observación de PI.

Se describen a continuación los resultados de forma conjunta, obtenidas en los perfiles de investigación de TE y PI.



7.6.4.- Interpretación 2D conjunta de los perfiles de investigación de TE y PI

PERFIL DE INVESTIGACIÓN 1

El perfil de investigación TE -1 y PI – 1 (Figura 280), presenta una longitud de 163 m y discurre de forma paralela a la orilla del embalse. La traza del mismo tiene por objeto el cortar de manera perpendicular las posibles zonas de filtración que se originan desde el embalse en la zona A definida por el P.E..

El corte geoelectrico obtenido por la TE muestra la existencia de un sustrato general resistivo de naturaleza carbonatada (resistividades superiores a los 800 Ohm·m) en el que aparecen una serie de zonas conductoras de morfología lineal y buzamiento NE de unos 35 – 40° (líneas discontinua negra). De todas ellas, la de mayor entidad es la situada en la parte SO del perfil, la cual se sitúa entre los metros 67 y 131 del mismo la cual aparece en profundidad entorno a los 1015 m de cota en el metro 68 del perfil y va ascendiendo gradualmente hasta a florar entorno al metro 131 m. La segunda anomalía lineal aparece definida con mucha menor nitidez en la parte NE del perfil definiendo un plano de buzamiento similar a la anterior sin aflorar en ningún momento a lo largo del perfil. El limite entre ambas anomalías se sitúa entorno al metro 67 del perfil, en donde parece probable la existencia de una posible fractura subvertical de tipo normal que dividiría el macizo en dos bloques levantando el bloque noreste (línea discontinua rosa).

La interpretación de ambas anomalías conductoras planares (línea discontinua negra) parece concordar con la de planos de karstificación asociados a la estratificación, que puede corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos dados los valores de resistividad que presentan. El buzamiento de dichos planos es concordante a los medidos en campo en los afloramientos de las calizas de montaña de la zona donde discurre el perfil, al igual que la posición de la fractura predefinida en la revisión cartográfica y confirmada mediante este perfil.

La posición y cota a la que se sitúa la parte mas conductora del perfil (metros 70 a 90 del perfil) es coincidente con la zona en la que el perfil intersecta la posición de la “cueva” existente en esta parte de la zona de estudio. Este hecho permite relacionar el descenso en los valores de resistividad en los carbonatos con la existencia de zonas fracturadas – carstificadas con oquedades rellenas de agua.

El análisis conjunto de los resultados del perfil TE con la grafica de variación del potencial permite apreciar la coincidencia entre la posición de las zonas de máximos relativos de anomalía de potencial (metros 67 y 76 del perfil PI/TE) con la zona de valores mínimos de resistividad (zona de la “cueva” y alrededores).

La grafica de PI muestra la existencia de otros máximos relativos a lo largo del perfil pero de menor importancia definiendo por tanto que la zona principal de circulación de los flujos de filtración se sitúa en el sector de la “cueva” y alrededores.

El origen de la cueva parece estar relacionado con la intersección del plano de falla con el plano estratigráfico que presentan las calizas de montaña.

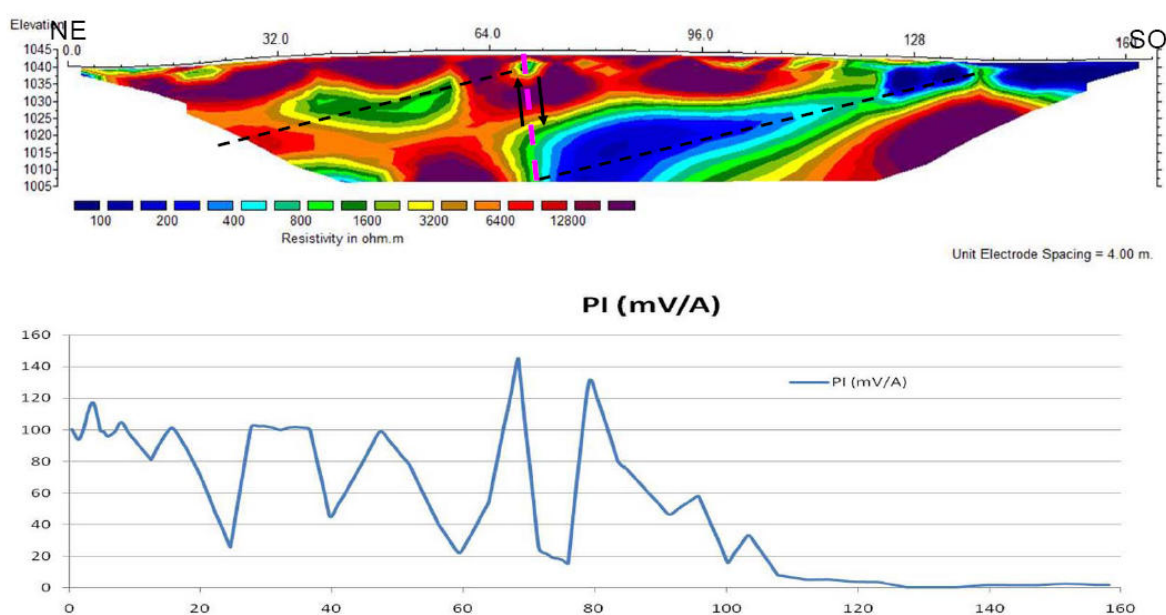


Figura 280. Perfil de investigación TE – 1 (superior) y PI – 1 (inferior)

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 2

En el caso del perfil de investigación TE -2 (Figura 281), el corte geoelectrico obtenido muestra al igual que en el caso del perfil anterior, la existencia de un sustrato general resistivo de naturaleza carbonatada en el que vuelven a apreciar con claridad las dos zonas lineales de naturaleza conductora interpretadas como planos de karstificación asociados a la estratificación, que puede corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos (línea negra discontinua). En este caso, dichas anomalías parecen haber aumentado su buzamiento y en el caso de la situada en la parte NE del perfil llega a aflorar en la parte central del mismo entorno al metro 74 del mismo. La existencia de la fractura en el centro del perfil (línea discontinua rosa) es mucho mas clara que en el perfil anterior pudiendo estimar el salto de la misma, el cual se sitúa entorno a los 50 m. El perfil muestra otra anomalía en la parte izquierda del mismo de claro carácter lineal o plano de buzamiento noroeste que aflora en el metro 72 del perfil.

El análisis de la grafica de variación del potencial inducido de forma conjunta con los resultados de TE muestra como aparecen dos máximos relativos de potencial en los metros 84 y 94 del perfil, coincidentes en su posición con la zona de intersección de la falla con el plano de karstificación. La grafica muestra también algunos máximos relativos de menor entidad en otras partes del perfil indicando la existencia de pequeñas zonas de filtración.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 3

El perfil de investigación TE-3 (Figura 282) presenta un aspecto similar a los dos anteriores (TE—1 y TE-2) en el que el sustrato de naturaleza carbonatada (Formación Calizas de Montaña) se presenta dividido en dos bloques por una fractura de buzamiento subvertical que parece levantar el bloque NE (línea discontinua rosa). Se continúa apreciando con nitidez la



existencia de un plano de karstificación asociado a la estratificación, que puede corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos en ambos bloques con buzamiento próximo a los 40° (línea discontinua negra). En este caso, se aprecia una diferencia en la posición de la zona de valores más conductores del plano del bloque SO, la cual no aparece en la zona de intersección con la fractura. Este hecho puede estar relacionado con la posición de la misma en el límite de investigación del perfil pudiendo haber ocasionado una distorsión durante la inversión de los datos.

La grafica de variación de PI presenta un máximo muy claro entorno al metro 96 del perfil, algunos metros más al SO de la posición de la zona de falla y coincidente con la posición del plano de karstificación indicando que la zona de filtración se sitúa en esta parte del perfil (zona de intersección entre el plano de fractura y plano de karstificación (ver interpretación geológicoestructural)).

Hemos de destacar que el valor de la anomalía de PI supera en 4 veces el valor de fondo regional de la zona de estudio indicando que el grueso de la filtración se produce en esta parte del perfil de PI.

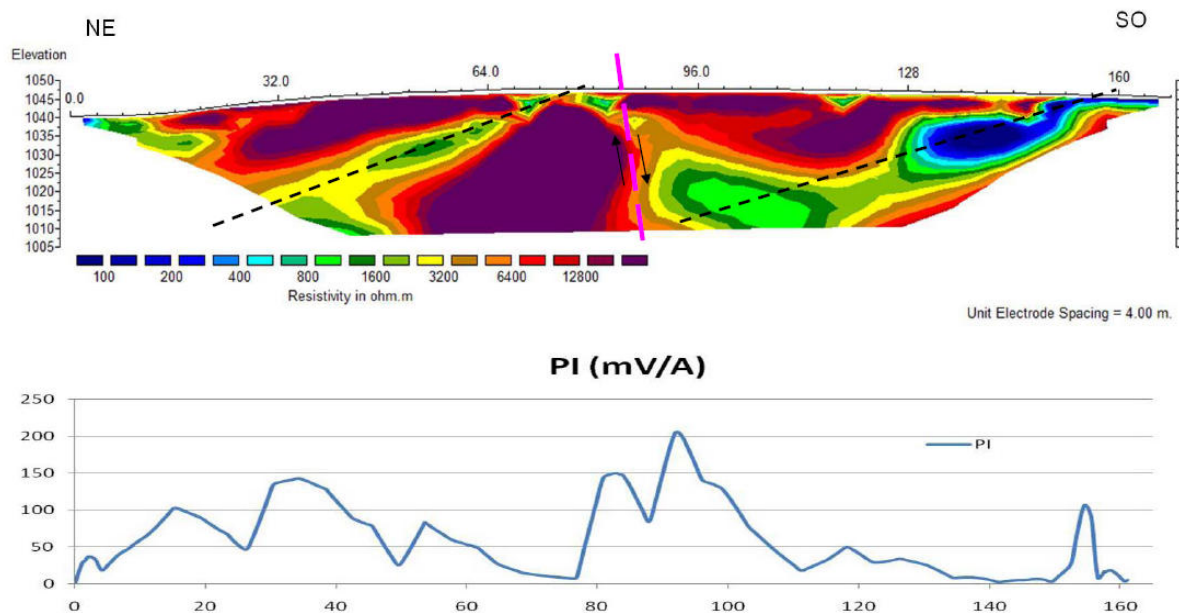


Figura 281. Perfil de investigación TE – 2 (superior) y PI – 2 (inferior)



PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 4

Al igual que en los perfiles anteriores, el perfil TE 4 (Figura 283) continua mostrándonos la disposición estructural de las calizas de montaña en esta parte de la zona de estudio.

Se aprecia con claridad la existencia de una capa superficial conductora entre los metros 60 y 92 del perfil, coincidente con la zona de intersección entre el plano de falla y la zona de afloramiento del plano de karstificación asociado a la estratificación existente en el bloque NE del perfil. Dicha zona de intersección constituye una zona de debilidad con ausencia de afloramientos claros de los carbonatos al presentarse fracturados y alterados. Este hecho se aprecia con claridad en la ortofoto de la zona de estudio (Figura 282) en la cual, se aprecia un pasillo lineal coincidente con la posición de la fractura definida en los perfiles de TE con mayor vegetación (e incluso crecimiento de arbustos/árboles) que las zonas adyacentes en la que no se aprecian lineaciones.



Figura 282. Ortofoto mostrando las zonas con mayor vegetación

Este fenómeno se aprecia a menor escala en otras partes de la zona de estudio pudiendo indicar la existencia de planos de karstificación o fracturas.

La grafica de variación de potencial es similar a la obtenida para el perfil anterior presentando un máximo muy claro entorno al metro 94. La intensidad del PI en este punto es



cinco veces superior al valor de fondo por lo que unido a la ausencia de otros máximos a lo largo del perfil, permiten concluir que las filtraciones circulan por esta parte del perfil.

Cabe destacar al igual que en el perfil anterior (TE – 3), los valores de resistividad que presentan el plano de karstificación del bloque SO (línea discontinua negra) como la morfología y sobredimensionamiento del mismo.

Este hecho parece deberse al efecto que tiene la circulación del agua por el conducto kárstico el cual tiende a disminuir drásticamente los valores de resistividad de la zona.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 5

El perfil de investigación TE – 5 (Figura 284) muestra una variación en el patrón estructural de la zona de estudio. En este caso no se aprecia con claridad la existencia de una fractura que divida en dos bloques a las calizas de montaña al igual que no se define con claridad el plano de karstificación de la parte NE del perfil. Este hecho parece estar relacionado con la fuerte anomalía conductora que ocupa la parte central del perfil, causada en su mayor parte por las filtraciones, la cual tiende a enmascarar otros aspectos del perfil. Si observamos la parte más superficial del perfil podemos ver como los carbonatos no presentan una continuidad lateral lo cual podría ser sintomático de la existencia de posibles discontinuidades en los metros 70, 84 y 108 del perfil. La posición de estas posibles discontinuidades es coincidente con las zonas de mayor vegetación existente en superficie y anteriormente remarcadas en la ortofoto de la figura (Figura 282).

El perfil de PI presenta varios máximos relativos de los que el más importante es el situado entorno al metro 75 del perfil.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 6

En el caso del perfil TE – 6 (Figura 285), el corte geoelectrico obtenido vuelve a mostrarnos la fractura principal que divide las calizas en dos bloques diferenciados la cual se sitúa entorno al metro 60 del perfil. Se aprecia con claridad el efecto anómalo en la resistividad de los carbonatos que genera la existencia de filtraciones en las mismas las cuales se sitúan entorno a los metros 72 y 92 del perfil y una cota a una cota aproximada de 1.020. m.s.n.m..

La grafica de variación de PI es concordante con los resultados del perfil TE situando la zona de máximo potencia entre los metros 68 y 80 del perfil de manera coincidente con la zona ocupada por la anomalía conductora definida en el perfil de T.E.

Al igual que en el perfil anterior, el análisis de la continuidad geoelectrica de los carbonatos en la parte mas somera del perfil de manera conjunta con la revisión de campo permite dibujar la existencia de otras dos posibles zonas de falla de carácter secundario.

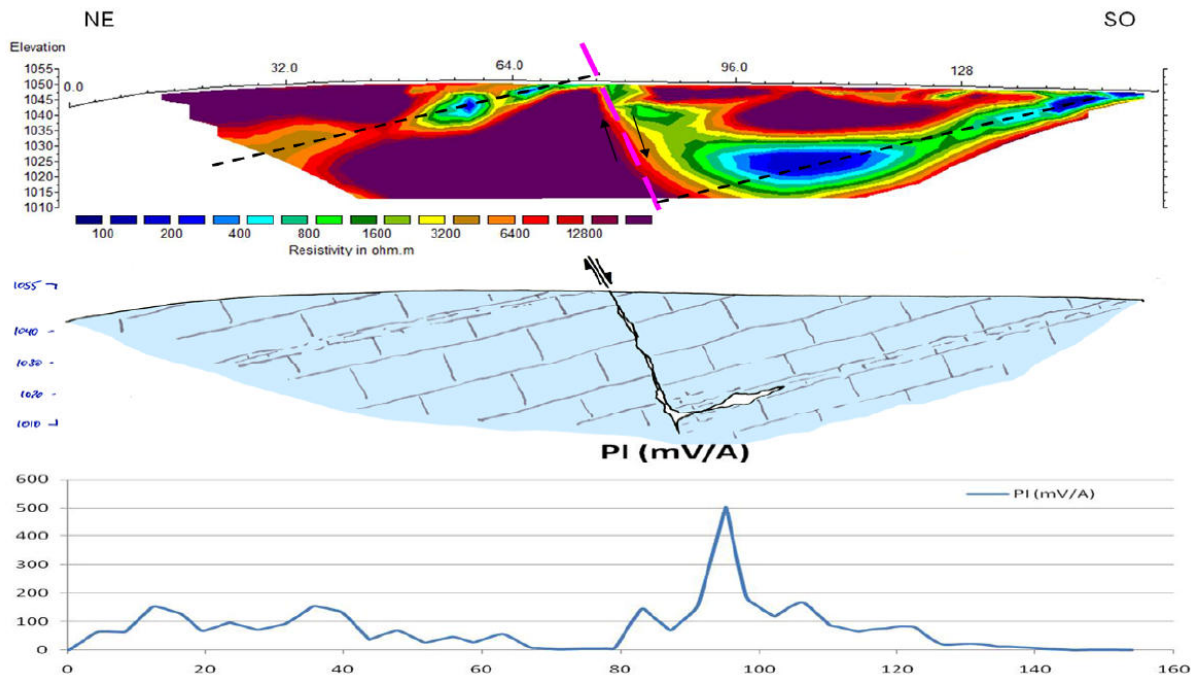


Figura 283. Perfil de investigación TE – 3 (superior), interpretación geológico-estructural (centro) y Potencial Inducido (inferior)

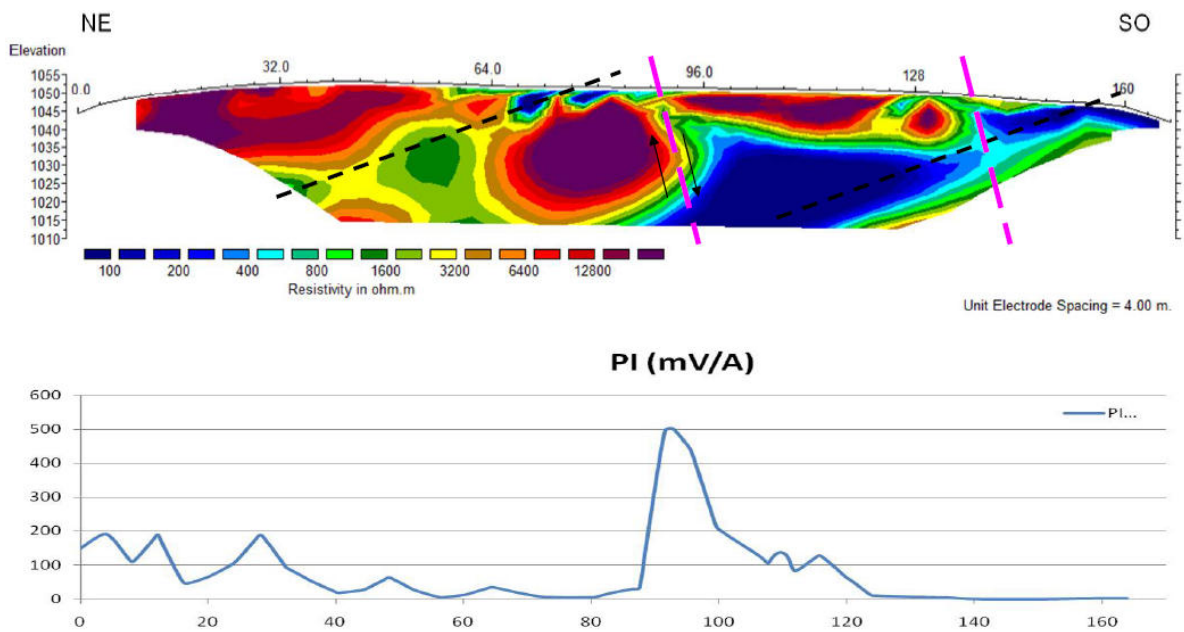


Figura 284. Perfil de investigación TE – 4 (superior) y PI – 4 (inferior)

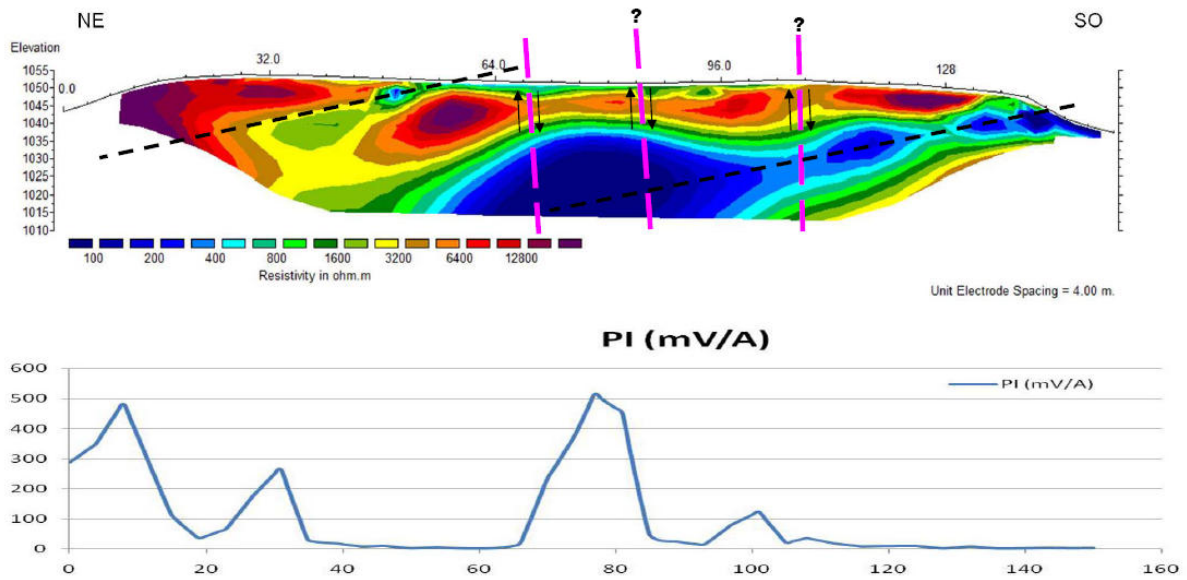


Figura 285. Perfil de investigación TE – 5 (superior) y PI – 5 (inferior)

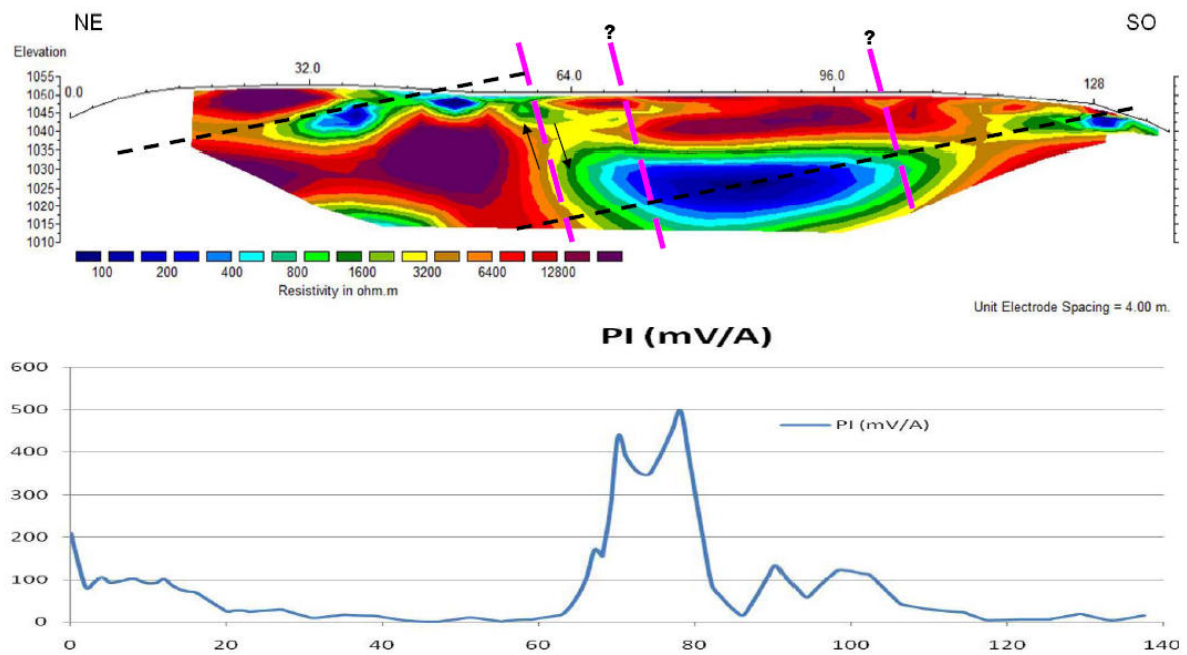


Figura 286. Perfil de investigación TE – 6 (superior) y PI – 6 (inferior)



PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 10

En el caso del perfil TE – 10 (Figura 288), el corte geoelectrico obtenido continua mostrándonos el mismo patrón estructural que hemos venido observando en los perfiles anteriores. La fractura principal se sitúa de forma aflorante entorno al metro 61 del perfil. En este caso, la anomalía conductora generada por el conducto kárstico a través del cual se están produciendo las filtraciones aparece mucho mas delimitada entre los metros 68 y 78 del perfil entorno a una cota de 1.025 m.s.n.m. en la zona de confluencia de la fractura y el plano de karstificación asociado a la estratificación, que puede corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos. No se aprecian discontinuidades relacionables con la existencia de fracturas deducidas de la revisión cartográfica.

La grafica de variación de PI es concordante con los resultados del perfil TE situando la zona de máximo potencia entre los metros 68 y 80 del perfil de manera coincidente con la zona ocupada por la anomalía conductora definida en el perfil de T.E.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 11

El trazado del perfil TE – 11 (Figura 289) gira con respecto a los anteriores produciendo que la traza del mismo deje de ser ortogonal a los planos de buzamiento de los carbonatos. Este hecho se observa con claridad en los resultados del perfil, en el que el plano de karstificación del bloque N aparezca con un buzamiento escaso (entorno a 20°). La traza del perfil intersecta la fractura principal entorno al metro 63, la cual se identifica con claridad ya que genera una pérdida de continuidad lateral en la resistividad de los carbonatos. La zona por la que se estima que se producen las filtraciones y caracterizada por presentar bajos valores de resistividad no se aprecia con claridad, mostrándose levemente en la zona central del perfil a cotas por debajo de los 1.015 m.s.n.m.

El análisis de la grafica de variación del potencial inducido presenta una zona de máximos relativos entre los metros 55 y 85 del perfil indicándonos que la ampliación o segmentación de la zona a través de las cuales se producen las filtraciones.

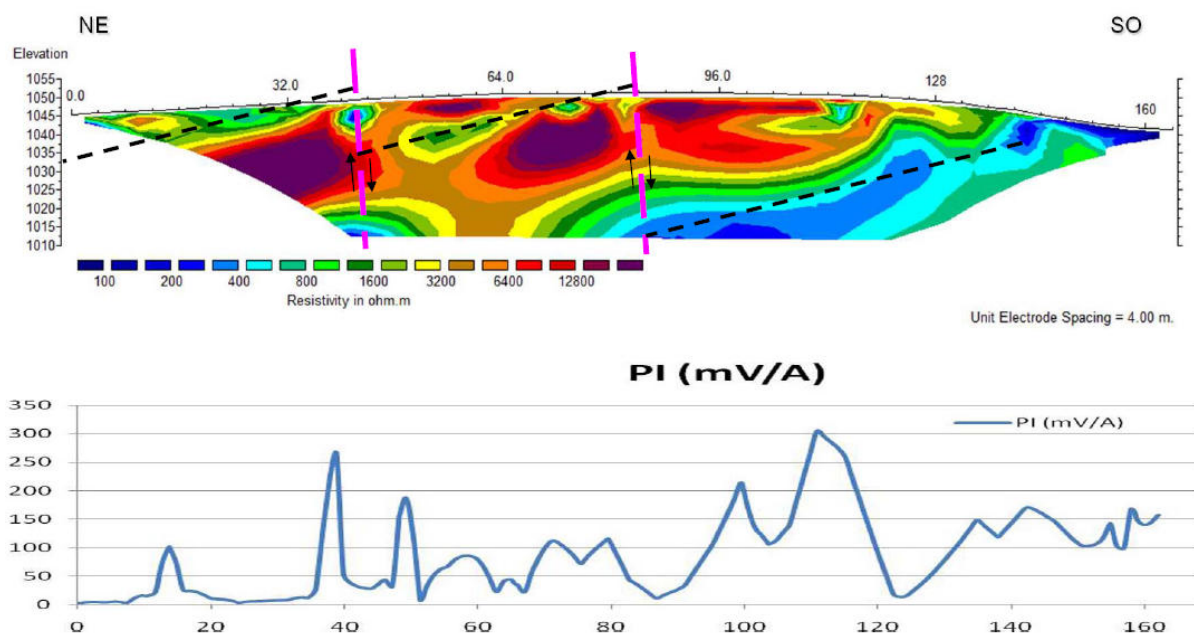


Figura 287. Perfil de investigación TE – 7 (superior) y PI – 7 (inferior)

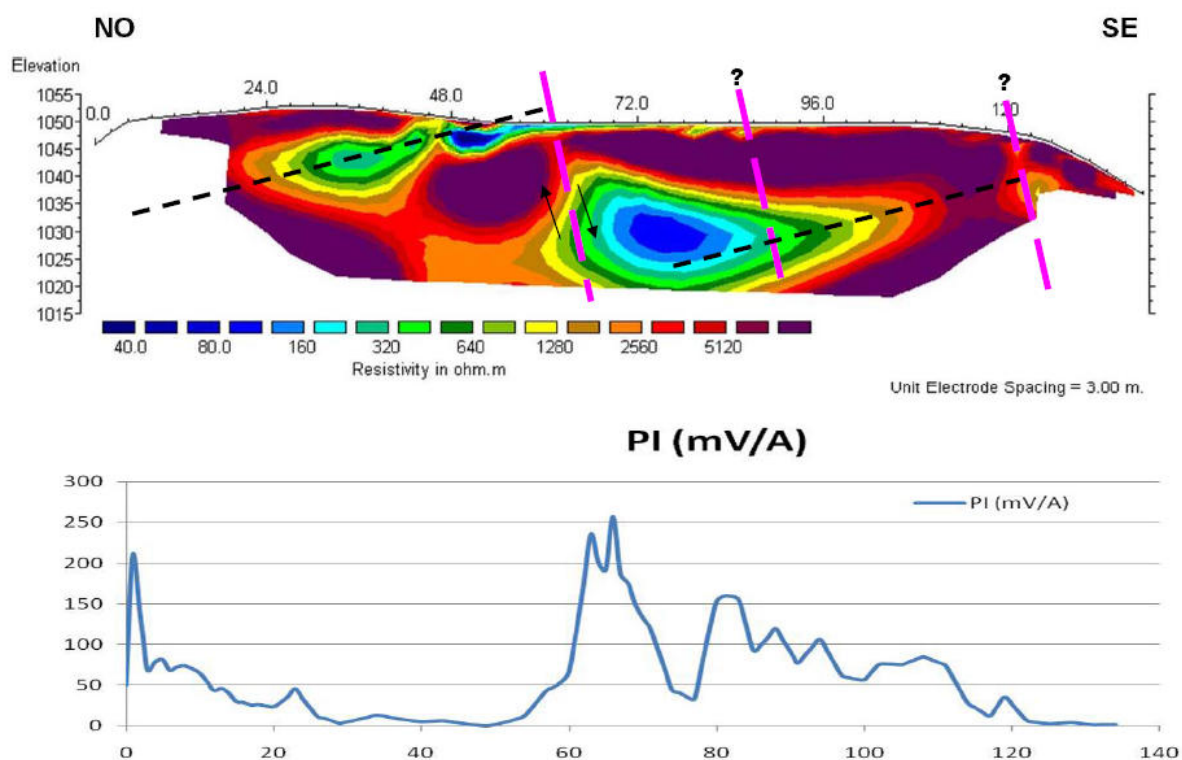


Figura 288. Perfil de investigación TE – 10 (superior) y PI – 10 (inferior)



PERFIL DE INVESTIGACIÓN TE 8

El perfil TE – 8 (Figura 290) es de los perfiles de investigación realizados, el más próximo al punto de descarga de las filtraciones discurriendo la traza del mismo de forma paralela a la carretera asfaltada de acceso al embarcadero que viene desde la presa desde coronación de la presa a la zona de estudio. El corte geoelectrico obtenido presenta cierta complejidad mostrándonos tres posibles zonas de fracturación dentro de los carbonatos entorno a los metros 32, 81 y 109 del perfil. Las dos primeras definen un bloque en el que se distingue una clara estratificación buzante al NO definida por dos planos de carácter conductor. En este caso, no se aprecia con claridad ninguna zona relacionable con la presencia de cavidades o zonas de filtración.

El análisis de la grafica de variación de potencial muestra un máximo absoluto en el metro 72 del perfil siendo el de mayor intensidad de los registrados en todos los perfiles de investigación indicándonos la posición del conducto a través del cual se están generando las filtraciones. La grafica muestra otro máximo relativo entorno al metro 110 que podría indicarnos la presencia de un canal secundario de filtración.

PERFIL DE INVESTIGACIÓN TRANSVERSAL TE 7

La traza del perfil de investigación TE – 7 (Figura 287) cruza longitudinalmente la zona de investigación con dirección ENE – OSO. Esta dirección condiciona los resultados del mismo ya que tiende a intersectar las direcciones de los elementos estructurales (fracturas y planos de estratificación) de forma no ortogonal definiendo orientaciones aparentes. El perfil muestra la existencia de dos fracturas de carácter verticalizado en los metros 42 y 86 que dividen el perfil en tres sectores. El sector SO presenta una marcada anomalía longitudinal conductora en la base del mismo con un buzamiento aproximado de 20° la cual parece que aflora al final del perfil y se hunde progresivamente con dirección NE. El bloque central presenta una anomalía lineal con características de buzamiento similares a la del bloque anterior la cual parece aflorar entorno al metro 78 hundiéndose hacia el NE y terminando bruscamente contra la fractura que separa los bloques central y norte. El Tercer bloque, el bloque norte presenta una anomalía conductora en superficie que presenta una potencia creciente hacia el NE con características similares a las anomalías conductoras de carácter lineal presentes en los bloques anteriores.

La grafica de variación de potencial muestra máximos relativos en diversas partes del perfil si bien, concuerdan a grandes rasgos con las zonas de anomalía definidas con el resto de perfiles (ver Figura 294).

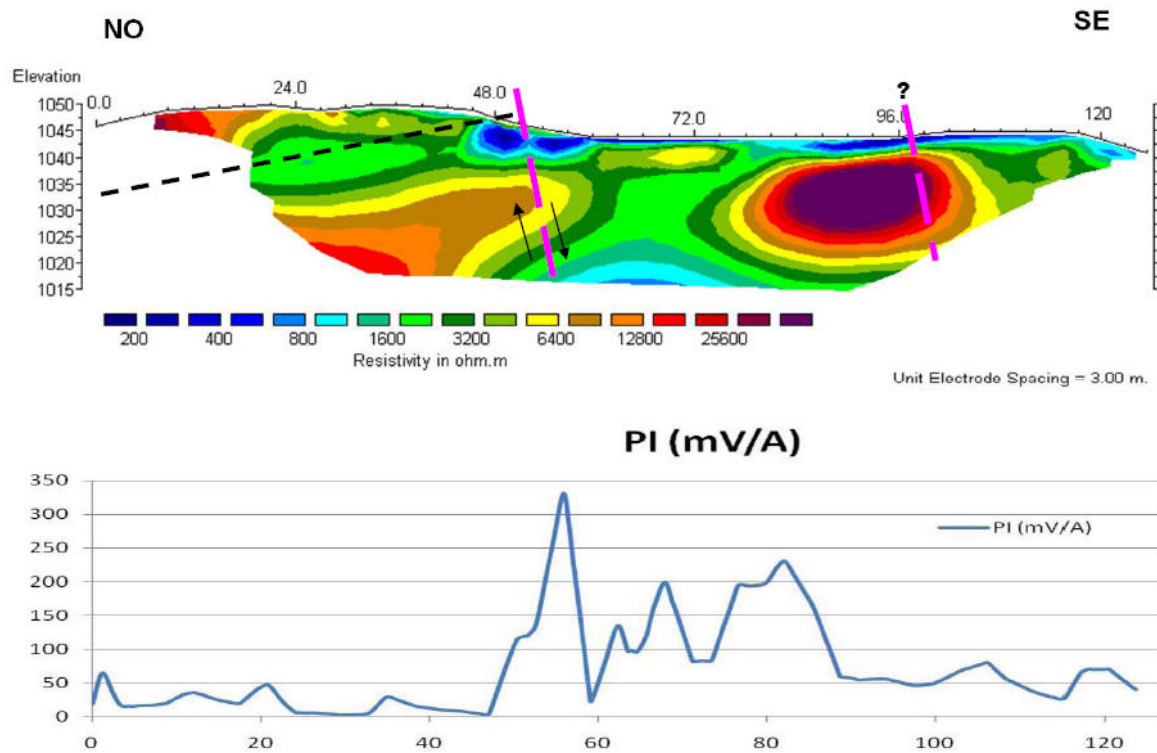


Figura 289. Perfil de investigación TE – 11 (superior) y PI – 11 (inferior)

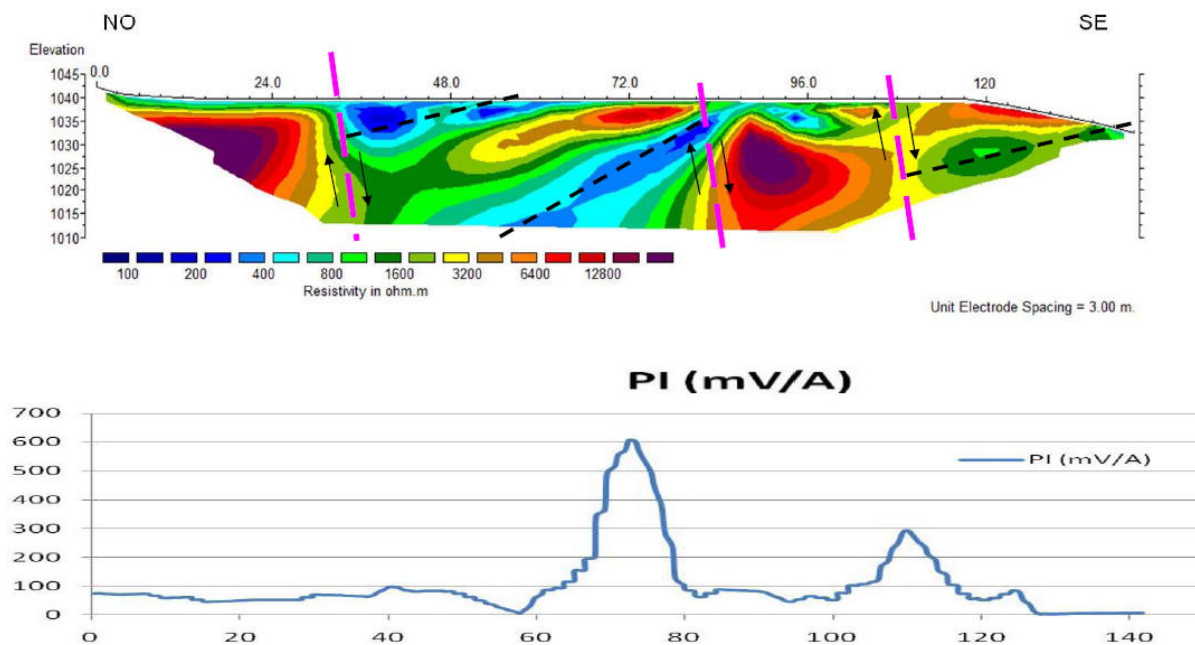


Figura 290. Perfil de investigación TE – 8 (superior) y PI – 8 (inferior)

PERFIL DE INVESTIGACIÓN GEOLOGICA TE 9

En el caso del perfil TE – 9 (Figura 291), el corte geoelectrico muestra unos resultados concordantes con la estructura geológica regional descrita en el apartado correspondiente a la interpretación estructural. La interpretación del perfil muestra como la secuencia estratigráfica se encuentra en secuencia normal, con las pizarras y areniscas westfalienses situándose a techo de las calizas de montaña.

Las calizas de montaña se sitúan por debajo de la cota del terreno hasta las inmediaciones de la carretera de acceso al embarcadero donde ya en la zona de “el cerro” sufre un fuerte plegamiento que fuerza el afloramiento de las mismas invirtiendo la serie y mostrando, las calizas de montaña a techo de las pizarras y areniscas westfalienses.

Más al norte y ya sobre la vertical de el “cerro”, la serie debe plegarse nuevamente recuperando la secuencia normal (pizarras y areniscas a techo de las calizas de montaña) haciendo que los buzamientos observados en los carbonatos sean al norte de acuerdo con lo observado en los afloramiento en campo. El buzamiento de la secuencia debería de terminar por mostrar afloramientos de pizarras y areniscas tal y como ocurre en la parte noreste de la zona de el “Cerro” pero en este caso, se aprecia una discontinuidad lateral en los valores de las calizas de montaña entorno al metro 45 del perfil indicando la existencia de una fractura ya definida en los perfiles de detalle que separa divide la zona de el “cerro” en dos bloques diferenciados. Esta fractura produce el levantamiento diferencial del bloque norte respecto al sur elevando de nuevo la serie e impidiendo la existencia de afloramientos de pizarras y areniscas en esta parte de la zona de estudio

El perfil también muestra una fuerte anomalía conductora situada en medio de los materiales carbonatados indicando la posición aproximada de la zona de filtración.

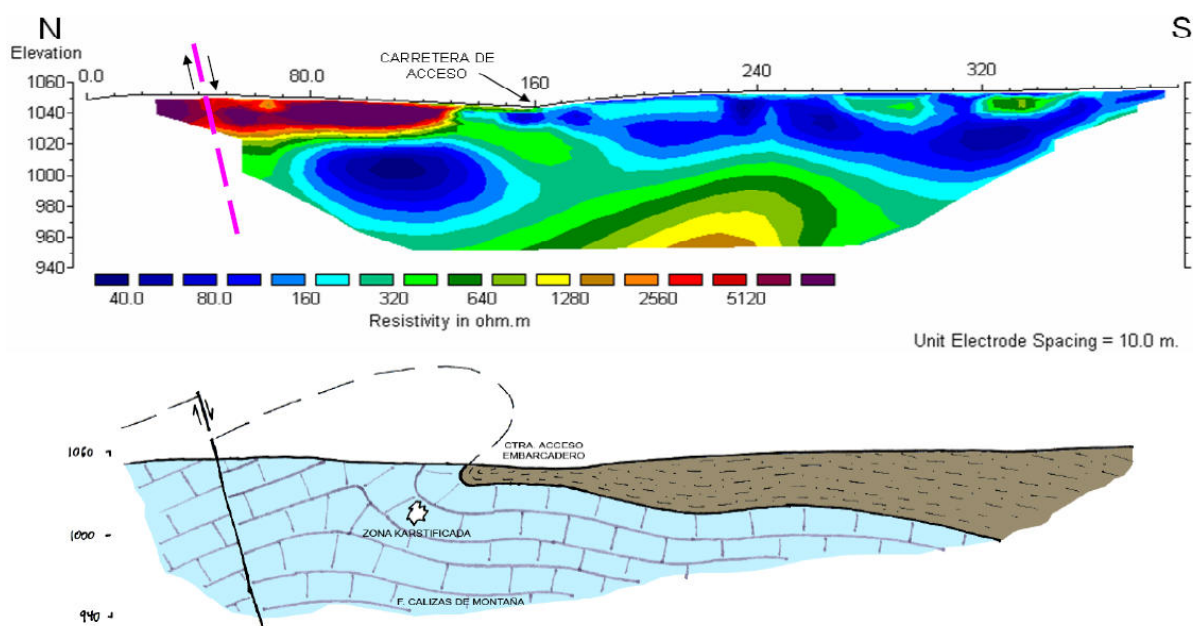


Figura 291. Perfil de investigación TE – 9 (superior) e interpretación geológica (inferior)



El análisis conjunto de los perfiles de detalle de TE y PI permite obtener las siguientes conclusiones:

- La zona de el “cerro” esta compuesta principalmente por los carbonatos de la formación calizas de montaña.
- Se aprecia con nitidez la estructura interna de dichos materiales los cuales presentan buzamientos comprendidos entre los 30 y 45° hacia el norte.
- Existe una serie de planos de karstificación o debilidad dentro de las calizas de montaña que dadas las características de resistividad observadas para los mismos (valores más conductores), que pueden corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos los cuales generan en su conjunto el descenso en la resistividad que presentan.
- Se detecta la existencia de una fractura a lo largo de la zona de estudio de orientación NO – SE cuyo trazado se va curvando lo largo de la zona de el “cerro”. La fractura divide la zona de estudio en dos bloques produciendo el levantamiento del bloque norte respecto al sur con un salto que se ha estimado superior a los 45 m.
- Se aprecian otras fracturas subparalelas a la anterior aunque de menor entidad.
- Los resultados de los perfiles de P.I. muestran la existencia de anomalías de potencial de elevada intensidad en la mayoría de los perfiles.
- La posición de estos máximos es coincidente con la zona de conjunción de los planos de karstificación existentes en las calizas de montaña y la fractura que divide la zona de estudio en dos bloques diferenciados.
- El desarrollo de la karstificación parece por tanto ligado a la interferencia entre estos dos planos de debilidad, la falla y el plano de Karstificación.

7.6.5.- Interpretación bidimensional de los resultados de PI

El tratamiento de los datos de potencial inducido obtenidos por los diferentes perfiles de investigación permite generar un plano de anomalías que nos permita identificar las zonas por las que se están produciendo las filtraciones.

La figura inferior (Figura 292) muestra la distribución en planta de los valores de potencial a partir del dibujo de isoclinas que van desde los 50 mV hasta valores por encima de los 650 mV. La no representación de los valores de PI inferiores a 50 mV responde a que estos valores representan el fondo constante de potencial observado en todos los perfiles.

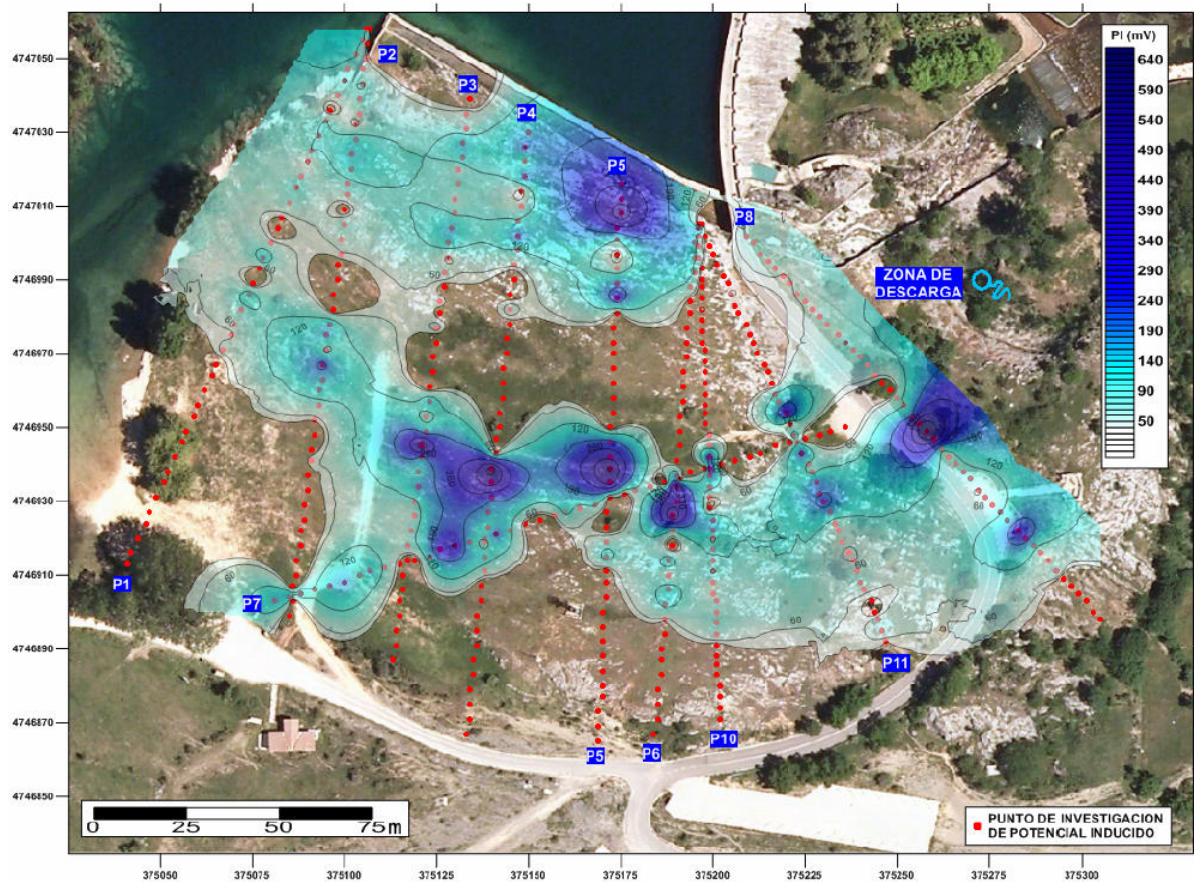


Figura 292. Plano de resultados de PI

Si analizamos el plano de resultados del sistema PI (Figura 294) podemos ver como se diferencian con claridad dos zonas que concentran los flujos de filtración (Zonas A y B/trazo de las flechas) las cuales aparecen separadas por una banda de terreno en la que no existen filtraciones (ausencia de anomalías de potencial inducido). Si analizamos en detalle ambas zonas de anomalía de potencial podemos ver que:

- Zona A (Flecha violeta). Sector noreste de la zona de estudio. La anomalía de PI que observamos en esta zona se debe a la existencia de filtraciones que se generan en embalse en la zona norte del embarcadero, circulan por la zona de estudio y se descargan a lo largo del aliviadero (Figura 293). El funcionamiento de estas filtraciones es independiente de las que se descargan por la surgencia del estribo derecho.

Los valores de PI observados para esta zona son de carácter homogéneo con ausencia de grandes valores de anomalía indicando que las filtraciones existentes son de poca importancia.



Figura 293. Múltiples puntos de descarga hacia el aliviadero de filtraciones generadas en el embalse las cuales circulan a través de la esquina noroeste de la zona de estudio hasta su descarga.

- Zona B. Zona de gran extensión y morfología bien definida caracterizada por presentar valores de potencial elevados la cual forma un arco que cruza desde la zona central de la orilla del embarcadero donde se producen las pérdidas principales del embalse hasta el punto de descarga del estribo derecho. La morfología de la anomalía permite considerar la existencia de un conducto principal a través del cual se canaliza el grueso del caudal de filtración (línea amarilla de traza discontinua gruesa). En la parte final de esta zona y dada la morfología de las anomalías de potencial, podrían existir dos zonas o canales secundarios de circulación que en cualquier caso, terminan junto con el principal, en el punto de descarga de la margen derecha.

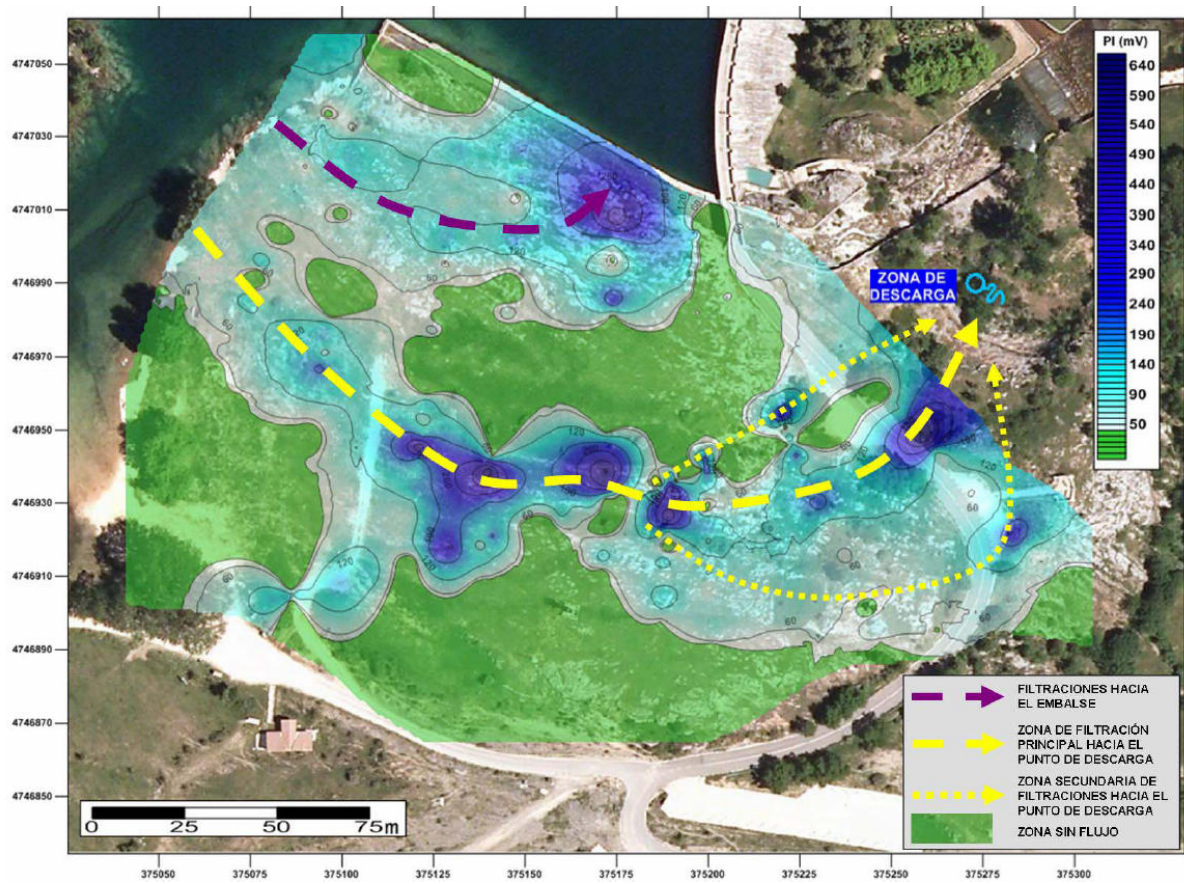


Figura 294. Plano de interpretación de los resultados del sistema PI (Software Surfer)

Teniendo en cuenta la morfología de la zona B es posible determinar una zona que presentando poca extensión lateral y concentración de todos los posibles conductos de filtración pueda ser objeto de tratamientos para frenar las filtraciones (Figura 295, zona roja).

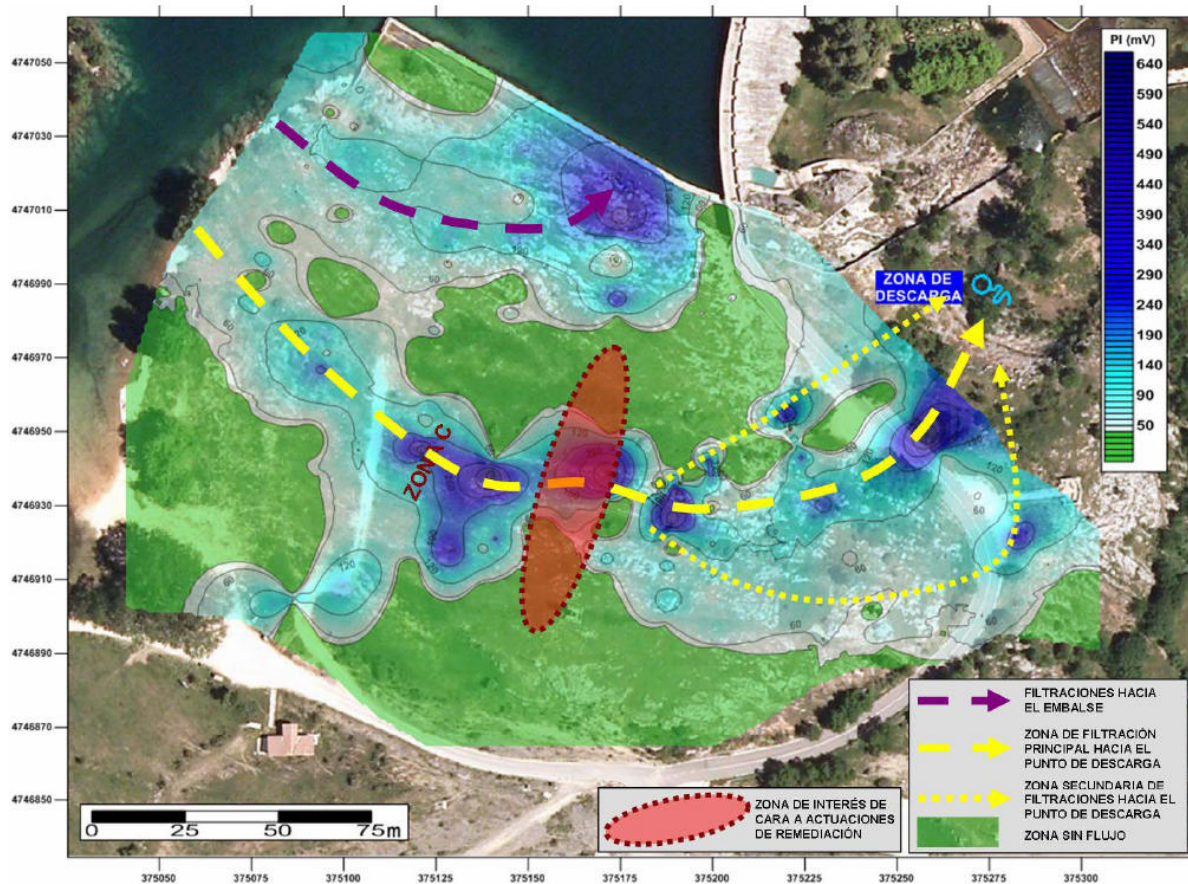


Figura 295. Plano con indicación de la zona de estrechamiento y concentración de los flujos de filtración causantes de la descarga de la margen derecha y por tanto, de de interés de cara a la realización de posibles actuaciones de remediación (Software Surfer).

7.7.- Análisis de la investigación

Por tanto, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La cerrada de la presa presenta una estructura geológica compleja estando formada principalmente por materiales pertenecientes a la Formación Calizas de Montaña. Dichos materiales se encuentran plegados y fracturados pero con un buzamiento predominante de unos 30 a 45° al norte.
- Se ha realizado un ensayo con trazador salino, determinando la conexión hidráulica del embalse y el punto de surgencia del estribo derecho. La velocidad media de circulación del agua es de 0,16 m/s (15,5 cm/s). Dicha velocidad indica que la vía de circulación es de tipo kárstico.
- El análisis de los datos de TE (Tomografía Eléctrica) confirman que la zona de estudio esta ocupada por materiales carbonatados de la formación Calizas de Montaña.



- Los materiales carbonatados presentan buzamientos de 30 a 50° al norte. Dentro de los mismos, ha sido posible la diferenciación de una serie de discontinuidades interpretadas como planos de karstificación asociado a la estratificación, que puede corresponder a un estrato más margocalizo con aperturas y oquedades con posibles rellenos margosos.
- Se define con claridad la existencia de una zona de fractura que divide la zona de estudio en dos bloques bien diferenciados. Dicha discontinuidad genera la elevación del bloque norte respecto al sur con un salto estimado a partir de la correlación entre los planos de estratificación de unos 50 m.
- El análisis conjunto de los sistemas de TE (Tomografía Eléctrica) y PI (Potencial Inducido) ha permitido definir las zonas a través de las cuales se están produciendo las filtraciones (flujo subterráneo), las cuales están asociadas a la conjunción de los planos de estratificación y la zona de fractura.
- El desarrollo del sistema kárstico tiene relación con la interferencia entre planos de estratificación y la zona de fractura siendo estas discontinuidades las que condicionan el flujo subterráneo.
- El flujo subterráneo que se desarrolla a través del estribo de la margen derecha de la presa, a partir de filtraciones en el embalse, presenta las siguientes particularidades:
 - Existe una bifurcación en el flujo, produciéndose una descarga hacia el propio embalse (canal del aliviadero por rebose) y otro hacia la zona de descarga, situada en la margen derecha aguas debajo de la presa (Zona de descarga).
 - El flujo subterráneo que se desarrolla a través del estribo derecho de la presa hacia la zona de descarga sufre un significativo estrechamiento en una zona donde el desarrollo kárstico asociado a la conjunción fractura/estratificación está menos desarrollado y se produce una condensación del flujo.
 - Se trata de un flujo rápido con un gradiente relativamente elevado controlado por la lámina de agua en el embalse ($i_{max} \approx 0,964$)
 - Las conjunciones fractura – estratificación que controlan el flujo subterráneo se desarrollan a cotas de entre 1.005 y 1.025 m.s.n.m, algo superiores a la cota de descarga (1.017,5 m.s.n.m.).



8.- CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE FILTRACIÓN EN LA PRESA DE BENINAR T.M. DE BERJA (ALMERÍA)

8.1.- Introducción

Uno de los objetivos fundamentales de este estudio es la localización de las posibles zonas de filtración que sufre el embalse desde su puesta en servicio. La localización de estas zonas permitirá realizar actuaciones de remediación que traten de mitigar, al máximo, esta problemática, mejorando la gestión del recurso hídrico.

En este apartado se describen con detalle los trabajos de prospección realizados así como los resultados de procesado e interpretación de los mismos.

8.2.- Método del Potencial Espontáneo (PE)

El reconocimiento del embalse de Benínar mediante el sistema de Potencial Espontáneo tiene como objetivo fundamental, la localización de zonas relacionables con posibles fenómenos de filtración.

El estudio de los fenómenos de filtración, es una de las principales aplicaciones de este sistema de investigación geofísica, dichos fenómenos, generan fuertes alteraciones en los valores del Potencial Espontáneo natural del terreno.

Como regla general, en el caso de fenómenos de filtración, estos se caracterizan por:

- Presentar valores negativos de potencial (Figura 296).
- Generar elevados gradientes de variación en los valores de potencial registrados, independientemente del valor de los mismos. (Figura 297).

De forma grafica, estas dos casuísticas se visualizan en las siguientes figuras:

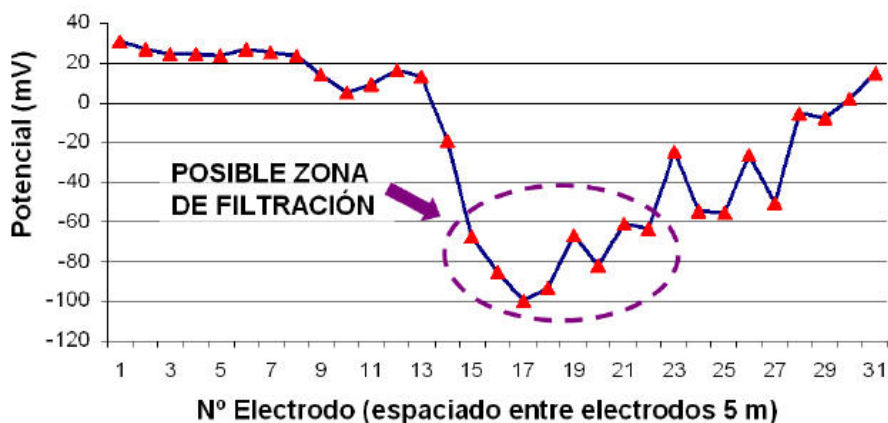


Figura 296. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los cambios en el signo del potencial

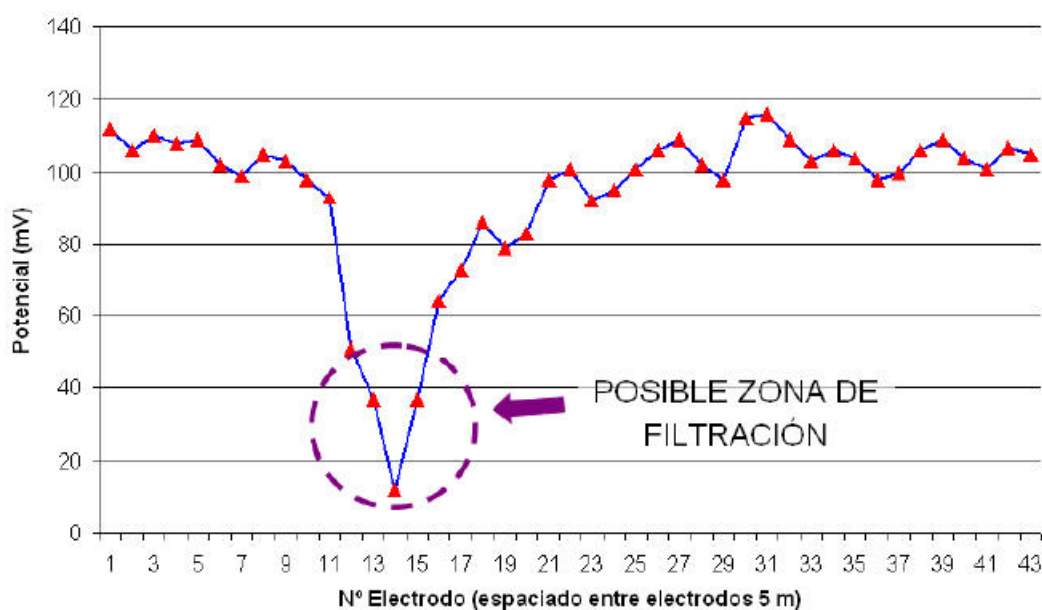


Figura 297. Perfil de Potencial Espontáneo caracterizando una posible zona de filtración en base a los descensos en los valores de potencial

En el caso de la aplicación del sistema de Potencial Espontáneo en el embalse de Benínar, hay que diferenciar dos zonas de aplicación (zona no inundada y inundada), las cuales se diferencian tanto en la metodología de toma de datos, como en las características del campo del Potencial Espontáneo, por lo que el tratamiento e interpretación de las mismas será diferenciado.

Las características del Potencial Espontáneo en la zona no inundada y en zonas cubiertas por agua son diferentes. Las anomalías observadas en tierra resultan más intensas como consecuencia de un mayor contraste entre los valores máximos y mínimos que se detectan, mientras que en el caso de las zonas inundadas, el agua genera un efecto que tiende a atenuar las variaciones del potencial registrado.

Estos condicionantes no permiten realizar un tratamiento conjunto de los datos obtenidos para toda la zona de estudio. Sin embargo, en la fase de interpretación si es posible emplear las similitudes existentes en la morfología de las zonas anómalas permitiendo el seguimiento espacial de las anomalías entre ambas zonas.

8.2.1.- Trabajos relacionados con la zona inundada del embalse

El reconocimiento del vaso del embalse mediante potencial espontáneo tiene como objetivo la localización de zonas de anomalía relacionables con posibles fenómenos de filtración a través del vaso en la zona inundada.

Los trabajos realizados han consistido en la ejecución de perfiles de investigación paralelos entre sí y puntos aleatorios de observación tratando de cubrir toda el área embalsada con la ayuda de una embarcación (Imagen 46).



Imagen 46. Trabajos de investigación del Potencial Espontáneo en el embalse de Benínar.

En el caso de las investigaciones en la zona inundada del embalse, se han realizado un total de 556 puntos de medición (Figura 298) con cota de lámina de embalse de 323 m.s.n.m..

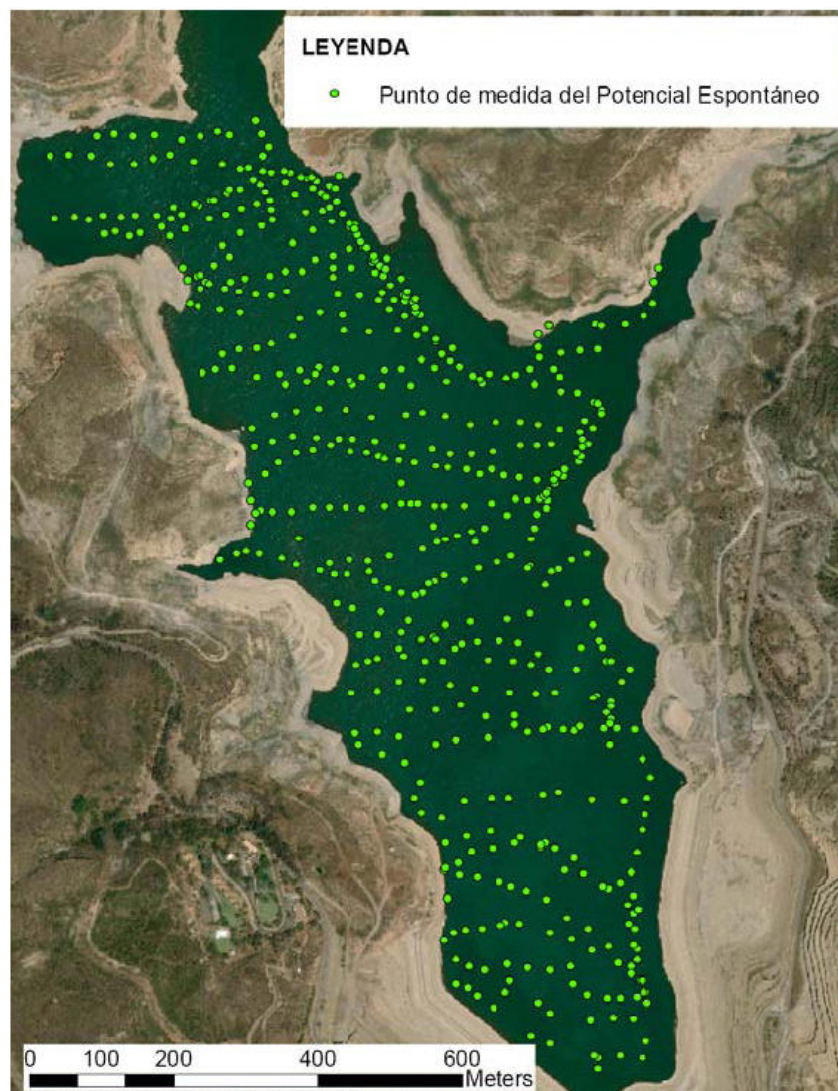


Figura 298. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en el vaso del embalse bajo la lámina de agua para localizar zonas de filtración. El nivel del embalse de la ortofoto no refleja el nivel real del mismo durante las medidas (Software ArcGIS).



En la Figura 299 se muestran los resultados del procesado de los valores de Potencial Espontáneo obtenidos en la zona inundada del Embalse de Benínar.

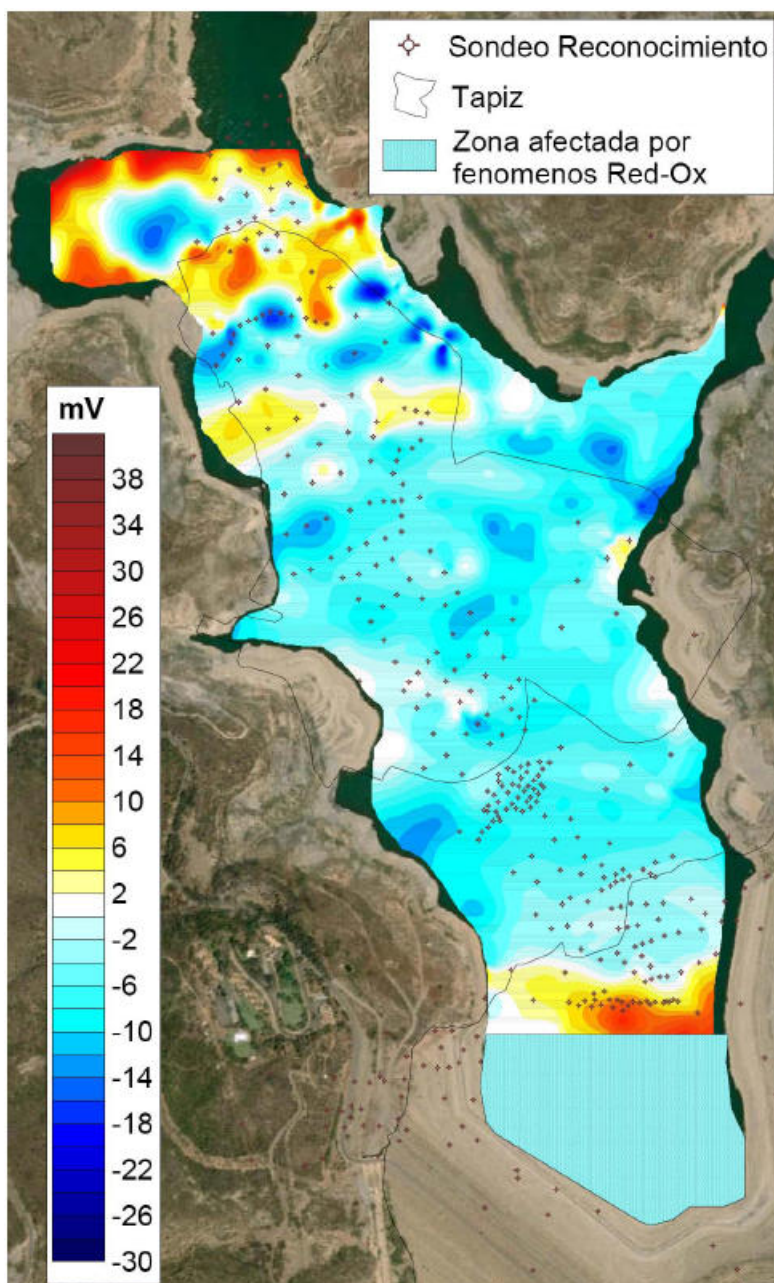


Figura 299. Potencial Espontáneo de la zona inundada del Embalse de Benínar (Software Surfer).

Resultados Obtenidos

La figura 299 muestra los datos obtenidos del procesado del PE para la zona inundada del Embalse de Benínar. De cara a la interpretación, se han superpuesto las zonas ocupadas por los tapices impermeabilizantes y los sondeos de investigación de las zonas permeables realizados durante la construcción de la presa.

Los resultados obtenidos muestran una serie de anomalías de potencial caracterizadas por presentar valores negativos, lo cual, como se ha comentado con anterioridad, se puede relacionar con la presencia de fenómenos de filtración. De estas anomalías, las más claras son las situadas en el sector norte (Figura 300). Dichas anomalías se caracterizan por presentar fuertes gradientes de variación de los valores de potencial así como valores negativos del mismo. Este hecho, unido a la no presencia de tapices impermeabilizantes, las sitúa como zonas claras a investigar mediante perfiles de Tomografía Eléctrica y Potencial Inducido.

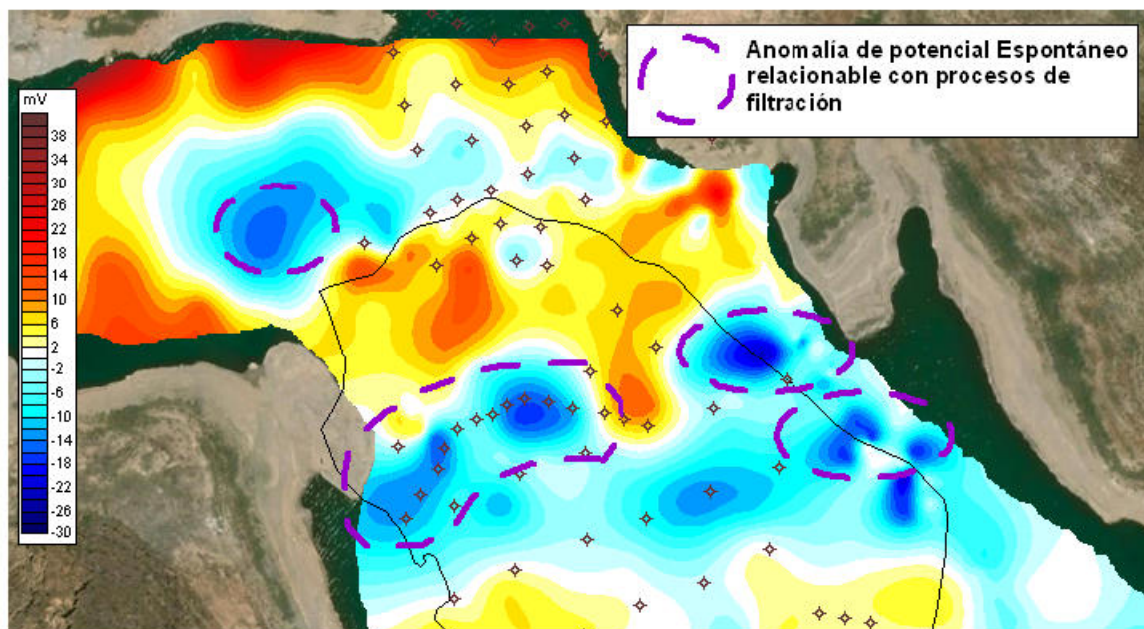


Figura 300. Detalle del Potencial Espontáneo del sector norte del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).

El sector central de la zona embalsada corresponde a la zona de emplazamiento de las dolinas 2, 3 y zonas permeables de los talleres y pueblo, por lo que fue ampliamente tratado mediante la ejecución de un gran tapiz de filitas. Los datos obtenidos para este sector, muestran como la zona presenta valores negativos de potencial de forma general, existiendo varias zonas de mínimos locales de pequeña extensión que pueden estar relacionadas con zonas de pérdida.

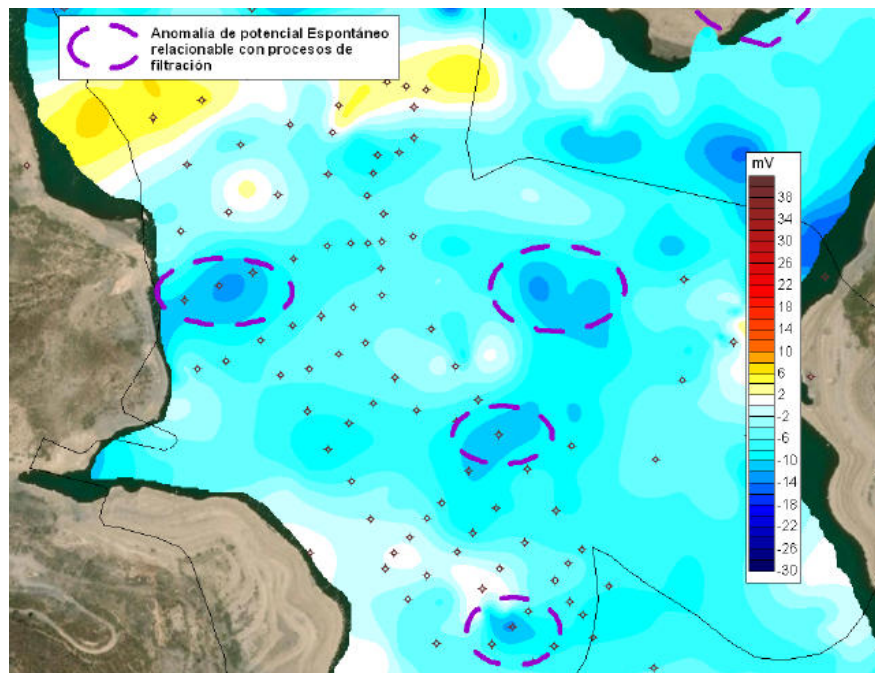


Figura 301. Detalle del Potencial Espontáneo del sector central del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).

En la zona del pueblo, aparece una anomalía negativa alargada de dirección NW-SE que finaliza relativamente cerca de la zona del colapso de 2004 (Dolina 2004).

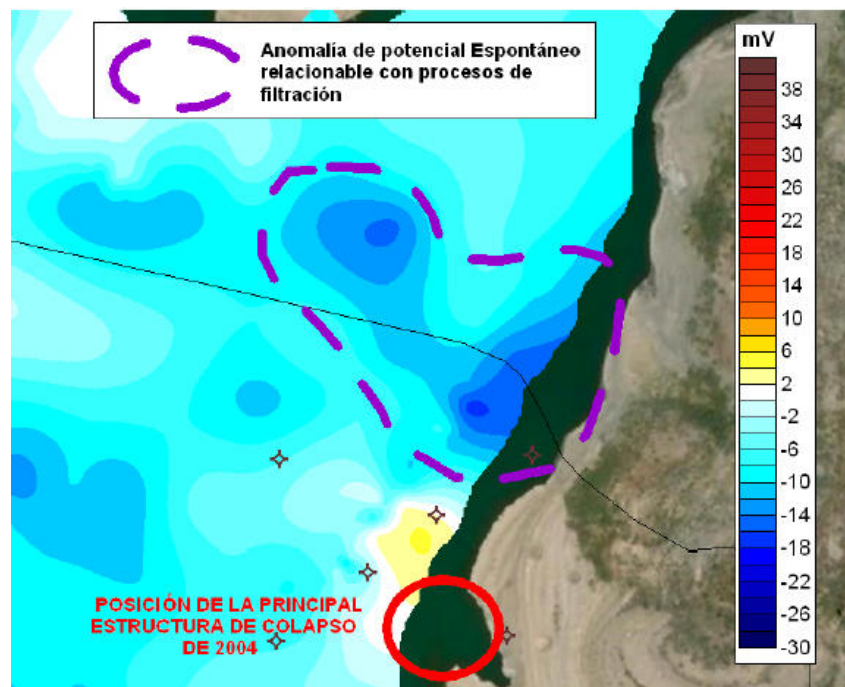


Figura 302. Detalle del Potencial Espontáneo del sector del Pueblo del vaso del Embalse de Benínar cubierto por lámina de agua (Software Surfer).



Por último, cabe destacar como los valores obtenidos en las inmediaciones del cuerpo de presa, parecen estar afectados por fenómenos de oxidación, reducción que alteran de forma importante, la calidad de los resultados. Este efecto se explica con mayor detalle en el apartado dedicado a la investigación con potencial espontáneo del cuerpo de presa.

8.2.2.- Trabajos relacionados con la zona no inundada del embalse

La investigación de las márgenes de la zona embalsada persigue el objetivo de analizar la posible continuidad en tierra de las anomalías de potencial detectadas en la investigación de la zona inundada ya que, dadas las características tectónicas y litológicas de los materiales involucrados, podrían indicar patrones de dirección del flujo de filtración, así como posibles relaciones litoestratigráficas (materiales por los que se produce la filtración).

Los trabajos realizados en estas zonas del embalse han consistido en la realización de tres perfiles paralelos entre sí y a la orilla del embalse con puntos de medición situados cada 20 m. Además de estos perfiles se han tomados puntos aleatorios con el fin de cubrir de forma homogénea el área de estudio. En total, se han realizado 750 puntos de investigación cuya posición se puede ver en la Figura 303.



Figura 303. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en las márgenes del embalse de Benívar (Software ArcGIS).



Resultados Obtenidos

La interpretación se realiza analizando de forma conjunta los resultados obtenidos para la zona inundada y no inundada del Embalse de Benínar, tal y como se puede apreciar en la figura inferior (Figura 304).

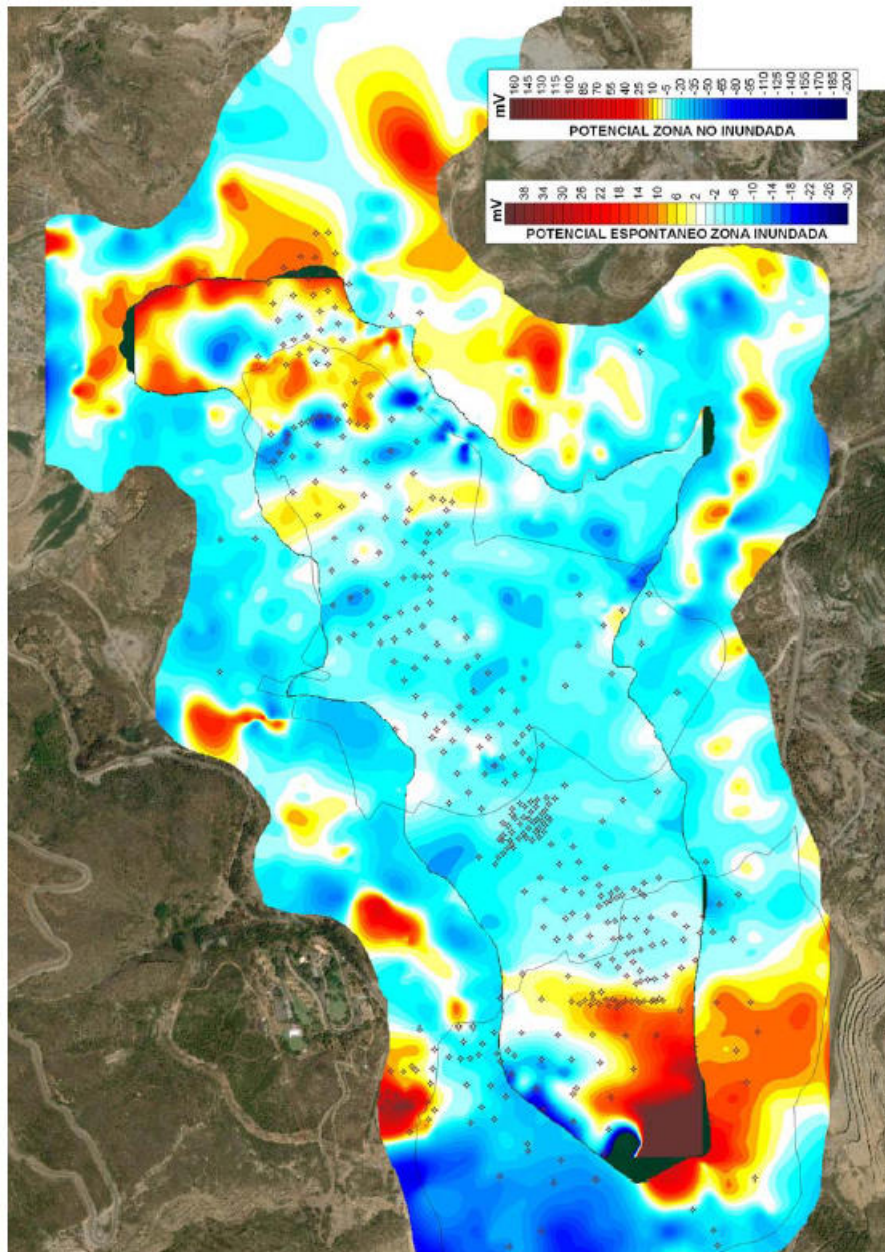


Figura 304. Visualización conjunta del Potencial Espontáneo obtenido para la zona inundada y no inundada del Embalse de Benínar (Software Surfer).



En la imagen, podemos observar como existe una concordancia general entre los valores de potencial obtenidos en las zonas inundada y no inundada²⁴.

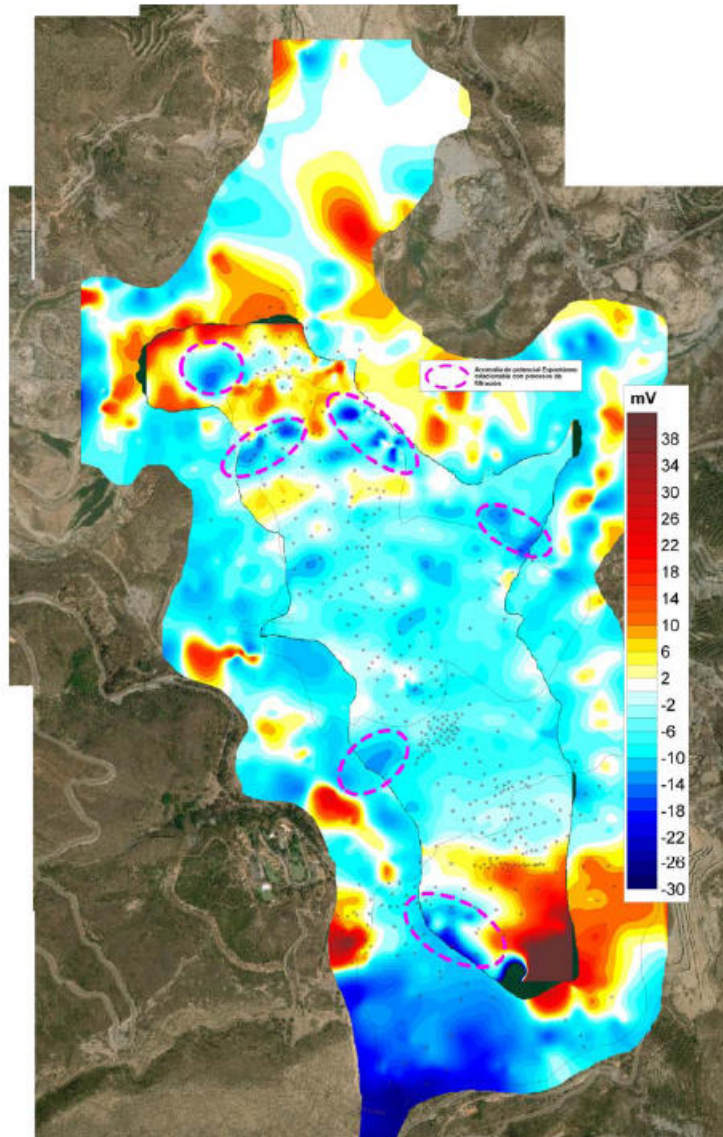


Figura 305. Anomalías de potencial espontáneo en la zona de contacto entre el análisis de la zona inundada y no inundada del embalse de Benínar. Los círculos trazados con línea rosa discontinua reflejan la posición de las principales anomalías detectadas (Software Surfer).

Las anomalías detectadas no parecen tener una continuidad clara tierra adentro, lo cual, podría indicar que el flujo de filtración tiene una clara componente vertical. Este factor, unido a la elevada profundidad a la que se emplaza el nivel piezométrico general del acuífero bajo el

²⁴ Las escalas de representación de los valores de potencial para la zona inundada y no inundada no son equivalentes. Esta modificación se realiza debido a las diferentes características del Potencial Espontáneo en la zona inundada y no inundada (las anomalías observadas en tierra resultan más intensas como consecuencia de un mayor contraste entre los valores máximos y mínimos que se detectan, mientras que en el caso de las zonas inundadas, el agua genera un efecto que tiende a atenuar las variaciones del potencial registrado).

embalse (más de 100 m bajo la cota de cimentación), descarta que el caudal infiltrado circule a través de los materiales aluviales del Río bajo los tapices, hacia la cimentación de la presa.

Como resultado del análisis conjunto de los datos de Potencial espontáneo, se han seleccionado un total de siete perfiles de investigación mediante Tomografía Eléctrica. La posición de los mismos puede verse en la figura inferior (Figura 306).

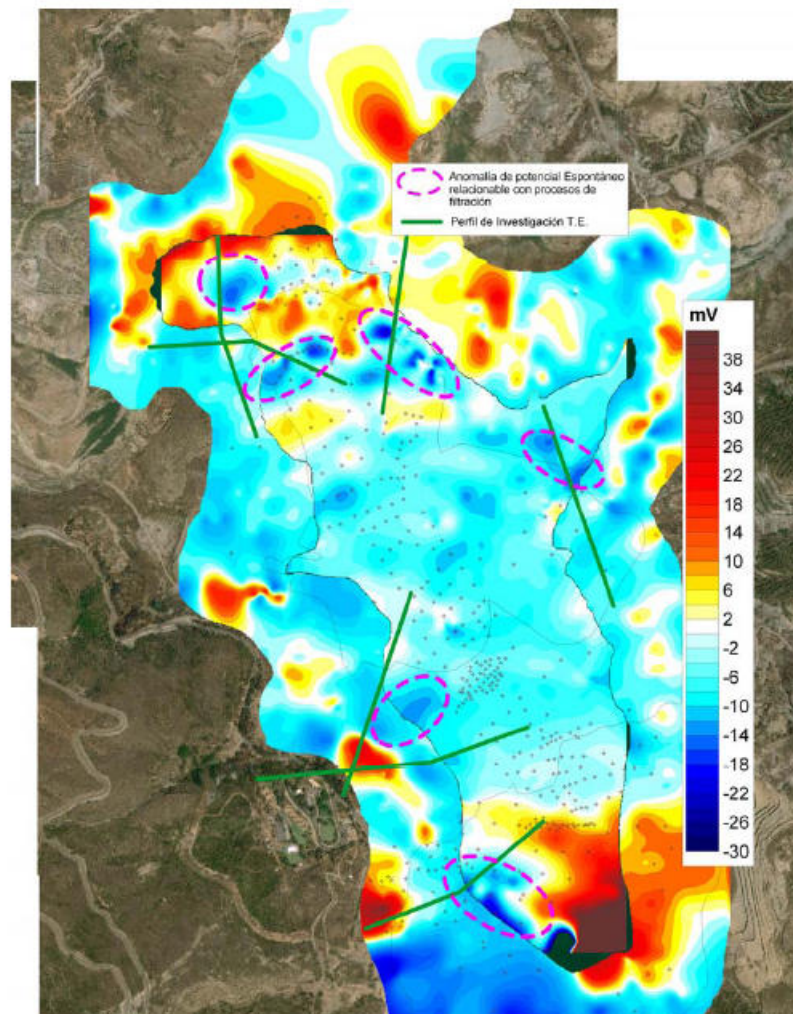


Figura 306 Perfiles de investigación de Tomografía Eléctrica a realizar en el vaso del pantano (líneas verdes) como resultado del análisis de los datos de Potencial Espontáneo (Software Surfer).

El análisis de las anomalías determinadas únicamente con los datos de Potencial Espontáneo de la zona inundada muestra como dichas anomalías tienen una morfología no lineal, que en la mayoría de los casos, no parecen continuar de forma clara hacia tierra adentro. Este hecho se relaciona con un posible flujo de filtración de carácter predominantemente vertical, el cual, es concordante con la presencia de un nivel freático regional muy deprimido respecto al fondo del vaso del pantano (nivel piezométrico general situado más de 100 m por debajo del fondo del vaso).



Por último, cabe destacar como los valores obtenidos en las inmediaciones del cuerpo de presa, al igual que en las investigaciones de la zona inundada, parecen estar afectados por fenómenos de oxidación, reducción que afectan de forma importante, a la calidad de los resultados. Este efecto se explica con mayor detalle en el apartado dedicado a la investigación con potencial espontáneo del cuerpo de presa.

Peña de la Jaca

Durante la primera semana de Octubre, se realizó una prueba en el sector de la Peña de la Jaca con el objetivo de obtener parámetros cualitativos de interpretación entre los valores de Potencial Espontáneo obtenidos y los posibles caudales de infiltración.

Para ello, se seleccionó un tramo de río en el que no existiera escorrentía superficial, aforando el río aguas arriba en una zona con caudal superficial en el momento de las mediciones.

Si suponemos que todo el caudal aforado se infiltra y circula por las zonas más permeables del aluvial del río depositado por encima de los tratamientos, los valores de potencial espontáneo registrados deben responder a la existencia de cierta escorrentía subterránea.

Para el registro del potencial espontáneo se realizó un perfil de investigación (J1-J2) coincidente de tomografía eléctrica y potencia espontáneo (los puntos de observación del potencial fueron coincidentes con los electrodos del perfil de tomografía), situado de forma ortogonal al cauce del río, cuya posición, puede verse en la Figura 307.

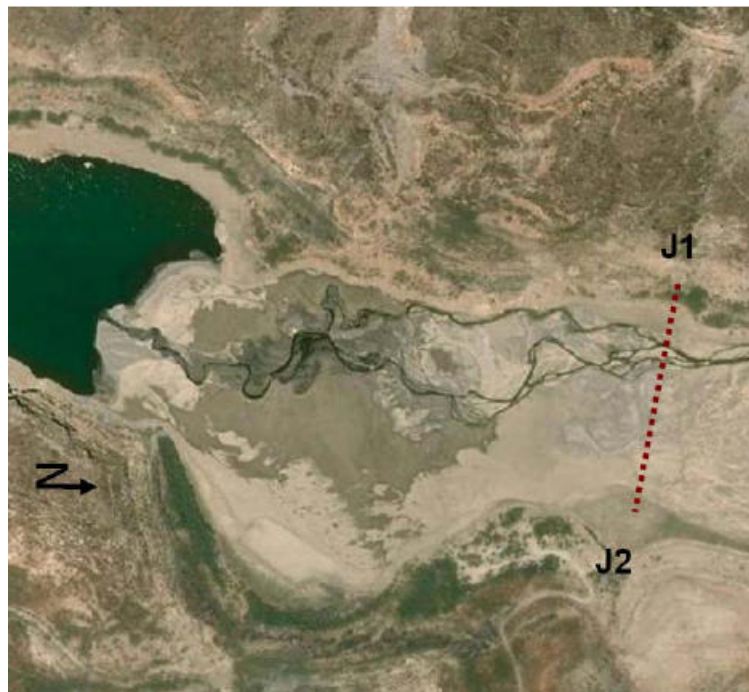


Figura 307. Distribución espacial de los puntos de investigación del Potencial Espontáneo realizados en las márgenes del embalse de Benínar



La realización de la tomografía eléctrica responde a la necesidad de detectar el espesor de materiales aluviales sobre el tapiz impermeabilizante y, en segunda instancia, determinar los posibles sectores más permeables dentro del aluvial, por los que circulará la mayoría del flujo de escorrentía subterránea.

Los datos de inversión del perfil de tomografía (Figura 308) muestran con claridad una primera capa correspondiente a los rellenos aluviales, bajo la que se sitúa una capa conductora, correspondiente al tapiz. Bajo ambas capas, vemos, que el sector de la derecha está ocupado por terrenos resistivos de naturaleza calcárea (permeables), mientras que la parte izquierda está formada por una importante capa de filitas. El contacto entre ambos es bastante neto, por lo que debe ser de carácter tectónico (falla).

El tapiz se extiende bajo los rellenos aluviales por encima de los carbonatos hasta el contacto con las filitas para evitar las filtraciones que se pueden producir a través de los carbonatos.

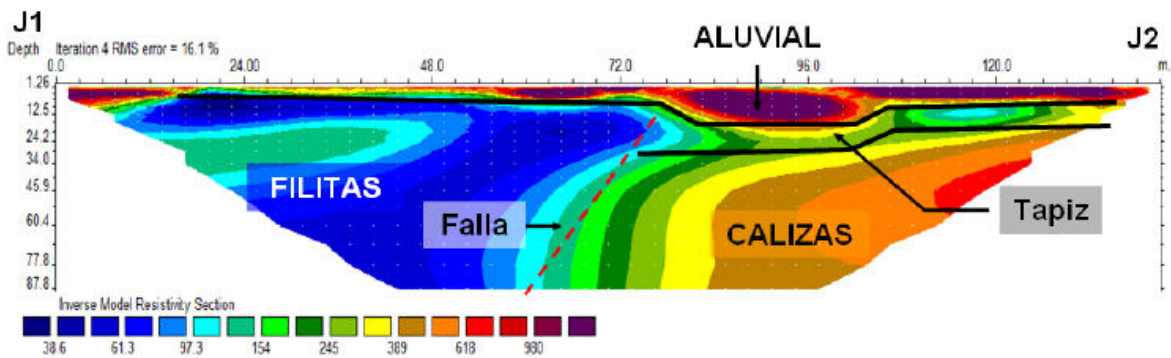


Figura 308. Perfil Tomografía Eléctrica en la zona de la Peña de la Jaca

Los rellenos aluviales alcanzan los 16 m en la parte central del perfil, en el que se aprecia una cubeta concordante con la estructura de los tratamientos realizados en la zona (canal central de conducción del río). Además, parece existir cierta organización en los mismos, ya que aparecen unas bolsadas de materiales caracterizados en tonos violáceos que deben corresponder a las litologías más resistivas y permeables por las que presumiblemente se produce la circulación preferente del flujo subterráneo.

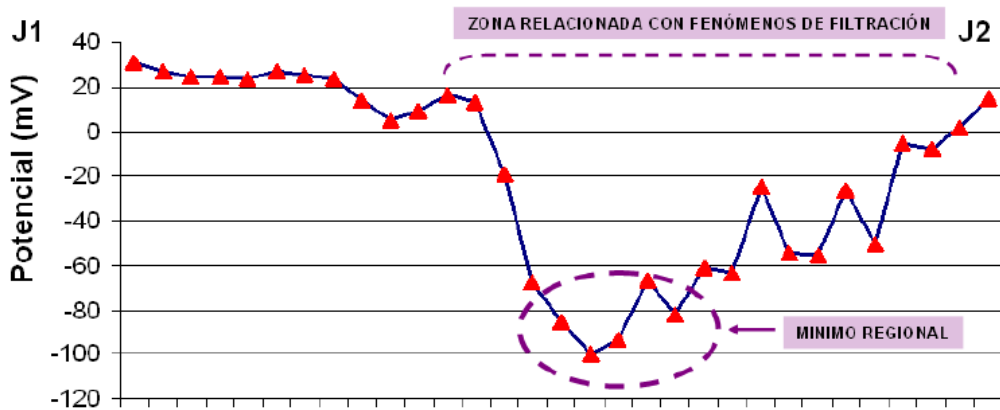


Figura 309. Perfil de Potencial Espontáneo realizado en la zona de la Peña de la Jaca

Si analizamos los resultados del perfil de Potencial Espontáneo, vemos como se detecta con claridad una anomalía muy intensa (descenso total de 140 mV), la cual se debe al flujo de escorrentía subterránea a través del aluvial. No obstante, dentro de la anomalía se aprecia un mínimo coincidente en su posición, con el canal de conducción del río realizado en los tratamientos de impermeabilización. Dicha anomalía parece estar fuertemente condicionada por la existencia de, al menos, dos tuberías metalizas abandonadas en esta zona durante al construcción. El efecto de estas tuberías es similar al que se observa en el caso de la investigación del cuerpo de presa mediante este sistema de prospección geofísica. No obstante, una vez que nos alejamos de este mínimo máximo, la anomalía pierde intensidad pero se mantiene, indicándonos que la anomalía está relacionada, en su gran mayoría, por el flujo de agua subterráneo.

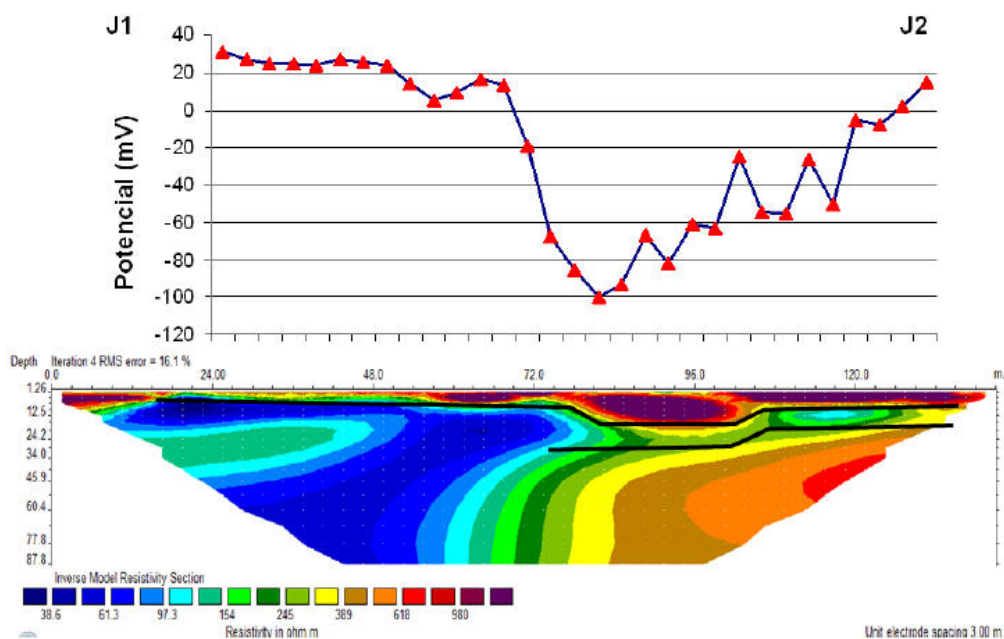


Figura 310. Comparación entre los valores de Potencial Espontáneo y Perfil de Potencial Espontáneo realizado en la zona de la Peña de la Jaca



8.2.- Método del Potencial Inducido (PI)

Dadas las características del sistema de potencial inducido, así como sus aplicaciones, su uso se enfocara a la localización de zonas de fracturación por las que se esté produciendo una filtración, ya que cuando hacemos circular una corriente eléctrica a través de un material por el que se está produciendo una filtración, se incrementa artificialmente el potencial espontáneo que se produce debido al intercambio iónico que se genera debido al flujo de agua entre la superficie de contacto de los poros y los electrolitos disueltos en los líquidos que ocupan los poros intergranulares.

Los trabajos realizados han ido ligados a los perfiles de investigación de tomografía eléctrica al ser el mismo equipo, el encargado de realizar el registro.

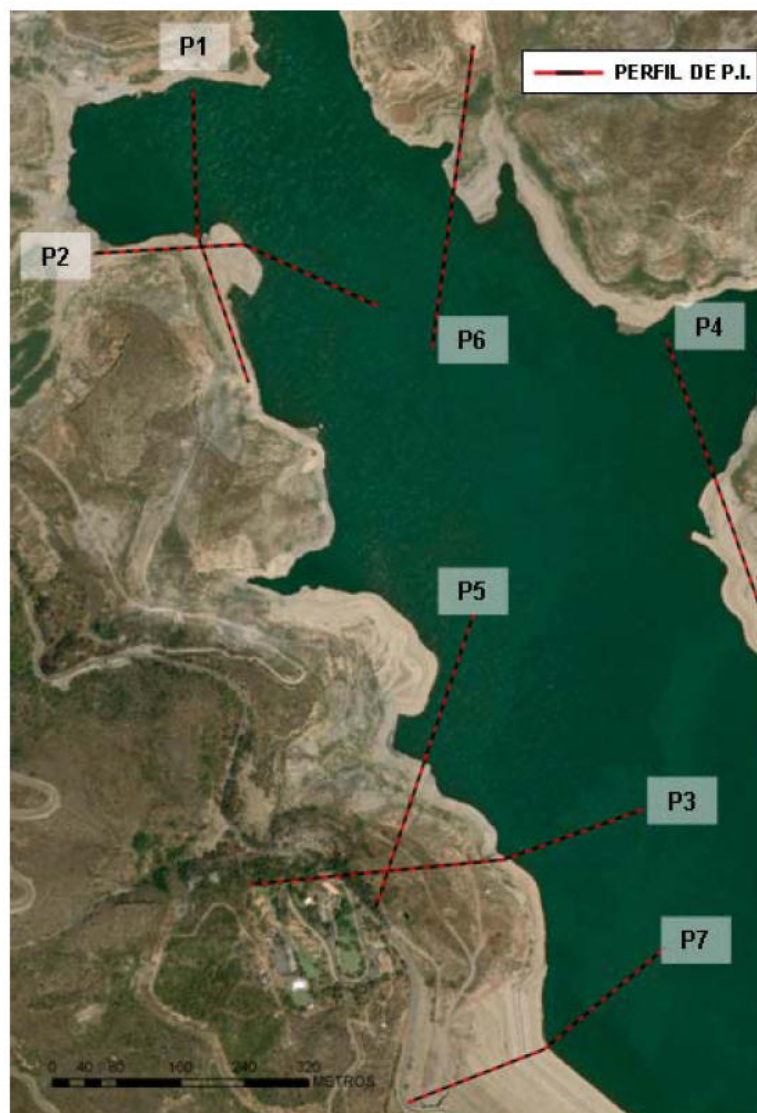


Figura 311. Perfiles de P.I. realizados para la investigación de fenómenos de filtración en la zonainundada del embalse



| PERFIL | COORDENADAS | | | | | | LONGITUD (m) |
|--------|-------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|--------------|
| | INICIAL X | INICIAL Y | GIRO X | GIRO Y | FINAL X | FINAL Y | |
| P1 (A) | 497.289 | 4.082.668 | 497.294 | 4.082.492 | 497.358 | 4.082.305 | 374 |
| P2 (A) | 497.165 | 4.082.466 | 497.352 | 4.082.477 | 497.520 | 4.082.400 | 372 |
| P3 (A) | 497.518 | 4.081.744 | 497.851 | 4.081.773 | 497.361 | 4.081.679 | 502 |
| P4 (A) | 497.973 | 4.082.084 | | | 497.963 | 4.082.149 | 386 |
| P5 (A) | 497.640 | 4.082.017 | | | 497.517 | 4.081.650 | 387 |
| P6 (A) | 497.588 | 4.082.347 | | | 497.639 | 4.082.725 | 382 |
| P7 (A) | 497.557 | 4.081.407 | 497.727 | 4.081.473 | 497.879 | 4.081.601 | 380 |

Tabla 11. Perfiles de P.I. realizados en la zona inundada del embalse

La interpretación de los resultados de los perfiles de P.I. se realizará de forma simultánea a los perfiles de Tomografía Eléctrica.

8.3.- Método de Tomografía Eléctrica (TE)

La Tomografía Eléctrica es un sistema de investigación geofísico que permite la localización de zonas de filtración de forma indirecta. El sistema ofrece secciones bidimensionales de resistividad y profundidad real del terreno, las cuales pueden ser relacionadas con diferentes litologías y materiales.

La aplicación de la Tomografía Eléctrica en el vaso y márgenes persigue la consecución de los siguientes objetivos:

- Localización espacial de litologías permeables. En este caso, se tratarán localizar la existencia de litologías permeables (carbonatos y/o yesos bajo los recubrimientos de acarreo del lecho del embalse sin tratamientos de impermeabilización).
- Análisis del grado de fracturación y o karstificación de diversas litologías.
- Localización de fallas o zonas de fracturación por las que se puedan producir filtraciones.
- Localización de posibles dolinas (zonas permeables recubiertas por acarreo) y determinación de la potencia de las mismas.
- Localización de posibles zonas de alteración de los tapices. La presencia de fenómenos de filtración o rotura de la pantalla debe reflejar incrementos o descensos en los valores medios de resistividad que presente la zona ocupada por los materiales que conforman la pantalla impermeabilizante.

En este caso, se han realizado un total de siete perfiles de investigación con un espaciado entre electrodos de 10 m con las siguientes características:



| PERFIL | COORDENADAS | | | | | | LONGITUD (m) |
|--------|-------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|--------------|
| | INICIAL X | INICIAL Y | GIRO X | GIRO Y | FINAL X | FINAL Y | |
| P1 (A) | 497.289 | 4.082.668 | 497.294 | 4.082.492 | 497.358 | 4.082.305 | 374 |
| P2 (A) | 497.165 | 4.082.466 | 497.352 | 4.082.477 | 497.520 | 4.082.400 | 372 |
| P3 (A) | 497.518 | 4.081.744 | 497.851 | 4.081.773 | 497.361 | 4.081.679 | 502 |
| P4 (A) | 497.973 | 4.082.084 | | | 497.963 | 4.082.149 | 386 |
| P5 (A) | 497.640 | 4.082.017 | | | 497.517 | 4.081.650 | 387 |
| P6 (A) | 497.588 | 4.082.347 | | | 497.639 | 4.082.725 | 382 |
| P7 (A) | 497.557 | 4.081.407 | 497.727 | 4.081.473 | 497.879 | 4.081.601 | 380 |

Tabla 12. Trabajos restantes de T.E. y localización de los mismos

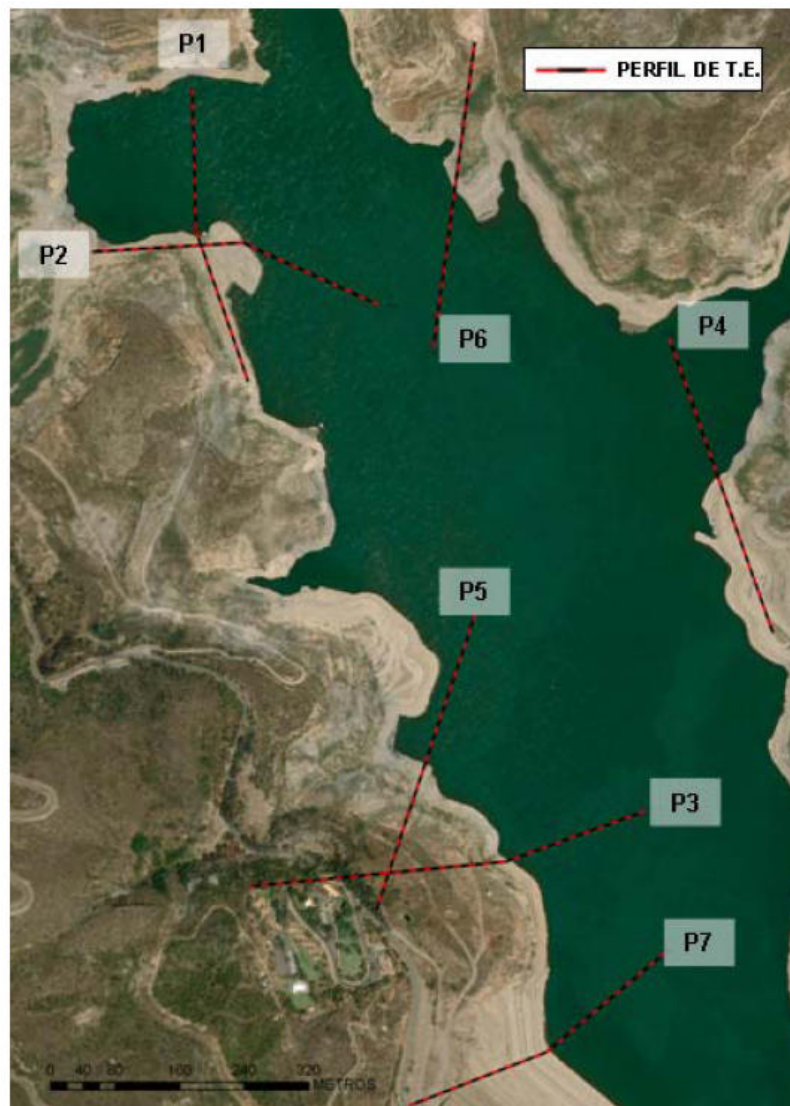


Figura 312. Perfiles de T.E. realizados para la investigación de fenómenos de filtración en la zona inundada del embalse



A continuación, se presenta la sección geoelectrica obtenida tras la inversión de los resultados de los perfiles de T.E. realizados en esta zona de estudio. La interpretación de los mismos se realiza en el apartado 4.5 dedicado al análisis conjunto de resultados.

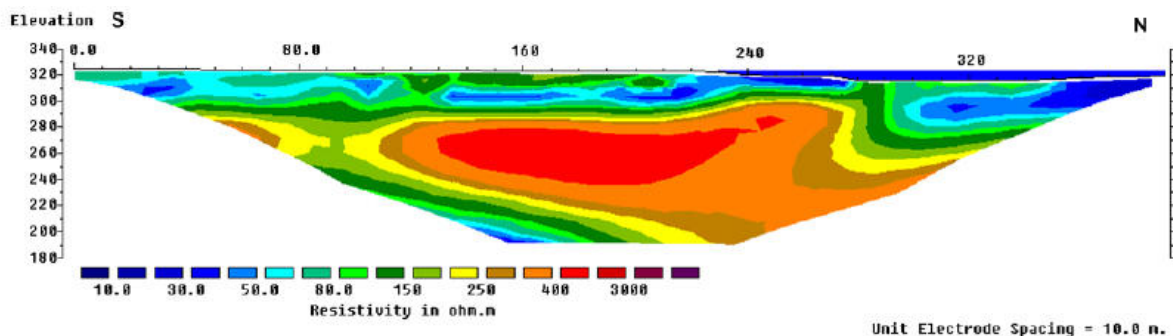


Figura 50. Perfil P-1 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

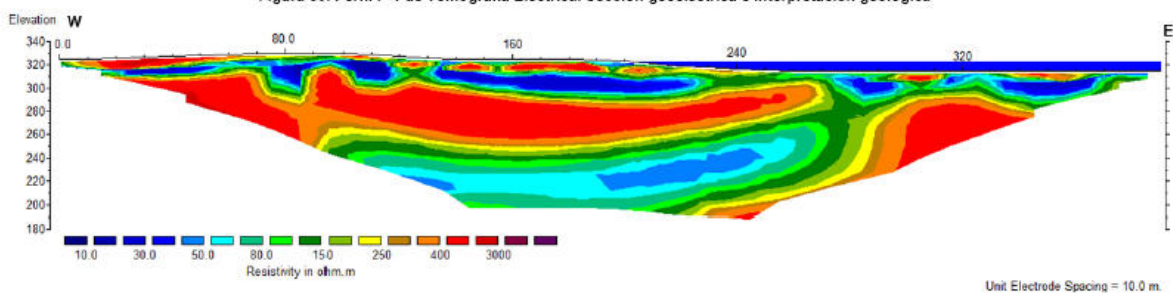


Figura 313. Perfil P-2 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

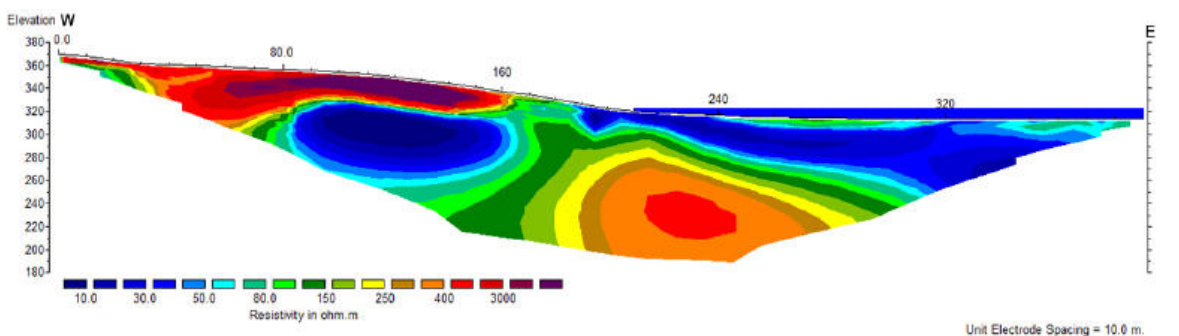


Figura 52. Perfil P-3 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

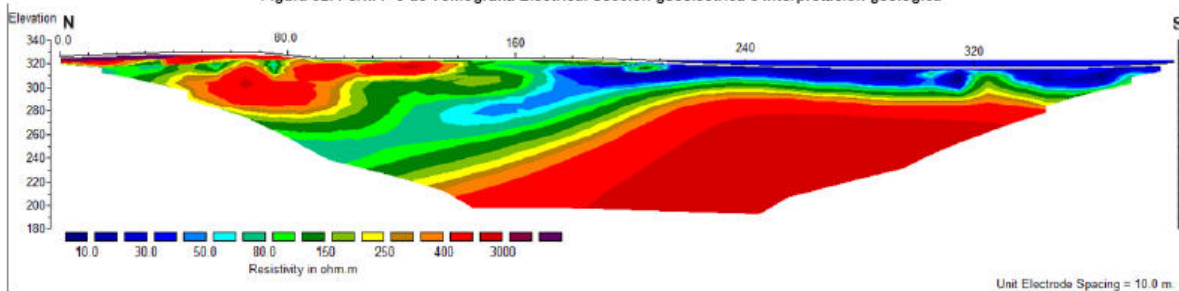


Figura 314. Perfil P-4 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

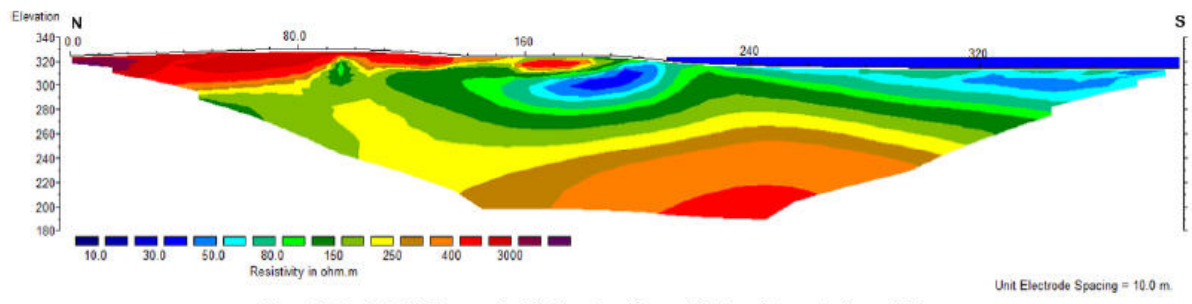


Figura 54. Perfil P-6 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

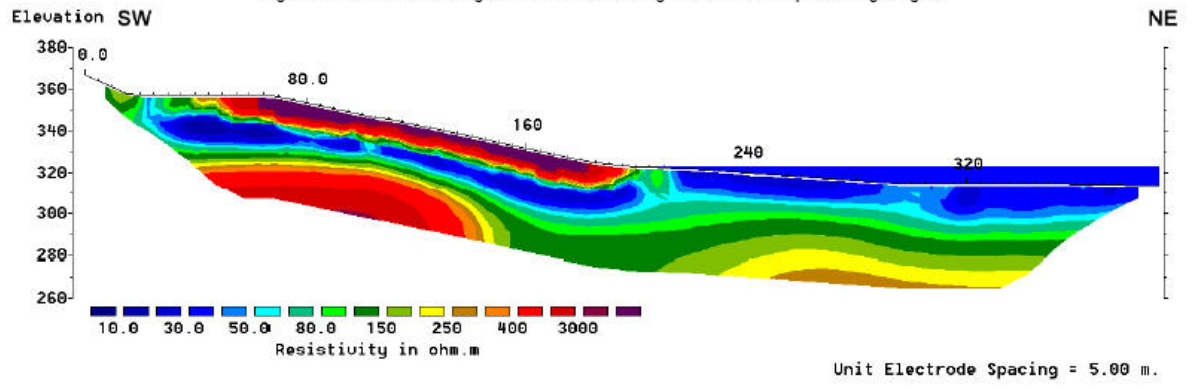


Figura 315. Perfil P-7 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica

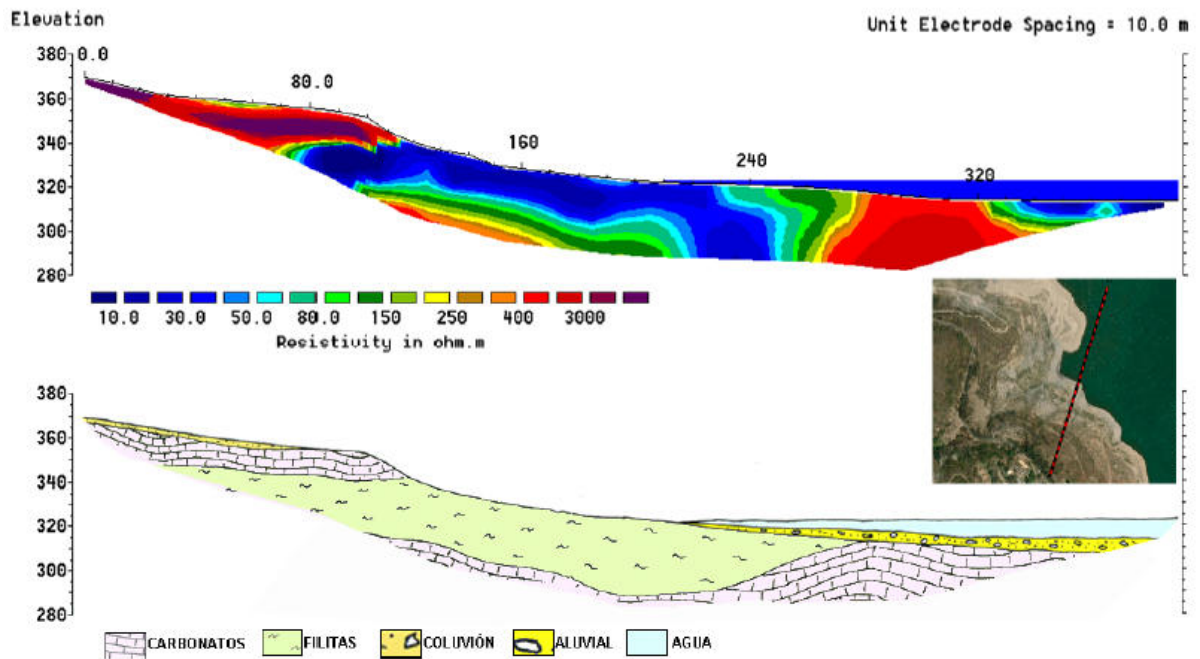


Figura 316. Perfil P-5 de Tomografía Eléctrica. Sección geoelectrica e interpretación geológica



8.4.- Análisis conjunto de resultados (TE)

La identificación de una posible zona de filtración se realiza atendiendo al análisis de los resultados particulares de las tecnologías de investigación aplicadas en la zona de estudio.

Para ello, se superpone en un mismo esquema, los resultados de los sistemas de Potencial Espontáneo, Potencial Inducido y Tomografía Eléctrica y se interpretan de forma conjunta. Para realizar dicha interpretación, hay que tener en cuenta la información que ofrece cada uno de los sistemas de investigación.

En el caso de los dos primeros (P.E. y P.I.), estos muestran la respuesta del terreno frente a un proceso fisicoquímico de la filtración, mientras que en el caso de la Tomografía Eléctrica, esta nos indica la presencia o no de litologías, zonas de alteración y/o fallas a través de las cuales pueda circular el flujo de filtración desde el embalse.

Atendiendo a estos planteamientos previos se puede deducir que una filtración vendrá definida con claridad cuando exista concordancia en los resultados de los tres sistemas de investigación, o lo que es lo mismo, detección de anomalías causadas por procesos de filtración (P.E. + P.I.) y zona permeable por la que circular.

De cara a una correcta interpretación de los resultados ofrecidos por cada uno de los sistemas de investigación, hemos de tener en cuenta algunos factores que pueden influir en la interpretación errónea de los resultados:

- Las anomalías de P.E. y P.I. no siempre son generadas por procesos de electrofiltración. La existencia de menas metálicas y fenómenos de oxidación-reducción pueden dar anomalías similares a las producidas por la filtración de agua a través de un medio poroso. Estos fenómenos se han observado con claridad en la zona del cuerpo de presa donde la oxidación de parte de la estructura, así como la presencia de numerosos elementos metálicos de la cimentación ha impedido la correcta interpretación de los resultados en esta zona.
- La determinación del grado de alteración de los materiales impermeables de naturaleza filítica es compleja. Las filitas en estado natural presentan una composición heterogénea que engloba otro tipo de materiales como yesos, areniscas, etc, que incrementan notablemente su permeabilidad, así como la variabilidad de valores de resistividad que presentan.
- Se considerarán como filitas impermeables todas aquellas que presenten valores de resistividad inferiores a los 60 Ohm·m. Este valor se ha obtenido del análisis de los valores de resistividad que presentan las filitas en el núcleo de la presa y tapices.
- La diferenciación geoelectrica entre carbonatos y yesos es compleja, sobre todo en profundidad, si bien, en ambos casos, se trata de litología permeables por fracturación y/o karstificación.



- La diferenciación de los tapices en la zona inundada del embalse es muy compleja. Esto se debe a que los materiales constituyentes del tapiz se encuentran bajo espesores considerables de sedimentos de relleno del embalse (entre 5 y 15 m de potencia) totalmente saturados, y a que los materiales de la escollera y filtro, en principio resistivos, se encuentran totalmente saturados haciendo descender los valores de resistividad de forma notable. Todo ello hace que el conjunto se presente con valores conductores similares a los que presentan las filitas naturales impidiendo por tanto, su diferenciación.

A continuación, se analizan los resultados particulares de cada uno de los perfiles de investigación.

Perfil P-1

El análisis visual de los datos (Figura 317) muestra con claridad una concordancia total en los resultados de P.E., P.I. y T.E.. Si analizamos los obtenidos por cada uno de los sistemas de investigación de forma individual vemos como:

- En el caso de los valores de P.E., se aprecia una clara anomalía asociada a posibles fenómenos de filtración entre los metros 220 y 300, la cual presenta un fuerte gradiente de variación en los valores y presenta un mínimo de -15 mV.
- La gráfica correspondiente al P.I. muestra un incremento notable en los valores del potencial sobrepasando entre los metros 260 y 330 los 10 mV/A.
- En el caso del corte geoelectrico, se localiza con claridad la presencia de un cuerpo subhorizontal resistivo, de naturaleza probablemente carbonatada bajo una capa conductora que parece corresponderse con la existencia de filitas. El cuerpo carbonatado se someriza en las inmediaciones del metro 260 del perfil, viéndose interrumpido lateralmente de forma abrupta. Esta interrupción parece corresponderse con una importante fractura que hunde el bloque carbonatado en la parte final del perfil. Cabe destacar como entre los metros 240 y 300, y por encima de los materiales carbonatados no se obtienen valores de resistividad correspondientes a filitas homogéneas de carácter impermeable (resistividades $< 80 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$), sino más bien, a filitas alteradas o materiales aluvio-coluviales permeables (resistividades $> 100 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$).

El análisis conjunto muestra como entre los metros 250 y 300 del perfil, coinciden las anomalías indicadoras de fenómenos de filtración en una zona donde los carbonatos no parecen estar cubiertos por materiales impermeables, lo cual, ante escenarios de llenado, se posibilita la filtración del agua del pantano.

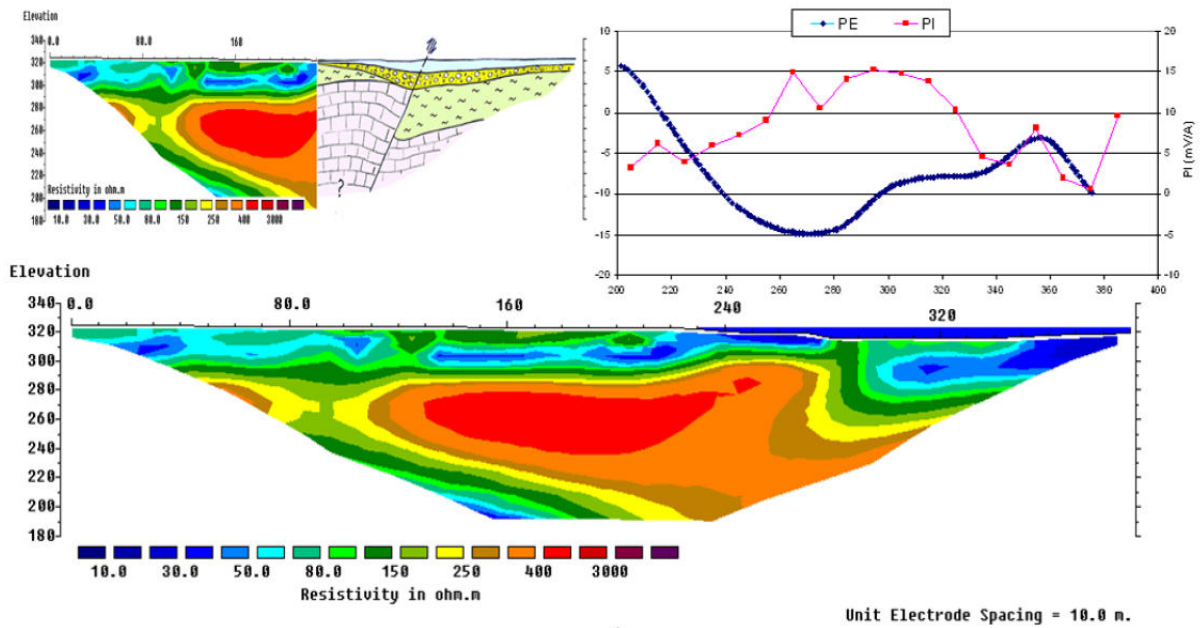


Figura 317. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-1. Interpretación geológica del tramo del perfil que discurre bajo la lámina de embalse (esquina superior derecha)

Perfil P-2

El análisis de los datos obtenidos por los sistemas de P.E., P.I. y T.E. no muestra unos resultados tan claros como en el caso del perfil anterior. El análisis individual de los resultados de cada una de las técnicas muestra que:

- Los valores de P.E. presentan una anomalía negativa entorno al metro 260 del perfil con un mínimo de -11 mV tras el cual, se produce un ascenso paulatino en los valores de potencial que en ningún caso, llegan a ser positivos en hasta el final del perfil.
- En el caso de la curva de variación del P.I., se observa un descenso importante en los valores del mismo a medida que el perfil penetra en la zona inundada, estabilizándose entorno a 5 mV/A a partir del metro 280 hasta el final del perfil.
- En el caso del corte geoelectrico, se aprecia, al igual que en el perfil anterior (Perfil P-1) la existencia de materiales carbonatados resistivos bajo una capa conductora que presumiblemente corresponde a las filitas. En la parte del perfil de investigación situado en la zona inundada vemos como la masa carbonatada tiende a aflorar entorno al metro 260.

También se observa una brusca interrupción de estos materiales apareciendo los carbonatos en esta parte del perfil a mayor profundidad. Esta interrupción corresponde a una importante zona de fractura en la que dada la amplitud de la misma y los valores de resistividad obtenidos los carbonatos deben estar fuertemente fracturados y/o alterados.

La presencia somera de estos carbonatos originó la construcción de un tapiz en el fondo del vaso, el cual, no se aprecia con claridad debido a la saturación del mismo, la cual tiende a disminuir notablemente las resistividades que presenta, así como por la escasa potencia del mismo respecto a la escala vertical del perfil

Vemos como entre los metros 250 y 280 del perfil, existe una anomalía de P.E. coincidente con la cercanía a la superficie de materiales carbonatados permeables mientras que en el caso del P.I. no se aprecian datos asignables a la presencia de fenómenos de filtración. La existencia de un tapiz protector debería impedir la filtración de agua del pantano hacia las calizas si bien, el P.E indica que existen en este sector.

Cabe destacar, derivado del análisis del mapa de P.E. de la zona inundada en este sector, que la anomalía de P.E. presenta una morfología muy peculiar coincidente con la posición de una alineación de sondeos de reconocimiento (Figura 318). Dichos sondeos se realizaron para investigar la presencia de calizas bajo los importantes depósitos aluviales del fondo del vaso y fueron abandonados sin cementarlos. Con todos estos condicionantes, anomalías de P.E., P.I. y sondeos penetrantes no cementados parece plausible la existencia de filtraciones través de estos sondeos.

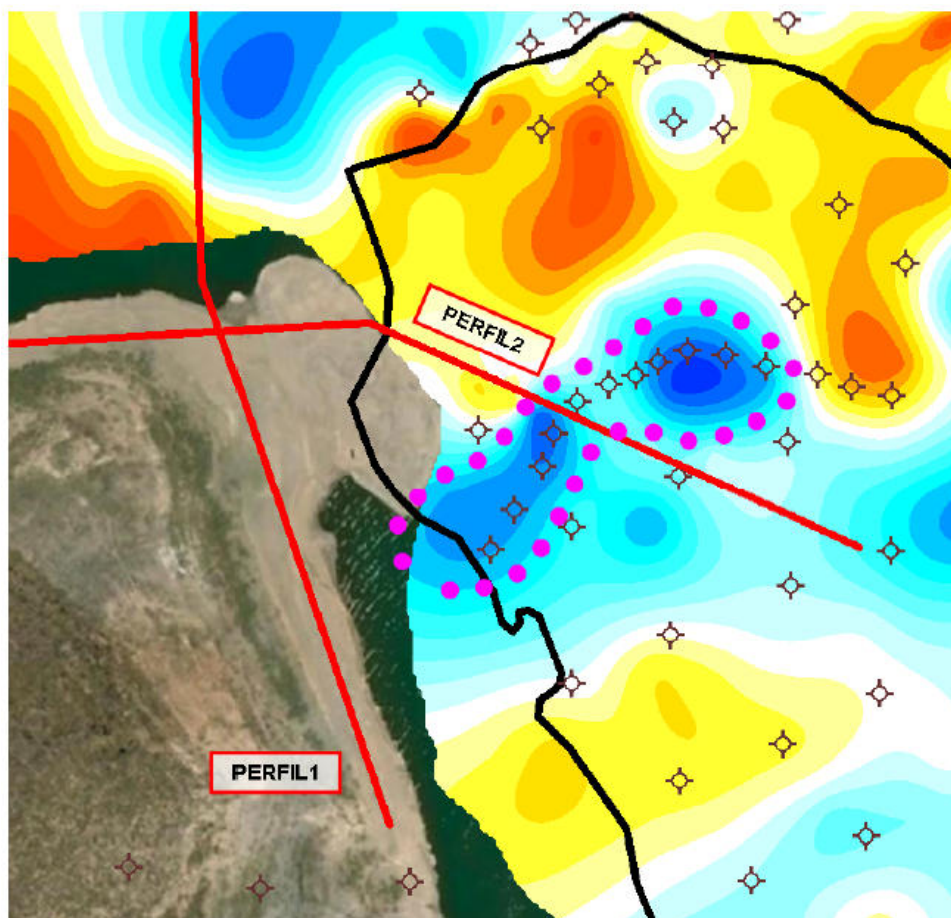


Figura 318. Anomalía de potencial espontáneo coincidente con la posición de una alineación de sondeos de reconocimiento del vaso del Embalse de Benínar (Software Surfer).

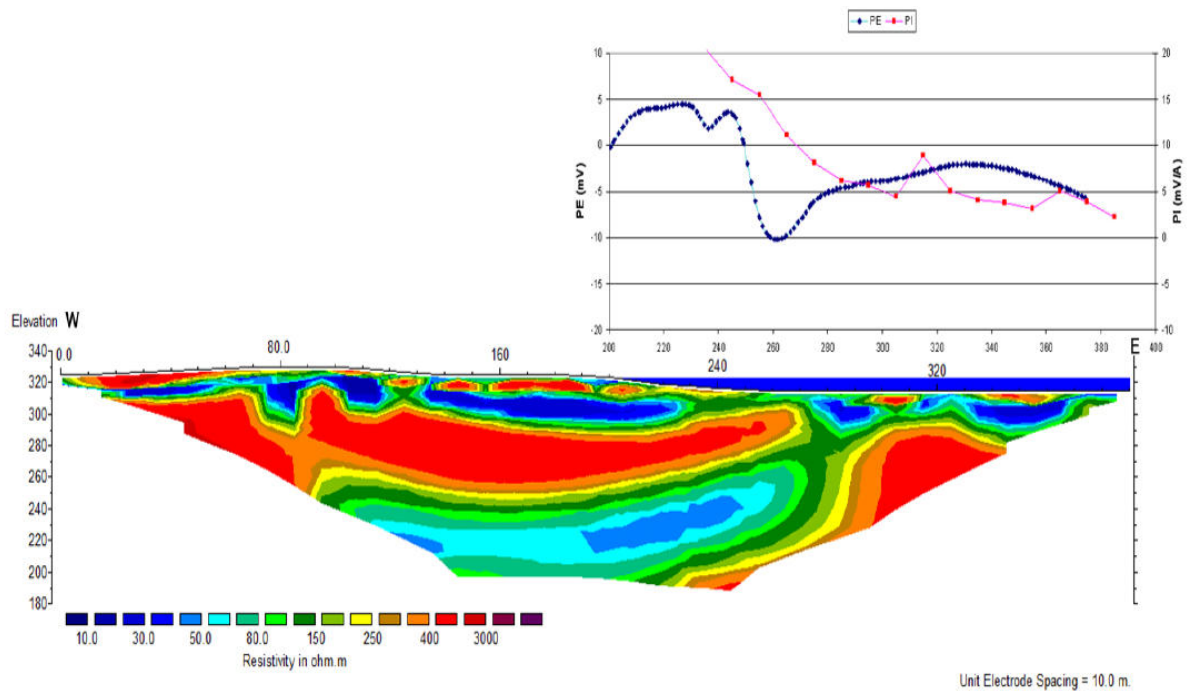


Figura 319. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-2

Perfil P-3

De forma individual, los resultados obtenidos por los sistemas de investigación muestran las siguientes características:

- El P.E. no presenta ninguna variación en sus valores si bien, estos siempre son negativos.
- EL P.I. muestra una tendencia en el descenso de sus valores conforme penetramos en la zona no inundada del embalse aunque presenta valores relativamente anómalos en un único punto (valor por debajo de los 10 mV/A).
- El análisis del corte geoelectrico muestra una potente capa de materiales conductores de naturaleza previsiblemente filítica inalterados y por tanto, impermeables a lo largo de toda la zona inundada.

En este caso vemos como aunque el P.E. en esta zona presenta valores negativos, estos no parecen estar relacionados con la existencia de fenómenos de filtración. El corte geoelectrico obtenido no identifica litologías permeables o zonas de fractura/alteración que constituyan vías de filtración por lo que se puede concluir que a lo largo de este perfil, no se están produciendo filtraciones.



Perfil P-4

El análisis visual de los datos muestra con claridad una concordancia total en los resultados de P.E., P.I. y T.E.. Si analizamos los resultados de forma individual vemos como:

- En el caso de los valores de P.E., se aprecia una clara anomalía asociada a posibles fenómenos de filtración en los metros 220 a 300, la cual presenta un fuerte gradiente de variación en los valores dando un mínimo de -15 mV.
- La gráfica correspondiente al P.I. se caracteriza por presentar un incremento en los valores de potencial a partir del metro 240 y manteniéndose de forma más o menos estable por encima de los 7 mV/A hasta el final del perfil. Cabe destacar la presencia de un máximo relativo en el metro 320 en el que el potencial alcanzan los 20 mV/A.
- El corte geoelectrico obtenido con la T.E. en la parte inundada del perfil muestra con claridad la presencia de una cobertera tabular conductora de naturaleza filítica en todo el sector, con una potencia media superior a los 15 metros bajo la que aparecen yesos y carbonatos²⁵. La capa filítica presenta un adelgazamiento entorno al metro 240 del perfil y en el 320, aparecen una interrupción en la continuidad de las filitas caracterizada por la elevación de los valores de resistividad obtenidos. Esta elevación puede tener múltiples interpretaciones como por ejemplo, la existencia de un bloque calcáreo de grandes dimensiones, presencia de yesos, zona donde las filitas están alteradas y/o mezcladas con derrubios, etc. si bien, lo importante en este sentido, es la existencia de una zona donde los niveles permeables inferiores (yesos y carbonatos) no están aisladas del embalse por las filitas.

Vemos como existen dos zonas de anomalía situadas entorno a los metros 240 y 310 del perfil. En el primer caso, existe una importante anomalía de P.E. pero no de P.I. mientras que la T.E. no muestra resultados concluyentes en cuanto a la presencia de litologías permeables, únicamente un adelgazamiento de la capa filítica impermeabilizante por lo que no se puede asegurar la existencia de fenómenos de filtración. En el segundo caso coinciden sin embargo, las anomalías indicadoras de fenómenos de filtración con la presencia de litologías permeables permitiendo la filtración del agua del pantano a través de las calizas y yesos inferiores.

Cabe destacar como en las inmediaciones del perfil de investigación ha sido objeto de la aparición de sumideros como ocurrió en Diciembre de 1982 (Imagen 47) cuya aparición estuvo relacionada previsiblemente con los niveles yesíferos existentes bajo las filitas. Toda la zona fue objeto de la ejecución de un tapiz impermeabilizante para evitar otros colapsos durante el servicio del embalse.

²⁵ Parece clara la existencia de yesos de forma continuada entre las filitas y los carbonatos. Esta presencia se pone de manifiesto en la cartografía estructural realizada en el presente estudio y en múltiples afloramientos en las inmediaciones del perfil (rambla de Irmes, Cortijo de Adoración). La diferenciación geoelectrica entre yesos y carbonatos es compleja al presentar valores de resistividad similares.



Imagen 47. Dolinas aparecidas en las inmediaciones del pueblo de Benínar en Diciembre de 1982 (Archivo fotográfico de la Presa de Benínar).

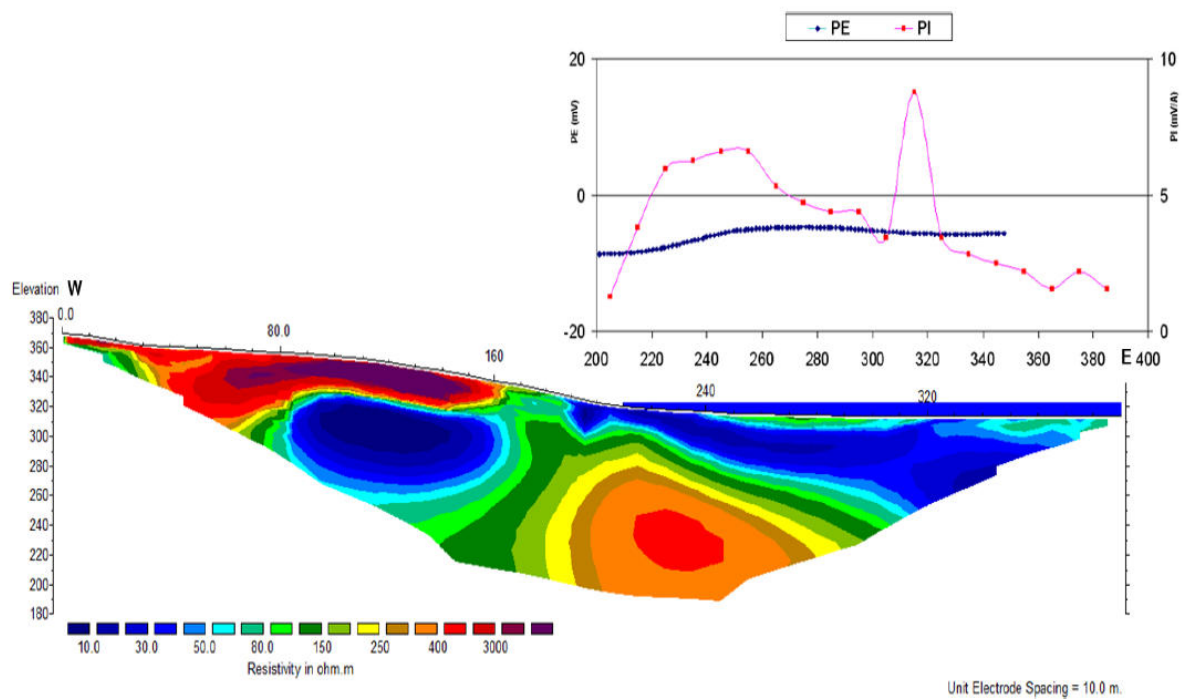


Figura 320. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-3

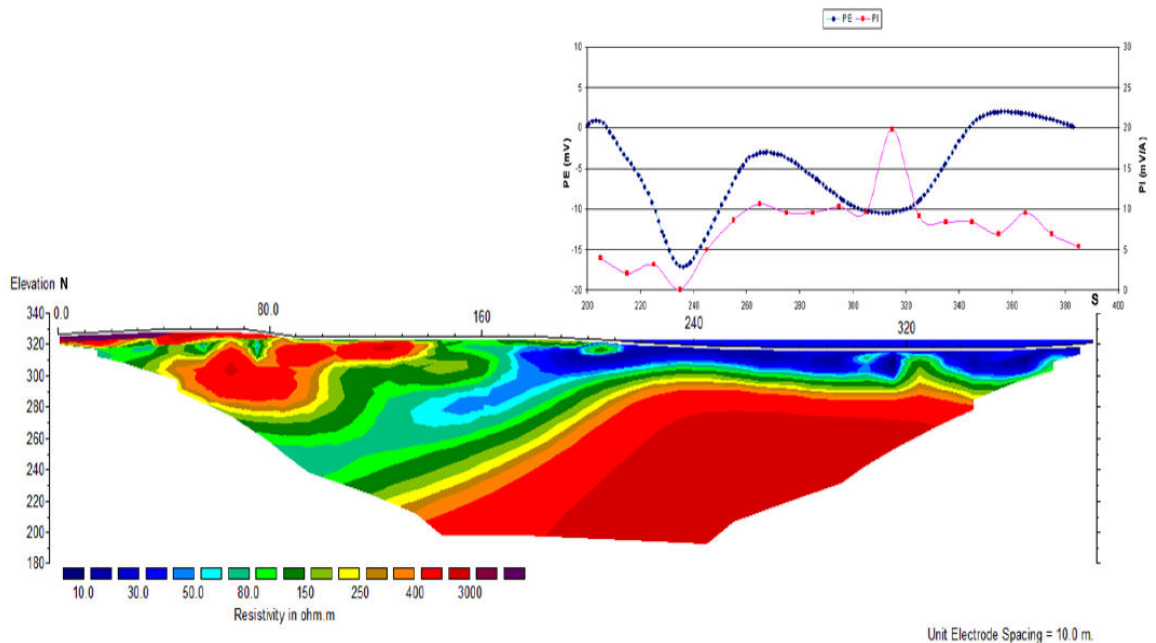


Figura 321. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-4

Perfil P-5

El análisis visual de los datos muestra concordancia en los resultados de P.E., P.I. y T.E.. De forma individual podemos ver como:

- El P.E., en la zona inundada del vaso (del metro 230 del perfil en adelante) se mantiene prácticamente estable entorno a un valor de 0 mV. Únicamente aparece una débil anomalía entorno al metro 280 en la que los valores de potencial descienden hasta los -5 mV.
- La gráfica correspondiente al P.I. presenta valores anómalos muy considerables, por encima de los 20 mV/A entre los metros 250 y 300. mV/A.
- El corte geoelectrico obtenido con la T.E. en la parte inundada del perfil muestra la presencia de materiales relativamente resistivos en contacto con la el agua del embalse. Parte de estos materiales deben corresponder a los depósitos de relleno del embalse así como a los elementos de escollera y filtros del tapiz existente en este sector del vaso. En contacto directo con estos materiales aparece una banda subhorizontal que, dados los valores de resistividad que presentan, parece corresponder a carbonatos fuertemente fracturados.

Vemos como entre los metros 250 y 300 del perfil, coinciden las anomalías de P.E. y P.I. con la existencia de materiales permeables bajo el tapiz. El carácter débil de la anomalía de P.E, unido a la presencia del tapiz impermeabilizante indica que la filtración puede deberse a un deterioro relativo de las filitas del tapiz.

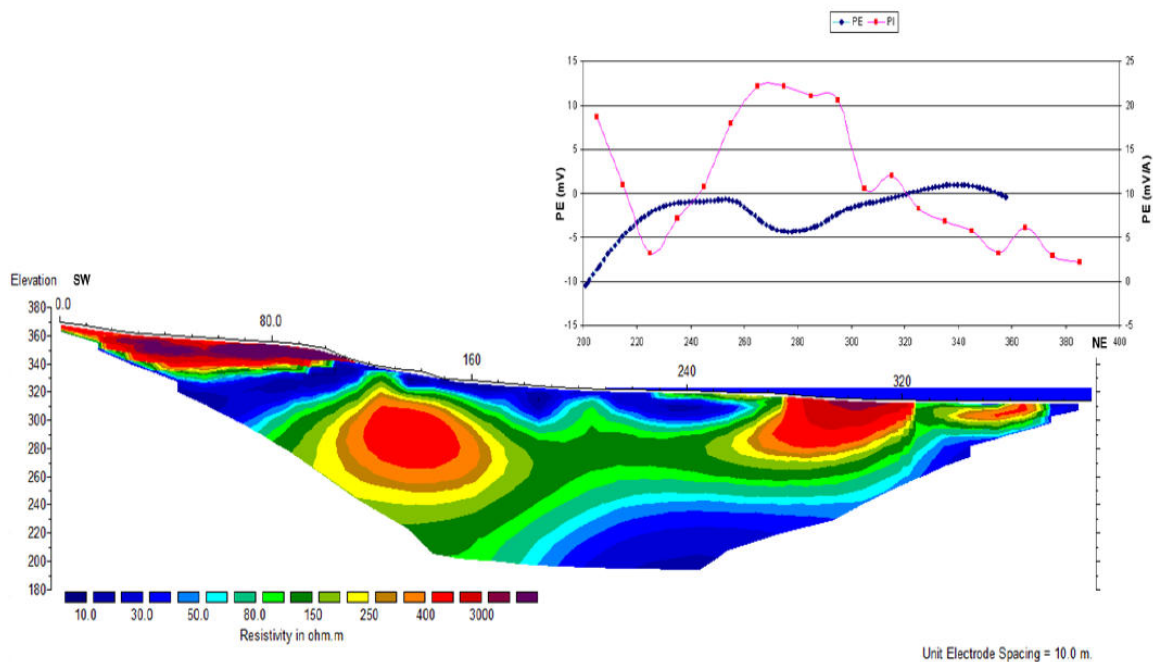


Figura 322. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-5

Perfil P-6

El análisis visual de los datos muestra, al igual que en algunos de los perfiles analizados con anterioridad, concordancia en los resultados de detección de fenómenos de filtración. El análisis individual de cada uno de los sistemas de investigación muestra que:

- El perfil de variación del P.E. a lo largo del perfil muestra dos anomalías entorno a los metros 235 y 310 siendo la primera de ellas, de mayor entidad al tener una morfología más acentuada (mayor gradiente de variación de los valores de potencial) y alcanzar un mínimo más acusado (17 mV).
- En el caso de los valores de P.I. obtenidos para el perfil, vemos como presenta valores elevados en general, diferenciando dos máximos relativos entorno a los metros 230 (16 mV/A) y 320 (10 mV/A).
- El corte geoelectrico obtenido con la T.E. muestra, para la zona inundada del perfil, valores de resistividad que en general superan los 100 ohm·m. Estos valores pueden corresponder a materiales aluvio-coluviales, filitas no homogéneas o la mezcla de ambos que en cualquier caso no garantizan la impermeabilidad de los mismos. La gran potencia que presentan estos materiales indica la probable presencia de niveles yesíferos, comunes en esta zona de la presa, los cuales se sitúan, al igual que en el caso del perfil N°4 a techo de los materiales carbonatados que aparecen en la zona más baja del perfil geoelectrico (resistividades > 500 Ohm·m). También se intuye una capa superficial conductora que gana en potencia a medida que nos alejamos de la orilla adentrándonos en el vaso del embalse que parece corresponderse con un nivel filático menos alterado y por tanto, mas impermeables.



Vemos como existen dos zonas de anomalía situadas entorno a los metros 230 y 320 del perfil. En ambos casos existe concordancia en las anomalías de P.E. y P.I. mientras que la T.E. no muestra resultados concluyentes en cuanto a la litología de los materiales en profundidad o su grado de permeabilidad. En cualquier caso, parece probable la presencia de filtraciones en ambos puntos.

Perfil P-7

El análisis individual de los resultados de P.E., P.I. y T.E. muestran las siguientes características:

- El P.E. muestra valores fuertemente negativos al inicio de la zona inundada, aumentando de forma considerable hasta volverse positivo a partir del metro 300 del perfil. Cabe destacar una inflexión en la curva que representa un mínimo relativo de -11 mV entorno al metro 245.
- La gráfica correspondiente al P.I. se caracteriza por iniciarse con valores nulos del mismo, incrementándose rápidamente hasta alcanzar valores medios más o menos constante de entre 5 – 10 mV/A. La gráfica muestra tres máximos relativos en los metros 250, 300, 320 y 370, siendo el más importante, el situado entorno al metro 320 del perfil, en el que el P.I. alcanza un máximo de 19 mV/A.
- El corte geoelectrico obtenido con la T.E. en la parte inundada del perfil muestra con claridad la presencia de una cobertera tabular conductora constituida, dados los valores de resistividad obtenidos, por materiales de relleno del embalse que en esta zona alcanzan una potencia superior a los 15 m. Por debajo se sitúa el tapiz impermeable o núcleo impermeable de la presa que no se distingue bien al estar fuertemente saturados. Los valores crecientes de resistividad y el cambio gradual de los mismos corresponden a los depósitos aluviales (acarrees) del río sobre los que se ejecutó la presa (figura 324). No se aprecian los carbonatos que se emplazan bajo los rellenos aluviales primitivos ya la profundidad a la que se emplazan supera la penetración del perfil de investigación.



Figura 323. Perfil de T.E. n°7 y planta de situación de sondeos con las cotas del techo de los materiales (principalmente carbonatos) situados bajo los rellenos aluviales situados bajo la presa.



Vemos como existen una coincidencia en las anomalías de P.E. y P.I entorno al metro 250 y 270 del perfil que podría indicar la existencia de filtraciones en este punto. No obstante, ha de tenerse en cuenta los valores de P.E. registrados en el entorno de la cerrada están afectados por la presencia de elementos metálicos y de cimentación de la presa en este sector por lo que no es posible asegurar la existencia de filtraciones.

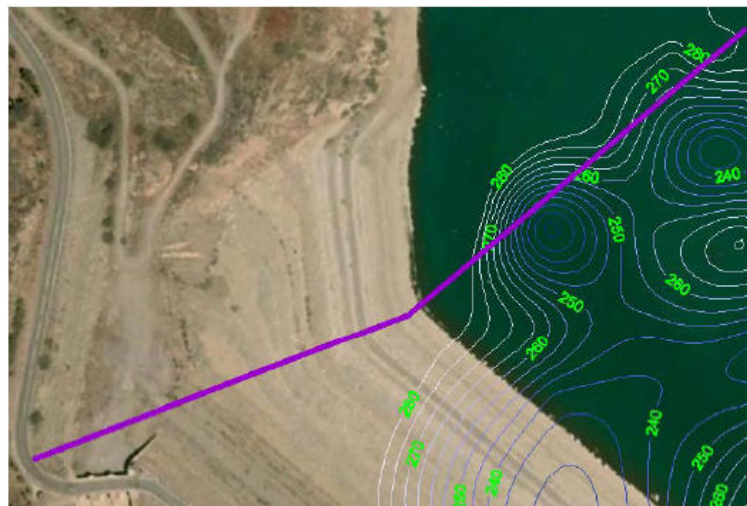


Figura 324. Perfil de T.E. N°7 y planta de las Isopacas de los rellenos aluviales existentes bajo la presa (por debajo de la cota 280 m.s.n.m.). Nótese la gran potencia de rellenos al final del perfil de investigación (más de 18 m de potencia).

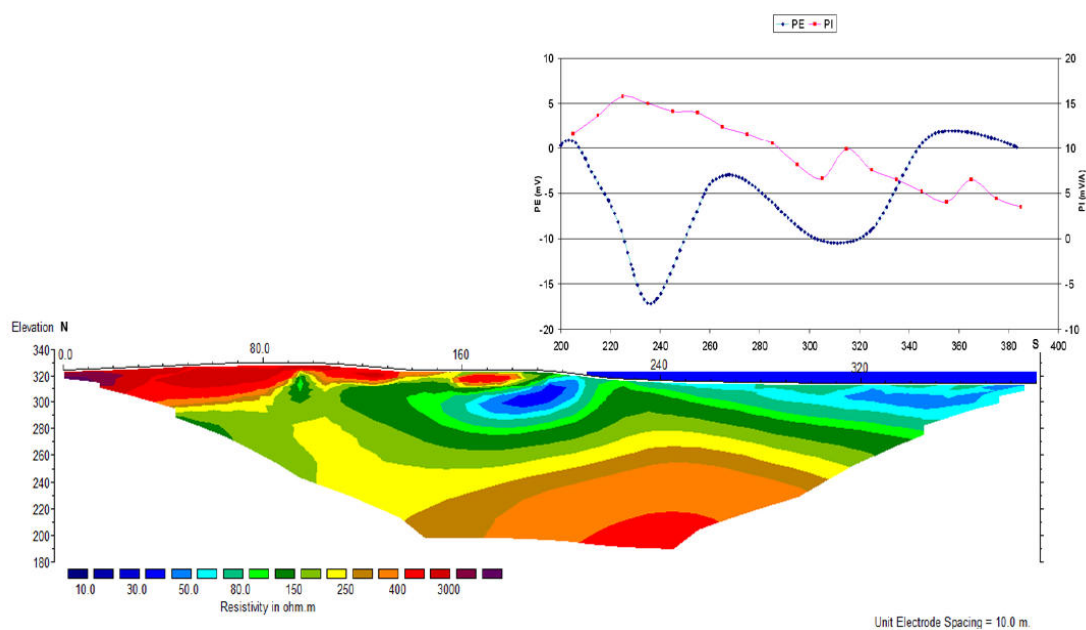


Figura 325. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-6

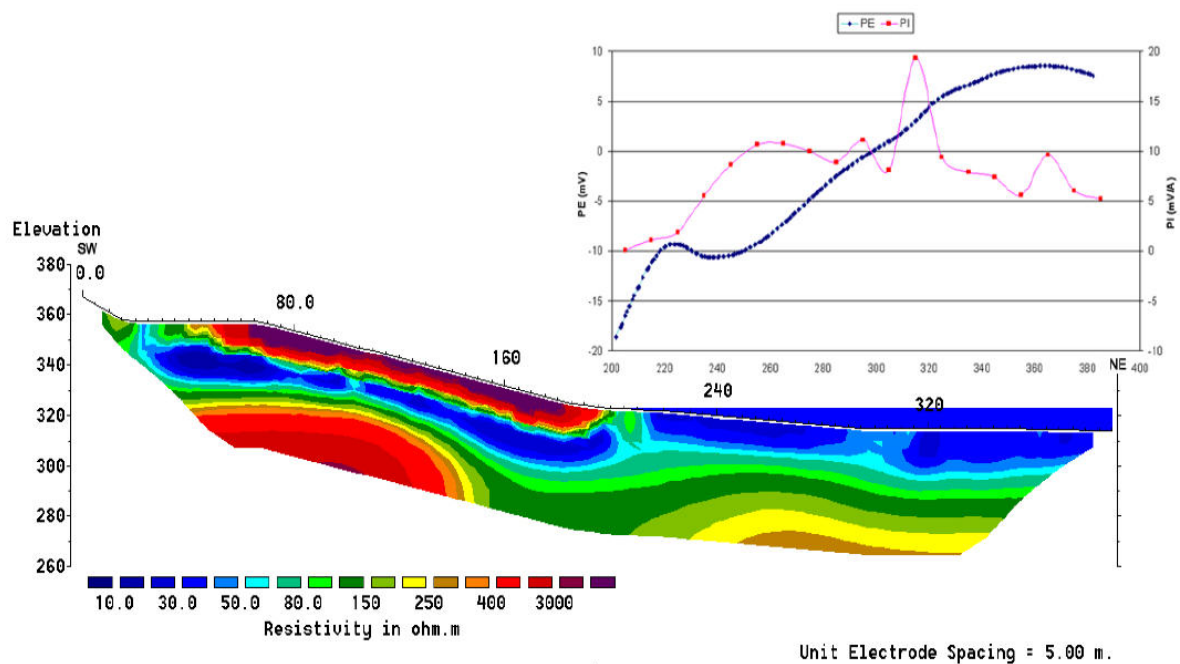


Figura 326. Comparación entre los datos obtenidos de Potencial Espontáneo, Potencial inducido y Tomografía Eléctrica del perfil P-7

8.5.- Análisis de la investigación

En el caso de la investigación de las posibles zonas de filtración, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Los datos de procesamiento del **Potencial Espontáneo** de la zona inundada y no inundada del embalse parecen indicar la existencia de varias zonas de filtración a través del fondo del embalse.
- La morfología no lineal de las anomalías y la no continuidad de las mismas tierra adentro indica que el flujo tiene que tener un carácter predominantemente vertical, el cual, es concordante con la presencia de un nivel freático regional muy deprimido respecto al fondo del vaso del pantano (nivel piezométrico general situado más de 100 m por debajo del fondo del vaso).
- El análisis detallado de las anomalías de Potencial Espontáneo se ha realizado mediante la ejecución de siete perfiles de investigación de **Tomografía Eléctrica** y **Potencial Inducido**, los cuales han permitido ratificar, en la mayoría de los casos, la existencia de fenómenos de filtración.
- Se definen con claridad, zonas de filtración en los perfiles 1, 2, 4, 5 y 6 mientras que en el resto, los resultados han de ser considerados como no concluyentes.



- Se han determinado las posibles causas genéticas de los fenómenos de filtración, las cuales parecen responder a las siguientes casuísticas:
 - Existencia de materiales carbonatados y yesíferos o zonas de fractura bajo materiales aluviales (acarreos) sin existencia de tapices protectores (Perfiles 1 y 4).
 - Fallos en el tapiz, probablemente generados por la degradación de los mismos (Perfiles 5, 6 y 7).
 - Filtraciones a través de sondeos de reconocimiento no cementados del vaso (Perfil 2).



9.-PROSPECCIÓN GEOFÍSICA PARA LA LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE YACIMIENTOS DE MAMÍFEROS MIOCENOS DEL CERRO DE LOS BATALLONES. T.M DE TORREJÓN DE VELASCO (MADRID).

9.1.- Introducción

El hallazgo de los yacimientos de vertebrados fósiles de Cerro de los Batallones es sin duda uno de los más espectaculares realizados a lo largo de la historia de la Paleontología española. De hecho, en ellos se reúnen numerosas singularidades: abundancia de restos fósiles, excelente conservación, piezas en conexión anatómica, presencia de todas las piezas esqueléticas de los individuos, incluyendo el cráneo, y abundancia de carnívoros (al menos en 2 de los 9 yacimientos). Ningún conjunto de yacimientos con vertebrados terciarios de España posee todas estas características, que a priori pueden atribuirse a la existencia de un sistema de hoyos, que actuaron como trampas naturales, en la que quedaban atrapados los numerosos vertebrados que habitaban la zona durante el Vallesiense superior.

El descubrimiento del primer yacimiento se produjo de forma casual durante Julio de 1991, como consecuencia de las prospecciones de sepiolita que la empresa TOLSA realizaba en el Cerro de los Batallones (término municipal de Torrejón de Velasco) y que pusieron en evidencia la existencia de una gran concentración de huesos fósiles asociados a sedimentos arcillosos de color verde. Ese mismo mes de Julio de 1991, un equipo de paleontólogos del Museo Nacional de Ciencias Naturales realizó una recogida de fósiles en los sedimentos extraídos por la maquinaria y procedió a localizar la capa fosilífera in situ, realizando una primera excavación paleontológica (Morales et al. 1992).

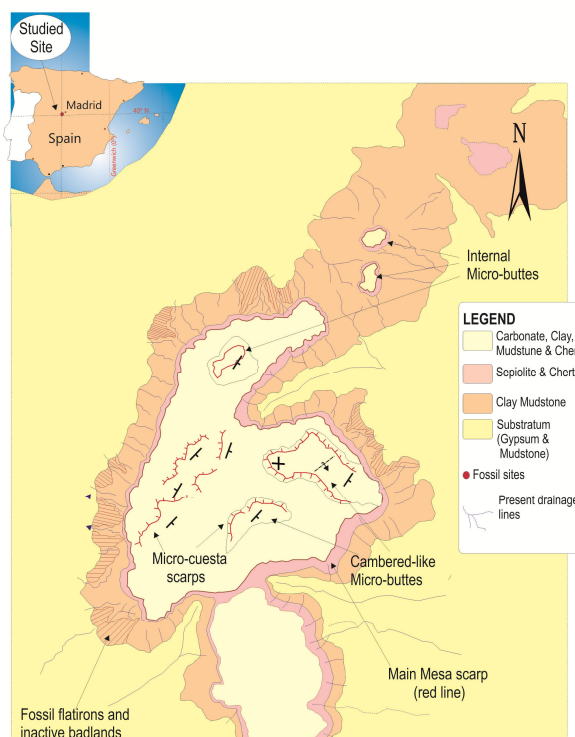


Figura 327. Situación geográfica y esquema geológico del Cerro de los Batallones Batallones (modificada de Silva et al., 2004).



Figura 328. Ortofoto del Cerro de los Batallones.

9.2.- Aspectos Geológicos del Cerro Batallones

El Cerro de los Batallones constituye uno de los cerros testigos, originados sobre carbonatos silicificados, a techo de la Unidad Intermedia del Mioceno en la Cuenca de Madrid. Se localiza en la zona de divisoria existente entre el Valle del Jarama y la Depresión Prados-Guatén, al Sur de la ciudad de Madrid.

Este cerro es conocido desde mediados de los años 1980 por los yacimientos de sepiolita allí existentes (Leguey et al. 1985), pero ha sido el descubrimiento de diferentes yacimientos de vertebrados vallesienses el que ha centrado su análisis científico desde comienzos de la década de los 90 (Morales et al. 1992, 2000, 2004). La presencia de estos yacimientos ha permitido replantearse la paleogeografía fini-neógena de este sector de la cuenca, aportando importante información sobre la geomorfología asociada a la instalación de los primeros sistemas fluviales en el interior de la cuenca (Alonso- Zarza et al. 2004). Así, recientes trabajos (Silva et al. 2004) han abordado el análisis geomorfológico del propio cerro. Al igual que el Cerro del Valle de las Cuevas (situado hacia el Sur), la superficie de Batallones se encuentra basculada hacia el SE, siguiendo la dirección y buzamiento de los estratos neógenos que lo condicionan (N20-30° E y buzamiento inferior a los 10-12° SE). El basculamiento de la serie neógena de Batallones hay que inscribirlo dentro de la deformación asociada al denominado “Sinclinal de Los Gózquez – Valle de Las Cuevas” (Vegas et al. 1975), en cuyo flanco occidental se sitúa. Por tanto, tal y como se observa, el origen del Cerro de los Batallones es posterior a la deformación asociada al mencionado sinclinal, ya que está labrado en una serie estratigráfica basculada. Su origen, como relieve estructural, es con seguridad posterior al depósito de la Ud. Intermedia Miocena en la que



se encuentra labrado y, probablemente correlativo al depósito de la Unidad Superior Miocena, o incluso posterior.

Por otra parte, su superficie presenta relieves internos de distinta amplitud y un claro origen estructural, heredado de anteriores fases geomorfológicas (relieves relictos). Además del Cerro Testigo interno en el que se ubica el Radar Meteorológico del INM, presenta dos microrelieves monoclinales en forma de meseta combada hacia el SE (muela invertida) que ocupa la parte más elevada del sector SE del cerro. Además, en las zonas no removilizadas se observan discretos relieves en cuesta que siguen las direcciones de estratificación anteriormente mencionadas (Silva et al. 2004).

Excepto el Cerro del Radar, los restantes microrelieves son actualmente inobservables, ya que en más del 90% la superficie actual del cerro ha sido removilizada y restaurada por los trabajos de explotación de sepiolita que aún siguen en curso (TOLSA). Estos trabajos también han afectado a sus vertientes, sobre las que actualmente se derraman numerosas escombreras de la explotación minera. Los análisis de la fotografía aérea del vuelo americano, permiten reconocer diferentes sistemas de paleocárcavas y “falsos flatirons” sensu Twidale (2002) a lo largo de su borde occidental, que nos indican que la extensión del Cerro no ha sido nunca mucho mayor de lo que se observa en la actualidad.

Desde el punto de vista geológico existen diferentes publicaciones que abarcan distintos aspectos sedimentológicos, mineralógicos y estratigráficos de la zona en que se enmarca el Cerro de los Batallones (Leguey et al. 1985; Pozo et al. 1985; Calvo et al. 1988; Bellanca et al. 1992; Calvo et al. 1995; Pozo y Casas 1999; Pozo y López 2004), aunque la sucesión litoestratigráfica detallada del techo de la Unidad Intermedia del Mioceno en el cerro no se ha abordado hasta hace relativamente poco tiempo (Pozo et al. 2003a, 2003b, 2004, 2005a, 2005b, 2006, 2007a, 2007b).

9.2.1.- Unidades Litoestratigráficas

La cartografía geológica y el análisis de facies de los materiales aflorantes y expuestos en las canteras del área del Cerro de los Batallones por el conjunto de autores mencionados anteriormente, han permitido diferenciar tres unidades: I) Lutitas magnésicas bentoníticas. II) Lutitas sepiolíticas y ópalos. III) Carbonatos, margas y sedimentos siliciclásticos. Estas unidades marcan el paso de un margen lacustre salino-alcalino a depósitos palustres edafizados y finalmente a sedimentos lacustrespalustres de agua dulce. Los depósitos que contienen los restos de vertebrados representarían una cuarta unidad estratigráfica caracterizada por la existencia de facies muy similares a las observadas en la unidad III pero cronológicamente posteriores a ésta.

9.2.1.1 - Unidad I. Facies bentonítica

Esta constituida por limos arcillosos y lutitas jabonosas verdes, frecuentes “slickensides” y nódulos de calcita. A techo pasa a lutitas marrón-rojizas masivas a laminadas (máximo 1,15 m), presentando niveles discontinuos de ópalo y nódulo de carbonato. La



asociación mineralógica de la arcilla esta constituida por esmectitas magnésicas e illita que pasan a techo a esmectitas magnésicas y sepiolita, mineral este último predominante a techo del tramo. Esta unidad se interpreta como depósitos de llanura lutítica (mud flat) relacionados con un lago salino-alkalino con aguas ricas en magnesio (Pozo et al. 2007b).

9.2.1.2 - Unidad II. Facies sepiolíticas

El tramo sepiolítico del Cerro de los Batallones (unidad II) muestra características composicionales (mineralogía y geoquímica) y texturales (microfacies) que lo distinguen de los tramos situados a base y techo del mismo. Es de destacar la existencia de diversas texturas con rasgos que permiten reconocer la existencia de procesos paleoedáficos, habiéndose diferenciado al menos tres episodios de desarrollo de paleosuelos (Pozo et al. 2007b).

Se interpreta la sepiolita como resultado de procesos de neoformación y transformación de sedimentos finos en un margen lacustre sometido a episodios periódicos de somerización y exposición subaérea. La sepiolita del Cerro de los Batallones ya había sido estudiada por Leguey et al. (1985) que establecieron tres ambientes genéticos: paleosuelos, removilización diagenética y precipitación lacustre. Comparativamente con otras sepiolitas de la cuenca de Madrid la sepiolita del Cerro de los Batallones presenta algunas peculiaridades. Por un lado la presencia de materia orgánica en sus niveles oscuros que alcanzan el 0,27% (Pozo et al. 2007b), por otra algunas características geoquímicas (F, Mg, REE) que las diferencian de las sepiolitas ligadas a facies distales aluviales (Vicálvaro) o asociadas a depósitos de llanura lutítica (Esquivias) (Pozo et al. 2005b). En relación con la sepiolita, material en el que se instalan principalmente los yacimientos, se ha comprobado que no solo presentan una diversidad textural notable, sino que también desde el punto de vista mineralógico, el grado de ordenamiento de las sepiolitas es variable. Este hecho es significativo porque el grado de ordenamiento influye en las propiedades físicoquímicas de los materiales arcillosos y en consecuencia en su comportamiento mecánico.

La presencia de palygorskita a techo de la unidad II indica otro cambio significativo en el ambiente sedimentario. Así, tras un prolongado periodo de exposición subaérea con el desarrollo de un potente paleosuelo de sepiolita, la presencia de palygorskita sería el resultado de la transformación de arcillas heredadas procedentes de la entrada de aguas superficiales y sedimentos detríticos.

Esto significaría que a techo de la unidad II diferenciada, existe un tránsito a la unidad III con características distintas al resto del tramo sepiolítico. Desde el punto de vista paleoambiental se infiere un cambio en el control de las reacciones mineralogenéticas donde el papel de la sílice, importante en la formación de la sepiolita y el ópalo, deja paso a la entrada de coloides aluminicos (aportes) y a la acción de las aguas bicarbonatadas cálcicas responsables de los depósitos carbonáticos que justifican el desarrollo de facies que progresivamente se hacen más palustres-lacustres. La existencia de una discontinuidad en este episodio de transición es importante ya que la existencia de rasgos vérticos y de morfologías gilgai asociados a los paleosuelos con palygorskita es evidencia de un comportamiento dinámico del terreno, posteriormente erosionado en parte por la entrada de aportes clásticos representados por la base de la unidad III (Pozo et al. 2007b).



9.2.1.3 - Unidad III. Facies detríticas y calcáreas

Los resultados mineralógicos obtenidos indican que en la unidad III predominan los carbonatos (calcita LMC) y los filosilicatos, con texturas similares a las observadas en el relleno de los yacimientos paleontológicos. Los análisis llevados a cabo por Pozo et al. (2007a; 2007b) indican que la mineralogía de la arcilla en las muestras de lutitas y margas de esta unidad presenta la siguiente asociación: Esmectita alumínica – illita \pm sepiolita \pm palygorskita \pm caolinita). Por el contrario los análisis realizados en los rellenos presentan diferentes asociaciones, así en los rellenos de facies clásticas finas la asociación es Sepiolita - esmectita \pm illita \pm palygorskita, mientras que en los de facies clásticas gruesas (Esmectita alumínica - illita \pm caolinita).

La asociación de carbonatos y facies siliciclásticas (unidad III) sugiere un ambiente lacustre-palustre donde el predominio del carbonato cálcico y la asociación fosilífera observada (ostrácodos, gasterópodos, carofitas y diatomeas) indicaría una hidroquímica con predominio de las aguas dulces. Los carbonatos con evidencias de bioturbación y otros rasgos edáficos indican depósitos que sufrieron emersión después de la sedimentación en un sistema lacustre donde se desarrollaron carbonatos palustres. Sin embargo, los carbonatos bioclásticos con ostrácodos, carofitas diatomeas y gasterópodos se consideran ligados a depósitos lacustres de agua dulce de mayor profundidad relativa (Pozo et al., 2007b). La similitud de características observada en los rellenos sedimentarios sugiere que las condiciones paleoambientales eran similares. La existencia en las facies siliciclásticas de los rellenos de contactos netos y de sedimentación gradada indica un depósito rápido en aguas someras.

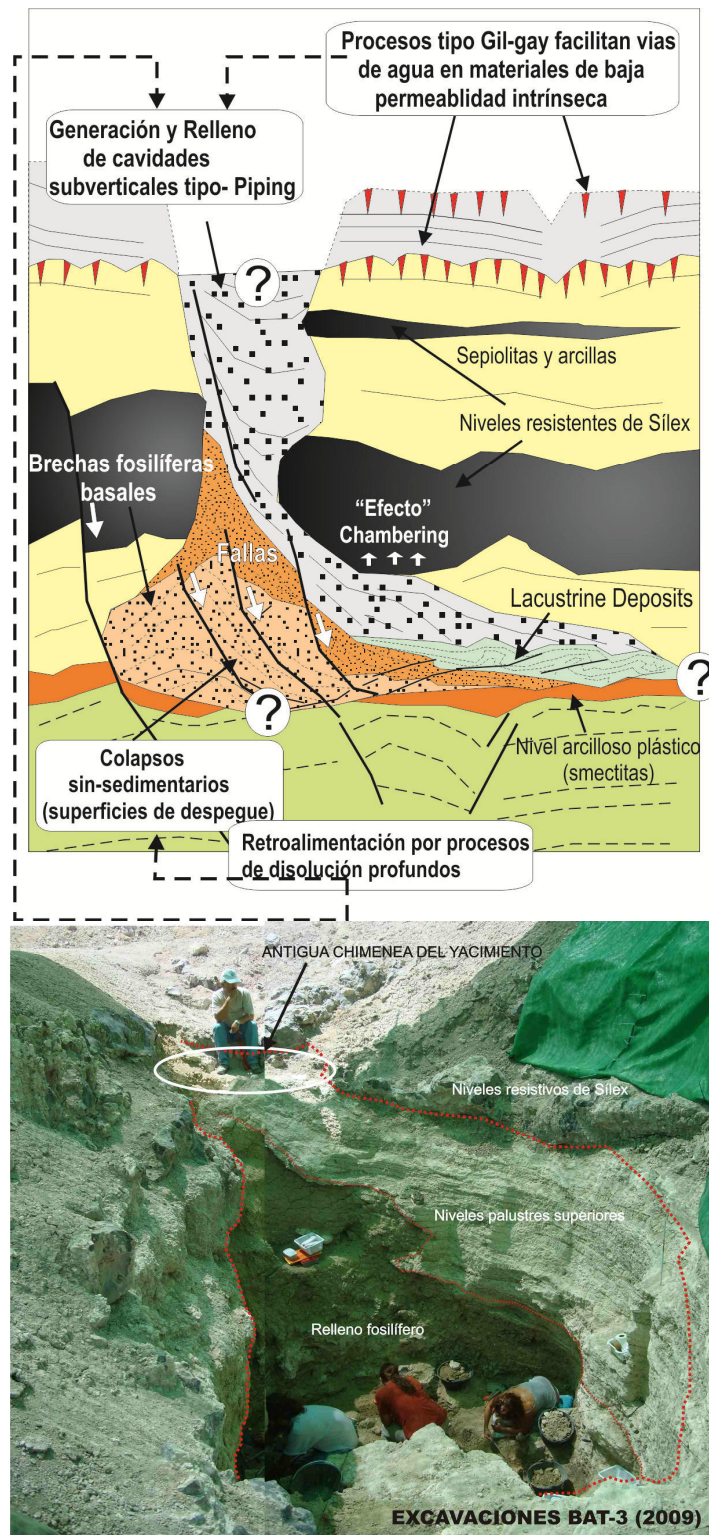


Figura 329. Corte Geológico del Cerro de los Batallones (Silva et al., 2004).

El tránsito entre las facies sepiolíticas de la unidad II y los depósitos de carbonatos de la unidad III se presenta en contacto erosivo. A techo de la unidad II aparece un episodio de aportes en el que se desarrollan calcretas y palygorskita, que a su vez, también en contacto erosivo, pasa



superiormente a depósitos clásticos donde son frecuentes los intraclastos, los minerales heredados y la carbonatación en diverso grado, para dar paso finalmente a las facies de carbonatos bioclásticos (Pozo et al. 2007b). Todo ello corrobora un cambio sustancial en las condiciones paleoambientales, de manera que en el control de las reacciones mineralogénicas, el papel de la sílice, importante en la formación de sepiolita y ópalo, deja paso a la acción de las aguas bicarbonatadas cálcicas que favorecen el desarrollo de paleosuelos calcáreos con palygorskita-sepiolita primero y la sedimentación de carbonatos palustres-lacustres después.

9.2.2.- Las trampas de vertebrados y sus rellenos

Todos los yacimientos del Cerro de los Batallones (abreviados como BAT de aquí en adelante) participan de las mismas características: acumulaciones paleontológicas excepcionales en rellenos discordantes con los sedimentos estratificados de la sucesión sedimentaria general del cerro (Figura 330). No obstante, desde un punto de vista paleontológico, existen diferencias significativas en su composición faunística, e indicios fundados de la existencia de diferentes niveles fósilíferos, que indicarían una historia compleja de los propios rellenos. Los rellenos han podido ser clasificados en dos tipologías (Morales et al. 2004; Pozo et al. 2004; Calvo et al. 2012; 2013):

1.- yacimientos profundos con morfología de copa invertida en los que existe una acumulación preferente de carnívoros (BAT-1 y BAT-6).

2.- yacimientos superficiales con morfología de copa sin invertir (forma de cuenco), en las que se generan ambientes de tipo palustre y lacustre siendo característico la aparición de fósiles pertenecientes a grandes herbívoros (BAT- 2, BAT-5 y BAT-10).

Otros yacimientos (BAT-3 y BAT-4) tienen geometrías más complicadas, en algunos casos asimilables a grandes grietas subverticales ligeramente ensanchadas en su parte inferior. Por último, en los yacimientos BAT-7 y BAT-9 identificados mediante prospección geofísica en los años 2003 y 2006 respectivamente se observa como los yacimientos superficiales (tipo 2) se conectan con una chimenea vertical que alcanzan más de ocho metros de profundidad. Los datos procedentes de las tomografías eléctricas realizadas indican que tales yacimientos superficiales se conectan con cavidades profundas donde podían existir yacimientos de tipo 1 tal y como se ilustra en la figura 330 (Pozo et al., 2004; Siilva et al., 2004; Calvo et al, 2012).

En la actualidad se han identificado en el Cerro de los Batallones 11 cavidades con rellenos de los que 9 se consideran como yacimientos paleontológicos. De éstos se han excavado o están en excavación BAT-1, 2, 3, 4, 5 y 10. El resto están convenientemente aislados y protegidos para su conservación. Por otra parte, es de destacar que las prospecciones paleontológicas en el entorno del Cerro de los Batallones, en la zona sur, ya dentro de la provincia de Toledo, han dado lugar al descubrimiento de cuatro nuevos yacimientos de vertebrados (Valdeinfierno, El Hornillo y Malcovadeso 1 y 2). En todos estos yacimientos la edad de las asociaciones de mamíferos (macro y micro) indica edades muy similares entre ellos, atribuibles al Vallesiense superior.

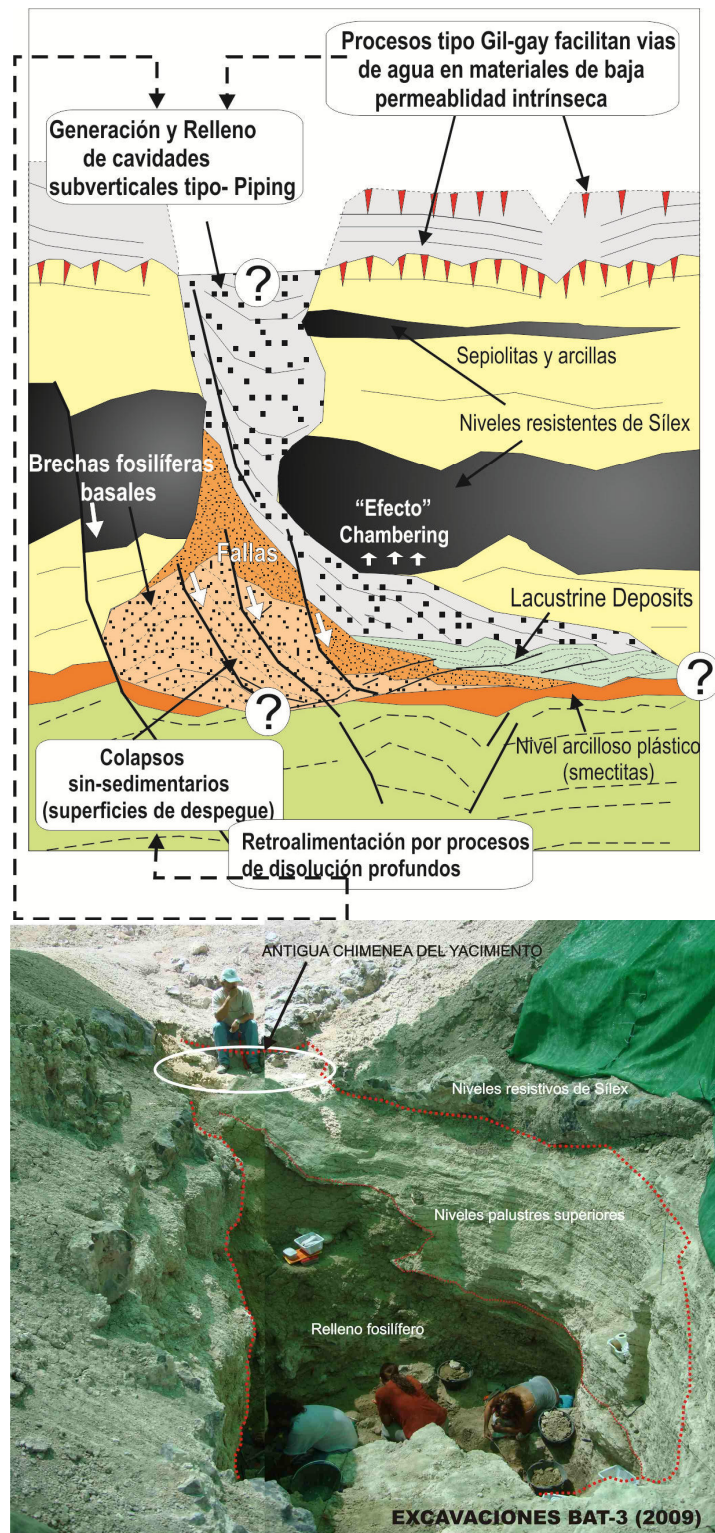


Figura 330. (arriba) Modelo interpretativo del relleno de Batallones- 1. En él se indican la influencia de los vertisuelos en la generación de las cavidades y el efecto de disolución en profundidad (Morales et al., 2008). (abajo) Fotografía mostrando el aspecto de la cavidad y relleno del yacimiento BAT-2, se observa el reborde del nivel de sílex resistente que delimitaba el techo de la cavidad antes de su relleno



En la identificación de los rellenos sedimentarios, asociados a los yacimientos, ha sido especialmente relevante el reconocimiento de estructuras de deformación similares en los yacimientos BAT-5, BAT-7, BAT-9 y BAT-10. Todos ellos tienen en común que se han detectado en su zona más próxima a la superficie, afectando a las facies detríticas y carbonáticas de la unidad III. La geometría de las capas deformadas presenta una estructura monoclinial de escala métrica dispuesta en direcciones perpendiculares entre sí lo que provoca morfologías deprimidas que actuarían como sumidero. En algunos casos asociados a estas flexuras se han reconocido fallas de pequeño salto que sugieren varios episodios de colapso a lo largo del tiempo de evolución de las cavidades.

Es necesario destacar que una de las principales dificultades en la identificación de las cavidades y sus rellenos radica en que con frecuencia sus colores se confunden con los de la sucesión sedimentaria general, siendo solo fácilmente reconocibles cuando son cortados bruscamente por otro material de distinto color, textura o compacidad. De aquí la importancia de los datos aportados por la prospección geofísica y la disponibilidad de palas excavadoras que facilitan enormemente la apertura de frentes en cualquier dirección.

Se han realizado propuestas tentativas sobre los mecanismos que han podido influir en la formación de las trampas. Sin dar por cerradas las hipótesis sobre los procesos que condujeron a la formación de los yacimientos, Pozo et al. (2004), Silva et al., (2004) y Calvo et al., (2012) proponen un modelo basado en la ocurrencia de fenómenos pseudokársticos de tipo “piping” como el principal factor, teniendo en cuenta que la geometría y morfología de los huecos son similares, en primera aproximación, a yacimientos de tipo trampa desarrollados en sistemas netamente kársticos (Simms 1994; Simon-Coinçon et al. 1997). Este proceso, también conocido como “karst en arcillas”, “subfusión” o “erosión en túnel”, se utiliza para la descripción de formas pseudokársticas, cuyas dimensiones pueden ser variables y que no están restringidas a un ámbito climático concreto, salvo la existencia de fuertes contrastes estacionales. El proceso de “piping”, posiblemente asociado también con procesos de “cambering” (Halliday 2004: sostenimiento de cavidades por la presencia de niveles resistentes) resulta, desde este punto de vista, adecuado para explicar la generación de las cavidades que condujeron al entrapamiento de vertebrados observado en los yacimientos del Cerro de los Batallones.

De forma general, se ha considerado que la iniciación y desarrollo del “piping” resulta de una compleja combinación de diferentes factores, litológicos, mineralógicos, edáficos e hidrogeológicos favorables (Bryan y Yair 1982): a) presencia de discontinuidades verticales; b) suelos o arcillas expansivas; c) gradiente topográfico suficiente; d) alternancia de materiales permeables e impermeables; y e) presencia de niveles muy resistentes a la erosión. Aunque todos estos factores favorecen el desarrollo de “piping” los dos indispensables parecen ser: la existencia de un gradiente hidráulico suficiente y la presencia de una alta capacidad de infiltración en materiales de baja permeabilidad intrínseca (Gutiérrez Elorza 2001). Este último requisito permite que se produzca una inusual concentración de la infiltración, hecho que no se da en materiales más permeables (Bryan y Jones 1997) lo que implica la existencia de materiales intensamente agrietados o fisurados.



El modelo propuesto se desarrolló en un contexto ciertamente particular dentro de la evolución geológica de la Cuenca de Madrid: el cambio paleogeográfico acaecido durante el Mioceno superior (episodio de karstificación intra-Vallesiense; Calvo et al. 1988, Cañaveras et al. 1996). El nuevo marco geomorfológico generado durante el Vallesiense podría explicar de una forma consistente los requisitos de gradiente topográfico e hidráulico necesarios para la generación de los procesos de “piping” apuntados.

Estos serían el descenso del nivel de base relacionado con el mencionado episodio de karstificación generalizado, y el desarrollo de un valle sinclinal dentro del cual Batallones ocuparía uno de sus flancos (Silva et al., 2004). En este sentido es necesario apuntar que al menos existen dos casos citados en la literatura geológica similares al aquí expuesto. Son casos que tratan sobre la formación de cavidades, en relación con episodios generalizados de paleoalteración de cuencas sedimentarias afectadas a su vez por importantes procesos de silicificación. El más similar es el relacionado con el Paleokarst de Querçy desarrollado durante el Eoceno y Mioceno inferior en la Cuenca de Aquitania que también funcionó como trampa de vertebrados (Simon-Coinçon et al. 1997). El segundo, relacionado con la generación de cavidades en perfiles de alteración de lateritas y silcretas en materiales Cretácicos y Eocenos en la parte Septentrional del Continente Australiano (Twidale 1987).

9.3.- Prospección Geofísica en el cerro Batallones

Nueve yacimientos diferentes de vertebrados se han identificado en el Cerro de Los Batallones. Todos ellos han sido excavados o están en proceso de excavación.

Los yacimientos aparecen en los diferentes niveles estratigráficos (unidades I, II, III) descritas anteriormente, ya que en realidad son discordantes y generalmente responden a cavidades desarrolladas en los materiales carbonatados y siliciclásticos del techo de la Unidad Intermedia Miocena (Vallesiense). Las mencionadas cavidades poseen diferente geometría y contenido fósil en función de su profundidad. Los yacimientos a mayor profundidad aparecen a unos 6-7 metros por debajo de la superficie actual del cerro, presentando una anómala y rica concentración de carnívoros excelentemente conservada. Su geometría parece aproximarse a cavidades campaniformes en sección vertical de diámetro decamétrico. Por el contrario, los yacimientos superficiales poseen geometrías en forma de copa, de diámetro superior a los profundos pero que se va reduciendo en profundidad, y su contenido fósil está caracterizado por la presencia de herbívoros de gran tamaño (mastodontes, jirafas, rinocerontes, entre otros). Los datos procedentes de las tomografías eléctricas permiten inferir que ambos tipos de yacimientos se encuentran interconectados por chimeneas verticales adoptando un dispositivo de tipo “reloj de arena”, aunque todavía no se ha podido constatar en ninguno de los yacimientos. En particular las tomografías eléctricas realizadas en los yacimientos, BAT-7, BAT-9, BAT-5 y BAT- 10, los dos últimos en proceso de excavación de su zona superior, permiten delinear la existencia de geometrías “reloj de arena” (figura 336). También, los datos procedentes del comienzo de la excavación del yacimiento BAT-1 (el único de los profundos que se ha excavado al completo) sugieren la existencia de una chimenea vertical (figura 330), aunque en este caso el posible yacimiento superficial fuera removido por los trabajos de la mina, o no existiera.

Hasta la fecha se han realizado 38 perfiles de Tomografía Eléctrica de Resistividades (perfiles ERT) utilizando diferentes tipos de dispositivos Schlumberguer, Polo-Dipolo, Polo-Polo



y Dipolo- Dipolo. La mayor parte de los perfiles realizados están compuestos por un sistema multicanal de 32 a 24 electrodos de espaciados variables de 1, 2 y 3 metros, completándose longitudes de investigación de 24, 48 y 96 metros respectivamente para cada tipo de espaciado.

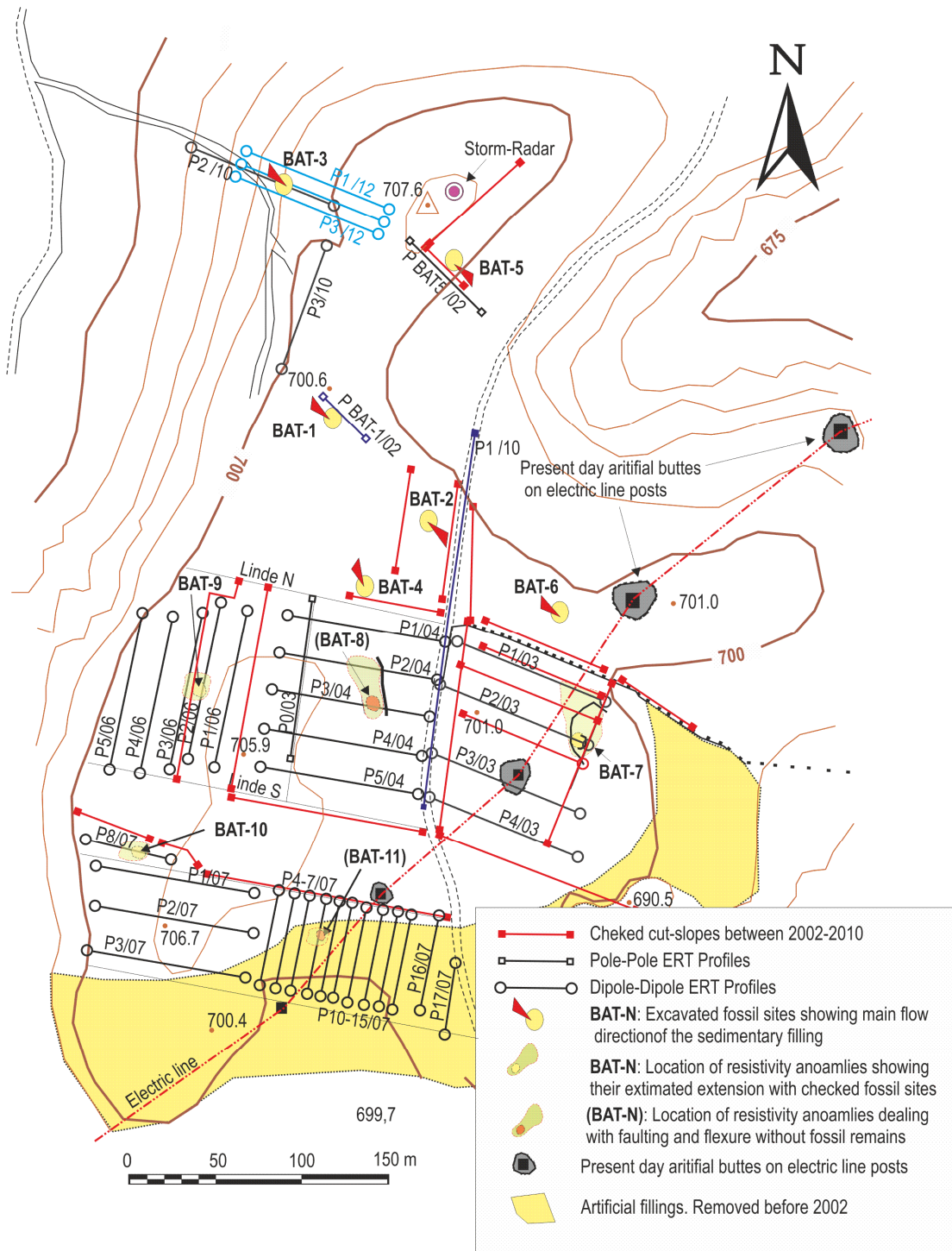


Figura 331. Esquema topográfico del Cerro de los Batallones mostrando los perfiles realizados por tomografía eléctrica de resistividades (ERT) durante las campañas de campo desde el 2002 al 2013.

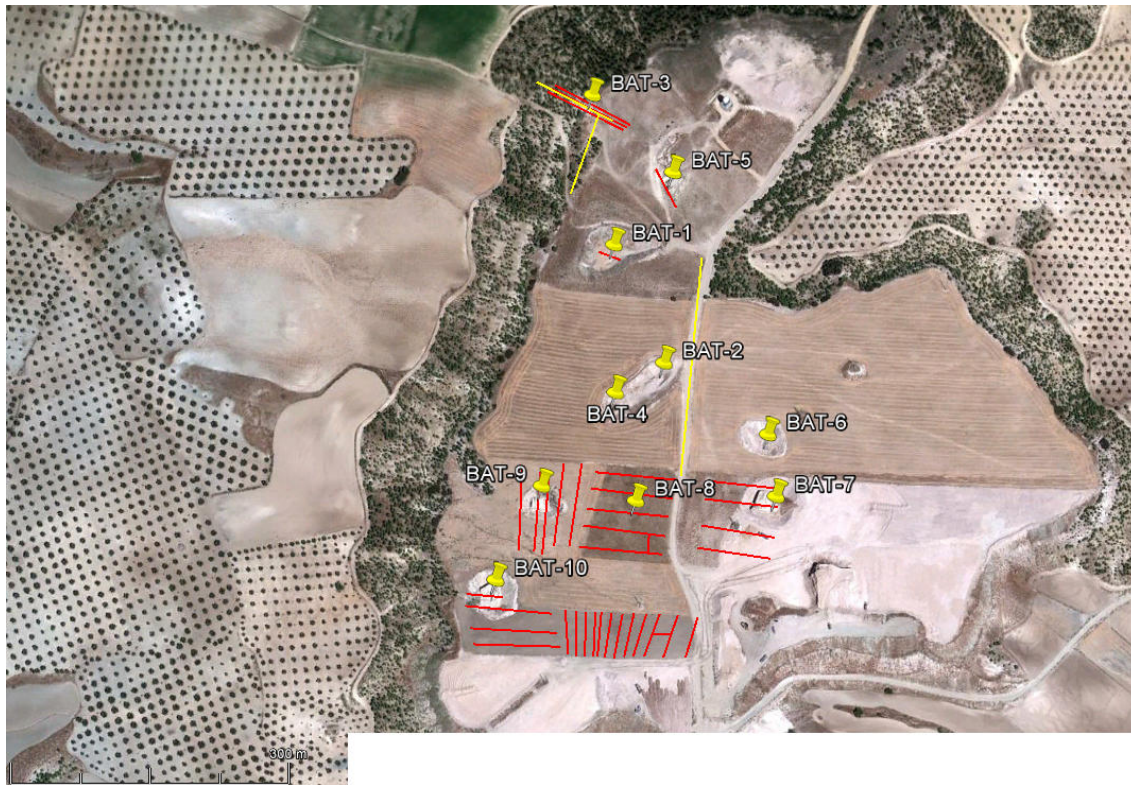


Figura 332. Ortofoto del Cerro de los Batallones mostrando los yacimientos y perfiles realizados de Tomografía Eléctrica.

El dispositivo de investigación utilizado en cada caso permite una penetración en el subsuelo de mayor o menor profundidad inversamente relacionada con la resolución de la información del subsuelo que se obtiene. Así se puede decir que a menor espaciado, mayor resolución de la información, pero menor profundidad de investigación. Espaciados de 1 metro permiten penetrar hasta unos 4 metros máximo. Los espaciados de 2 metros lo hacen hasta 8 metros, y los de 3 metros alcanzan profundidades de hasta 16 metros pero con muy poca resolución en la información obtenida a esa profundidad. De la misma forma el sistema polo-polo posee mejor resolución en la información bajo la vertical del perfil ERT realizado, mientras que el dipolo-dipolo recoge también información del entorno adyacente a la vertical del perfil mostrando la existencia de cambios laterales en las resistividades.

De esta forma cuando se han investigado yacimientos previamente descubiertos se han utilizado preferentemente espaciados pequeños (1 y 2 metros) con dispositivos polo-polo y dipolo-dipolo conjuntamente con el fin de obtener una mayor resolución de la información.

Cuando, por el contrario los perfiles ERT estaban destinados a prospectar una parcela previa a su excavación por las máquinas se han utilizado dispositivos dipolo-dipolo de mayor espaciado (2 y 3 metros) con el fin de recolectar la mayor información posible del subsuelo, aún a costa de la pérdida de resolución que ello lleva implicado. En algunos casos se realizaron los mismos perfiles con ambos dispositivos dipolo-dipolo y polo-polo con el fin de comparar los resultados y la resolución.



La utilidad de la tomografía eléctrica de resistividades en la prospección de los yacimientos de vertebrados del Cerro de Los Batallones radica en el hecho de la existencia de niveles de sílex (muy resistivos) y materiales siliciclásticos finos y rellenos fosilíferos de menor resistividad.

El hecho que la mayoría de los yacimientos se encuentren aparentemente perforando los niveles de sílex de las unidades estratigráficas I y II, la prospección geoelectrica busca la existencia de rupturas, flexuras y curvaturas de dichos niveles resistivos. La información mostrada por espaciados de hasta 2 metros (resolución de objetos 2x2 m: 4 m²) ha resultado bastante fiable, mientras que las de 3 metros (resolución de objetos de 3x3 m: 9m²) identifica estructuras de deformación de gran radio y muy laxas, pero que no tienen por que tener un yacimiento asociado (como es el caso de BAT-8). Por los datos que se tienen hasta la actualidad se observa que las zonas de chimenea, al menos en su parte superior (BAT-5, BAT-7, y BAT-9), poseen diámetros que apenas sobrepasan los 4 metros en el mejor de los casos. Este dato permite asegurar que los perfiles ERT con espaciado de 2 m están en el límite de detección de los yacimientos y los de 3 m quedan fuera de él. Espaciados de 2 m han sido capaces de reconocer discontinuidades incluso por debajo de capas de escombros más o menos potentes (3-4 m) procedentes de excavaciones y rellenos previos de la zona de minas, aunque estas finalmente no resultaran contener un yacimiento (BAT-11, 2007).

BAT-1 se seleccionó para la prospección como ejemplo de yacimiento en profundidad. Dadas las dimensiones de la zona de excavación y las limitaciones topográficas del yacimiento (actualmente preservado en un agujero casi circular de 8 metros de profundidad y 35 metros de diámetro), se seleccionó un sistema de electrodos de 24 metros de longitud, con espaciado de un metro, y dispositivo dipolo-dipolo. El perfil geoelectrico (tomografía de resistividad eléctrica, ERT) se realizó según la dirección N140° E paralelo a la pared Norte de la excavación (a 2 metros de distancia). La profundidad de la excavación durante el año de la prospección (2002) se encontraba entre 1,5 (WNW) y 1,40 m (ESE). El perfil ERT cubrió toda la zona excavada (electrodos 4 al 12) incluyendo una antigua trinchera de prospección realizada en los años 90, posteriormente rellena con estériles (electrodos 9 al 12). Los electrodos 1 al 4 se situaron en el borde de la pared. Este del relleno fósil, antiguamente una pared de unos 6 metros de altura excavada sobre un nivel de sílex del mismo espesor. Por otro lado, los electrodos 13 al 24 cubrían la zona oeste (no excavada) del yacimiento, previsiblemente formada en su mayoría por niveles de sepiolita correspondientes a la pared Oeste del relleno fósil. El perfil ERT alcanzó una profundidad de investigación de 2,7 metros.

En la actualidad la profundidad de excavación en BAT-1 alcanza más de los 2,5 metros dando con el sustrato arcilloso del yacimiento. Los datos procedentes de la tomografía eléctrica en 2002 encajan con las dimensiones, distribución de facies y fósiles que han resultado de la excavación total del yacimiento (Domingo et al., 2013), y por tanto muestran que la prospección geofísica a esa resolución (espaciado de 1m) ofrece datos fidedignos sobre la distribución de los materiales en el interior de las cavidades (Calvo et al., 2012, Domingo et al., 2013).

El modelo inverso de resistividades resultante (Figura 333) muestra tres sectores bien diferenciados, además de un nivel superficial pseudohorizontal muy resistivo (0,4 a 0,9 m de potencia) resultante de la compactación del terreno por el paso de maquinaria pesada y personas.

En el borde Este una unidad resistiva (Max. 150 Ω .m) testifica la prolongación de la pared de sílex mencionada anteriormente, pero esta desaparece a los 0,6-0,9 metros de profundidad entre los electrodos 1 y 4. Adyacente y por debajo de esta unidad resistiva aparece una de mucha menor resistividad, con geometría campaniforme, y cuya densidad descende desde su centro (55 Ω .m) hasta los bordes (35 Ω .m) generando un patrón triangular radial en las resistividades. Una tercera unidad, buzando hacia el Oeste, muestra todavía menor resistividad (10-15 Ω .m) coincidiendo con las brechas que contienen los fósiles entre los electrodos 4 y 9. Por último, hacia el Oeste entre los electrodos 11 y 24 aparece una unidad conductiva (similar a la anterior) muy homogénea (<12 Ω .m) que responde al sustrato arcilloso sepiolítico en el que se excavó la cavidad.

PERFIL BAT1-1

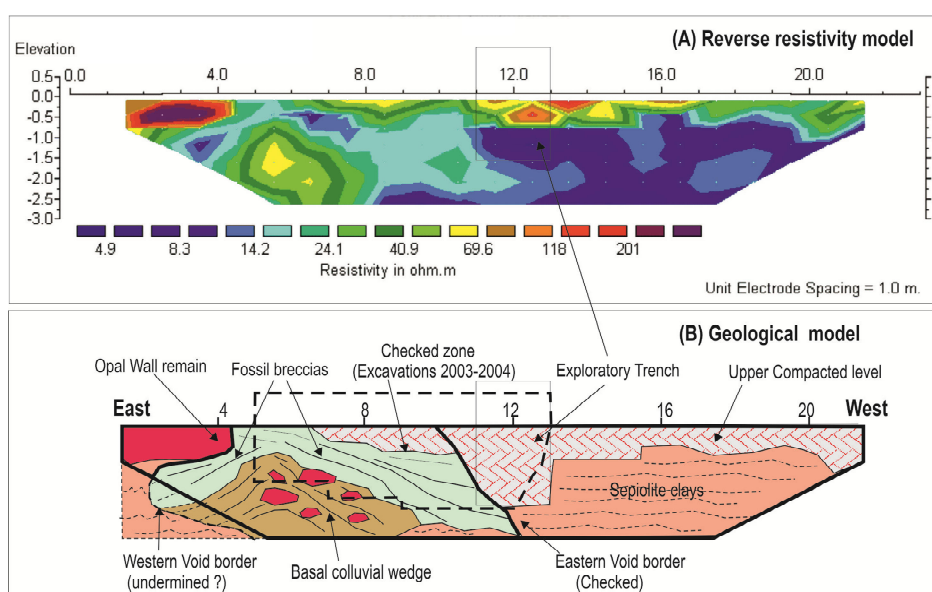


Figura 333. A) Modelo inverso 2D del perfil eléctrico (ERT) realizado en la pared norte del yacimiento de Batallones-1. B) Interpretación geológica de la muralla norte del yacimiento de Batallones-1.

El progreso de las excavaciones en BAT-1, cuya excavación finalizó en el año 2011, ha expuesto en su totalidad la pared investigada en 2002 entre los electrodos 4 y 11. Esto ha permitido comprobar que la unidad con geometría de campana corresponde a una brecha basal de origen gravitatorio que contiene grandes bloques (0.5 –0.7 m de diámetro) de sepiolita, sílex, carbonatos empastados por una fina matriz limo-margosa con un contenido variable de intraclastos y una gran variedad de restos fósiles de carnívoros. Es importante hacer notar que los bloques de carbonatos procederían de la parte superior de la cavidad (Unidad I). El patrón 2D casi triangular se puede interpretar como el relleno gravitatorio basal de la cavidad fósil (cuña coluvial). Su prolongación bajo la pared labrada en sílex, de la zona Este del yacimiento, indica la existencia de un proceso de socavación basal por debajo del potente paquete de sílex donde se acuñó el relleno gravitatorio. Los procesos de socavación son frecuentes en cuevas y cavidades desarrolladas por debajo de capas resistentes a la erosión (calcretas, silcretas, etc...) por diferentes procesos de erosión diferencial subsuperficial (i.e. piping: Twidale 2002; Klimchouk



y Andrejchuk 2003). En cualquier caso, el espectro litológico de los bloques incluidos en esta brecha basal representa la secuencia estratigráfica situada por encima del yacimiento, testificando la antigua extensión hacia la superficie de la cavidad fósil. Por otro lado el relleno de la brecha fosilífera que cubre a la brecha basal muestra la existencia de buzamientos entre 16 y 27° hacia el Oeste tal y como sugería el modelo inverso de resistividades que además van acompañadas por superficies de compactación y deslizamiento (tipo slicken-side) que atraviesan la brecha fosilífera y la basal con mayor ángulo y geometría complejas. En la actualidad se puede observar la parte inferior de la pared Oeste de la cavidad fósil realizada por una superficie de carbonatación sobre las arcillas sepiolíticas.

Los yacimientos BAT-5 (Figura 334), BAT-7 (Figura 335), BAT-9 y BAT-10 (Figura 336), son claros ejemplos de los yacimientos superficiales con desarrollo basal de chimeneas rellenas por una brecha detrítica. Los yacimientos BAT-5 y BAT-10, con yacimiento superficial en proceso de excavación, muestran claros indicios de la existencia de una chimenea vertical asociada a un relleno inferior, como muestran los perfiles ERT realizados sobre ellos (ambos con un espaciado de 2m y profundidad de investigación máxima de 8 metros). Por otro lado los yacimientos BAT-7 y BAT-9 sólo han librado fósiles dispersos y fragmentarios en las brechas del comienzo de las chimeneas, pero ambos han sido objeto de trincheras de prospección que revelan la geometría 3D subcircular en forma de copa de los yacimientos superficiales. Estos dos yacimientos son los que han salido a la luz previa su identificación por prospección geoelectrica. Ambos se investigaron mediante dispositivos dipolo-dipolo con 2m de espaciado y los perfiles ERT correspondientes muestran la existencia de las chimeneas verticales asociadas a rellenos de mayor diámetro en profundidad. En ambos casos, pero también en BAT-5 y BAT-10, se ha constatado la existencia de fallas de geometría curva (incluso circulares) que encierran y afectan a la parte perimetral de los yacimientos superficiales y que en profundidad limitan las chimeneas (caso claro en BAT-7 y BAT-9). Las fallas muestran característicamente una tipología inversa hacia las partes centrales de los yacimientos, y normal hacia su zona perimetral exterior. En todos los casos los datos de los perfiles ERT han podido contrastarse con los cortes, bien de las canteras, o bien de prospección, practicados en ellos, para sus zonas más superficiales 2-4 metros, pero todavía no se ha podido acceder a las zonas de mayor profundidad.

PERFIL BAT5-1

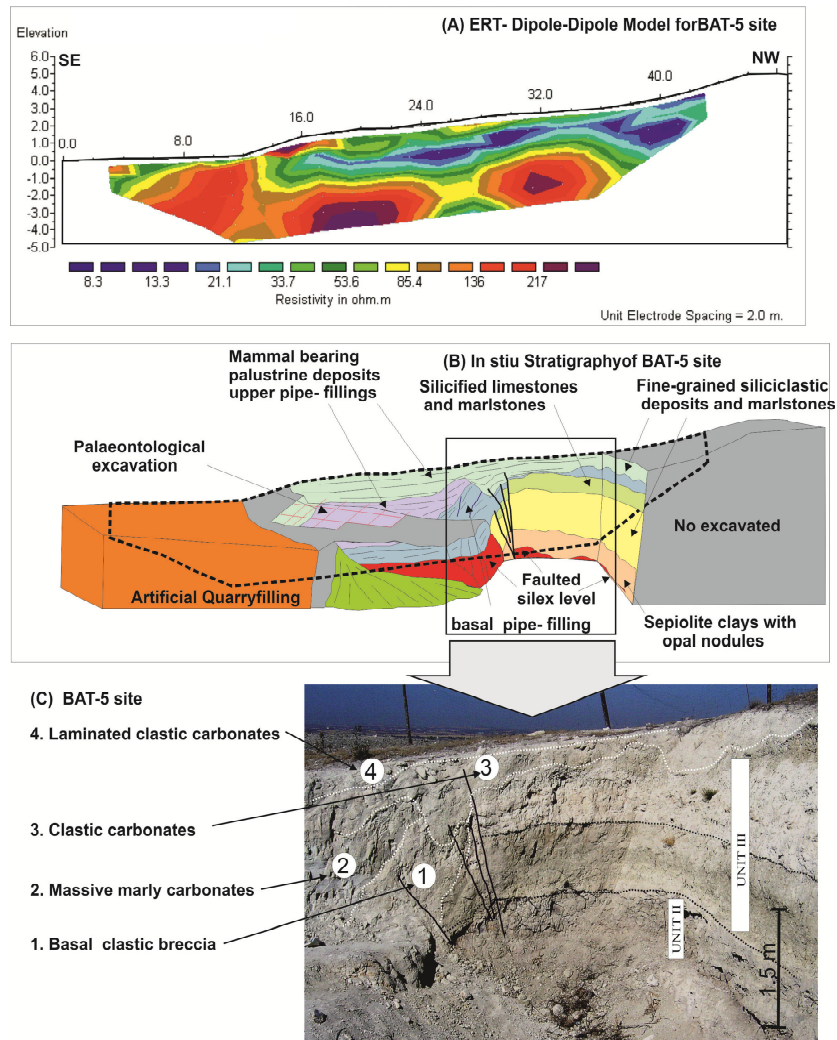


Figura 334. Modelo inverso 2D del perfil eléctrico (ERT) realizado en el yacimiento de Batallones- 5, Bloque diagrama de la estratigrafía in situ de las paredes del yacimiento de Batallones-5 e interpretación sobre fotografía del yacimiento de Batallones-5.

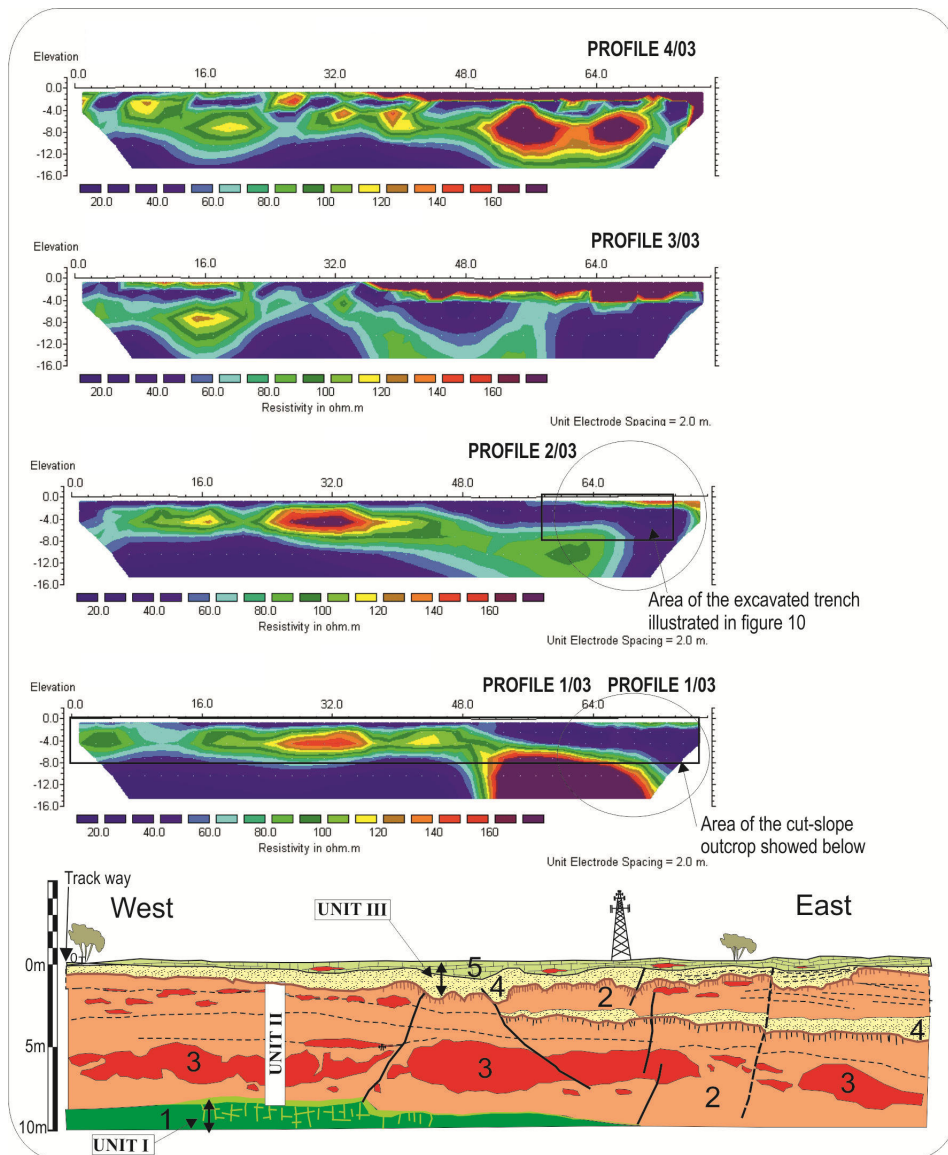


Figura 335. Modelos inversos 2D obtenidos durante la campaña de prospecciones geofísicas de 2003. El perfil 1/03 se sitúa a 10 m de la muralla de la trinchera ilustrada en el esquema de la parte inferior de la figura. La escala vertical del esquema está exagerada con respecto a los modelos 2D. Tanto el perfil 1/03 como el 2/03 muestran claramente el colapso de los estratos, la formación de depresiones superficiales y de túneles (piping) en profundidad. Las zonas de resistividad elíptica indican la presencia de nódulos de ópalo de diferente tamaño.



Figura 336. Modelos inversos 2D obtenidos en los yacimientos de Batallones-5, Batallones 7 y Batallones- 10. Estos dos últimos yacimientos fueron detectados mediante estas prospecciones geofísicas previamente a la explotación minera del área en el que se situaban.



9.3.1.- Perfiles realizados de tomografía eléctrica 2D durante las campañas de campo del 2002 al 2013

9.3.1.1 – Campaña 2002: perfiles de reconocimiento de los yacimientos BAT-1 y BAT-2 en sus estados iniciales de excavación.

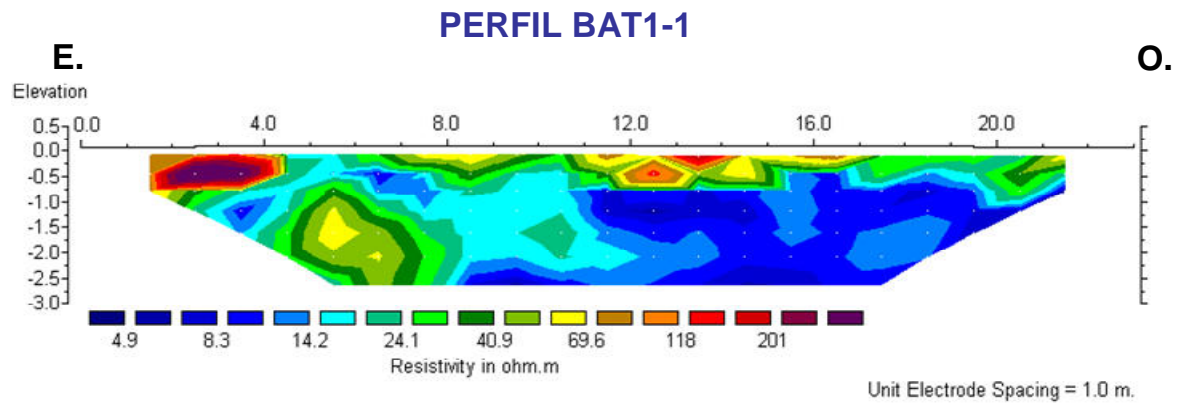


Figura 337. Perfil BAT1-1

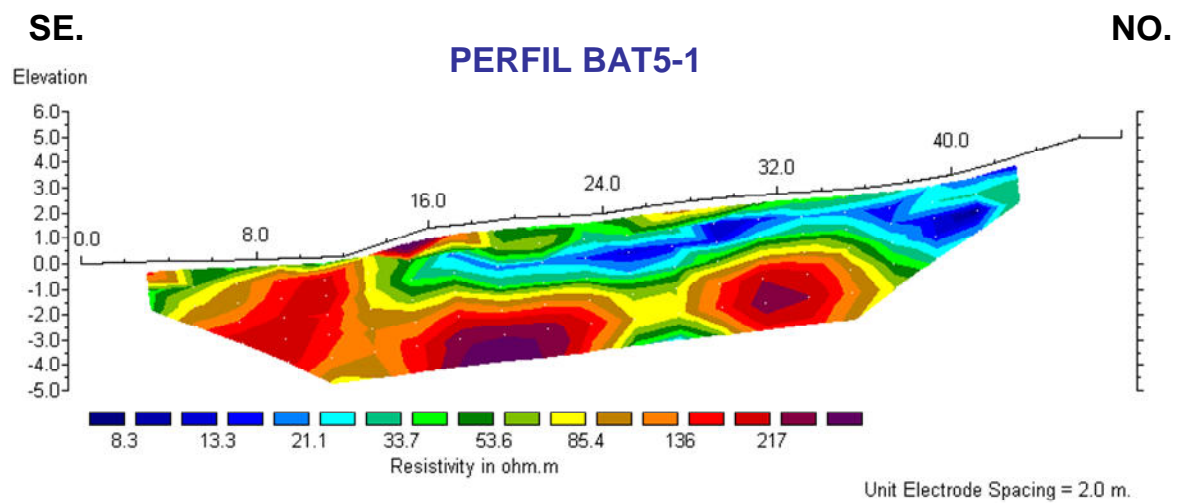


Figura 338. Perfil BAT5-1



9.3.1.2 – Campaña 2003: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-7 (Perfil BAT7-2).

PERFIL BAT7-1

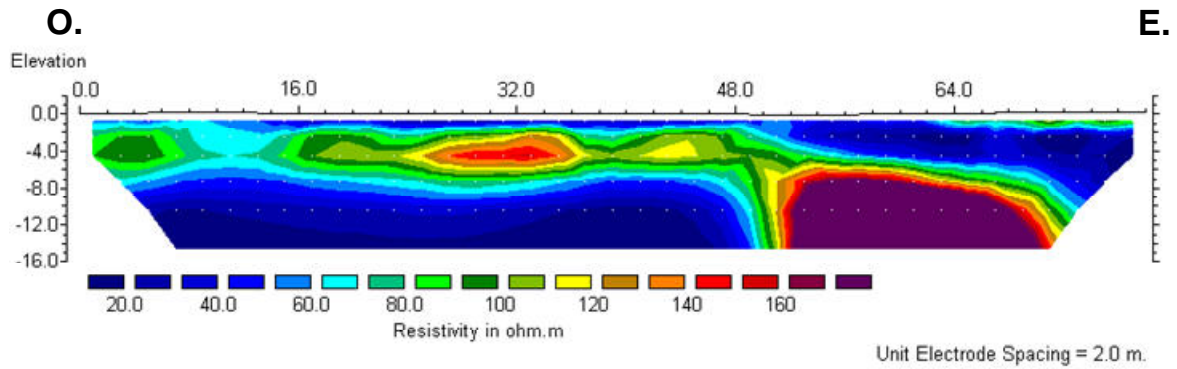


Figura 339. Perfil BAT7-1

PERFIL BAT7-2

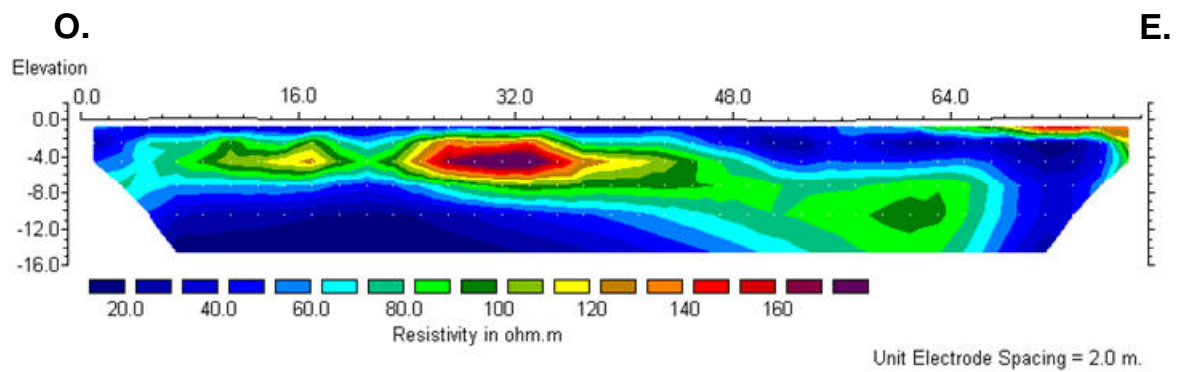


Figura 340. Perfil BAT7-2

PERFIL BAT7-3

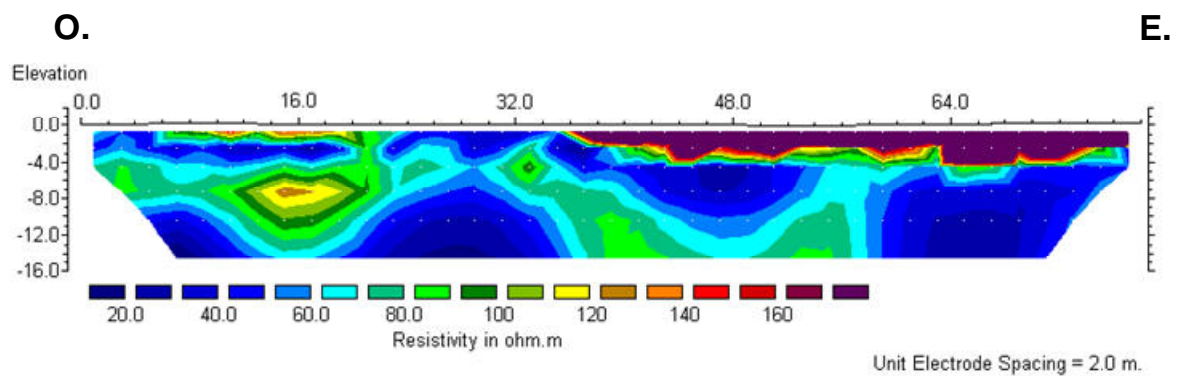


Figura 341. Perfil BAT7-3



PERFIL BAT7-4

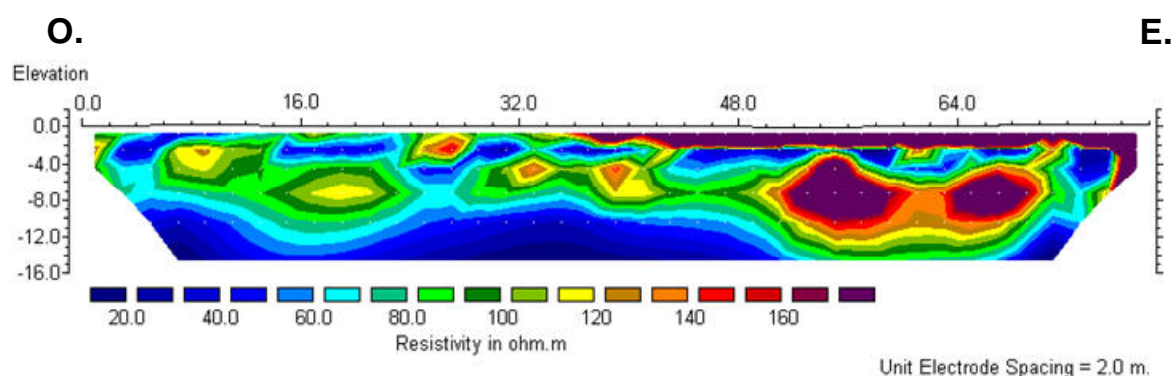


Figura 342. Perfil BAT7-4

9.3.1.3 – Campaña 2004: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-8 (perfil BAT8-3).

PERFIL BAT8-1

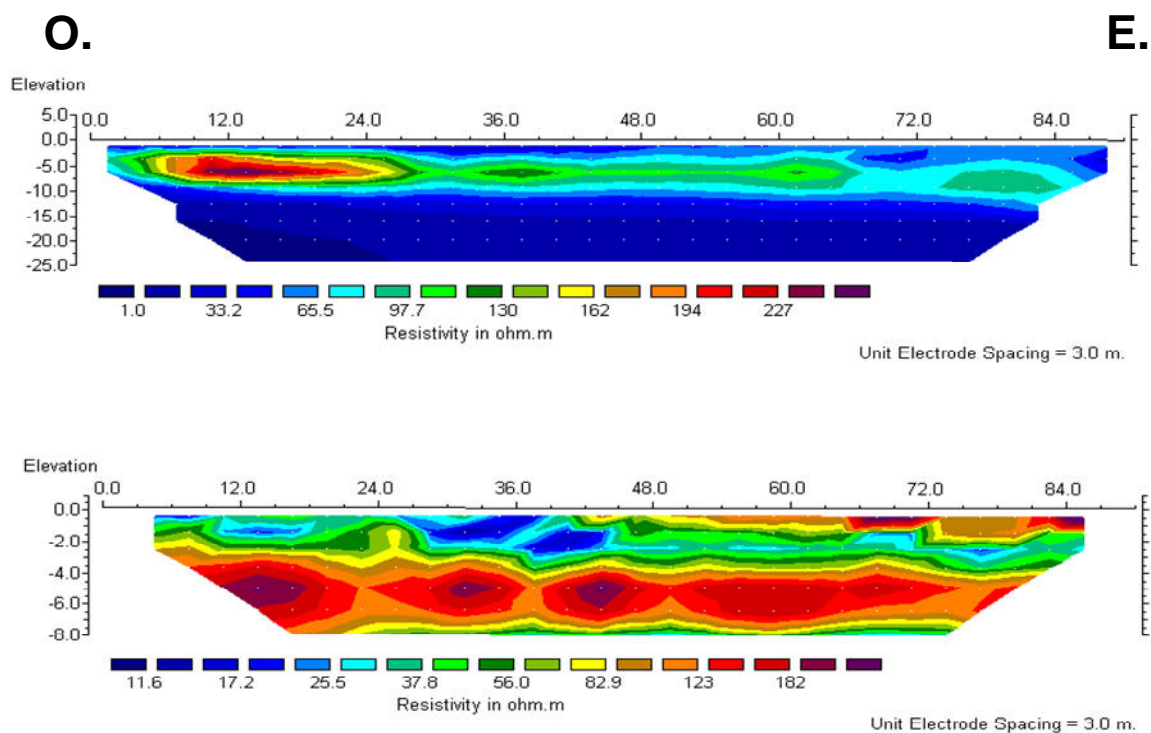


Figura 343. Perfil BAT8-1. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo.



PERFIL BAT8-2

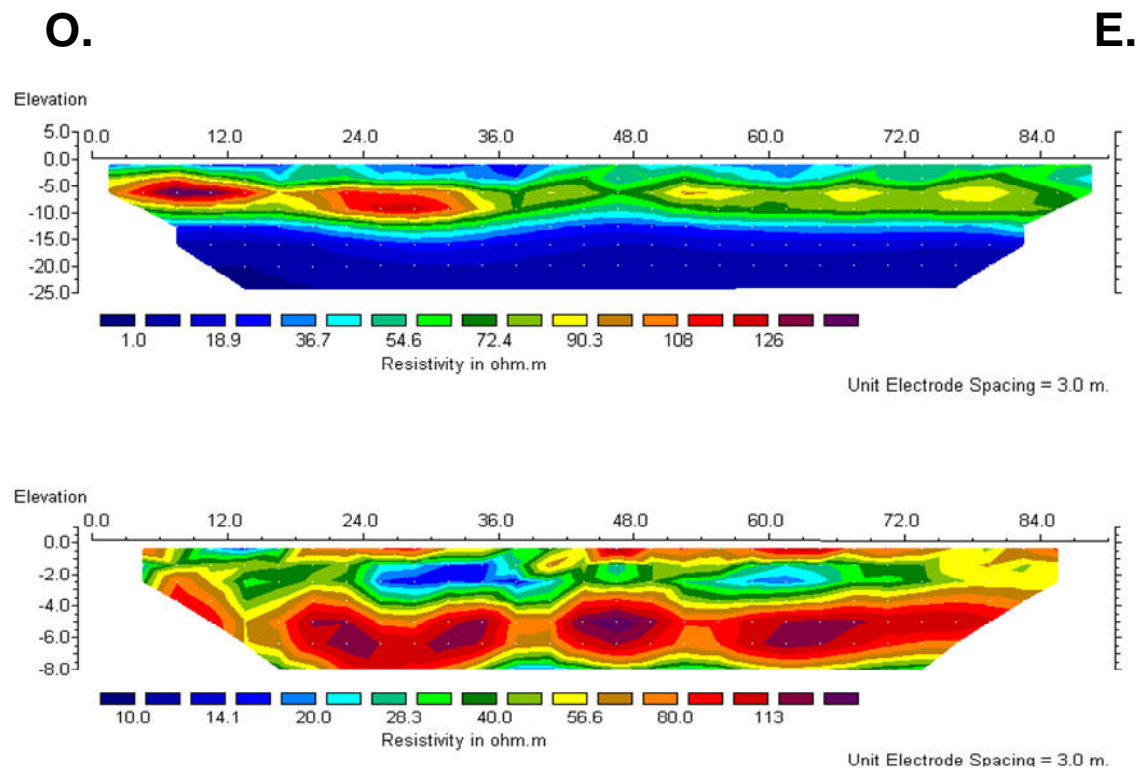


Figura 344. Perfil BAT8-2. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo.



PERFIL BAT8-3

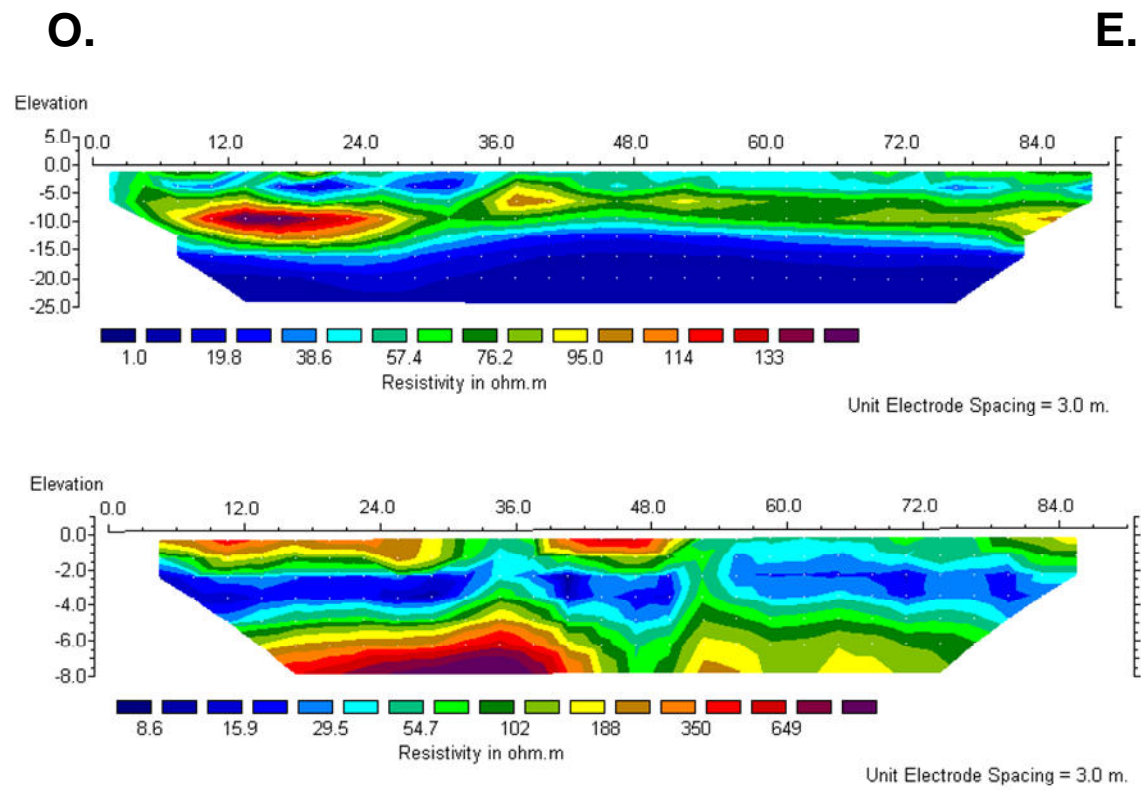


Figura 345. Perfil BAT8-3. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo.



PERFIL BAT8-4

O.

E.

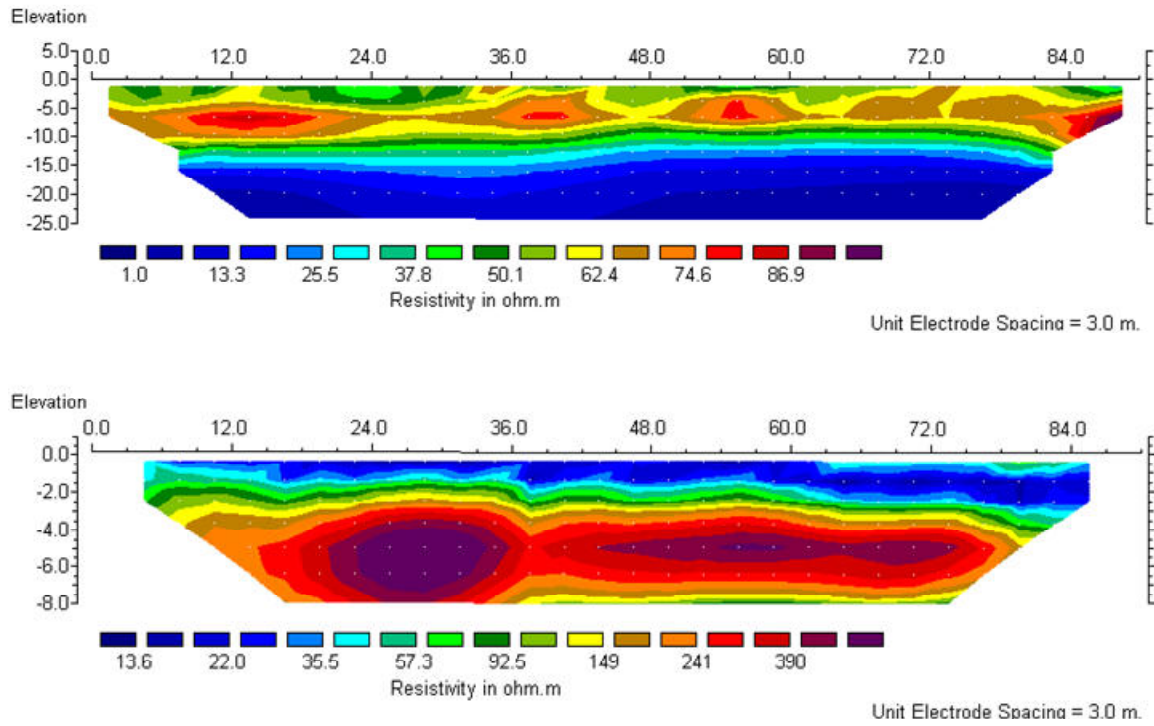


Figura 346. Perfil BAT8-4. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo.



PERFIL BAT8-5

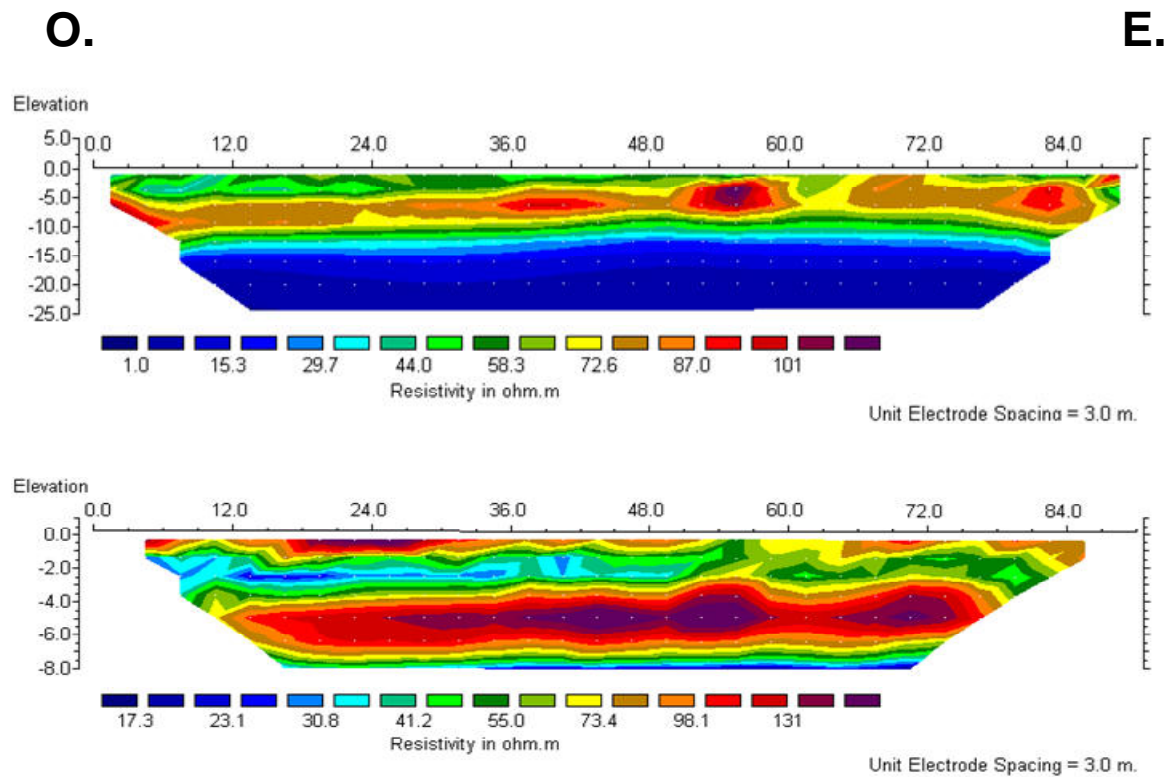


Figura 347. Perfil BAT8-5. En la parte superior dispositivo Polo-Polo y en la parte inferior dispositivo Dipolo-Dipolo.

9.3.1.4 – Campaña 2006: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-9 (perfil BAT9-4)

PERFIL BAT9-1

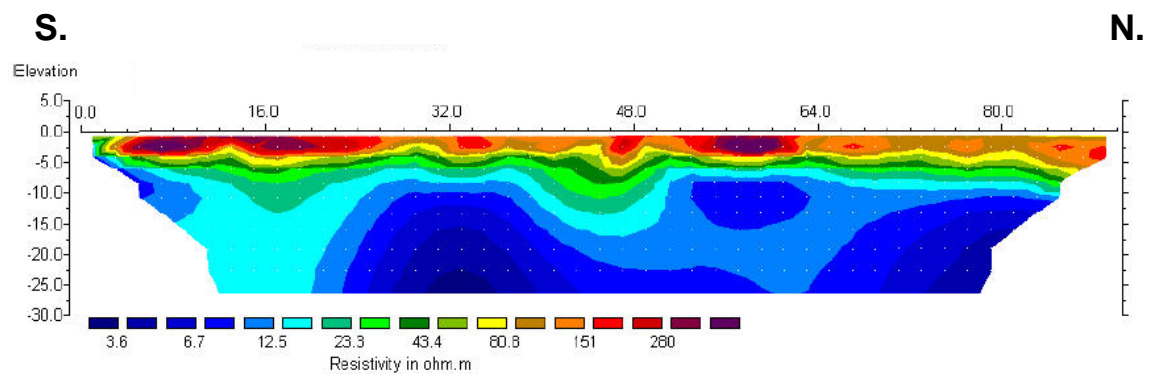


Figura 348. Perfil BAT9-1



PERFIL BAT9-2

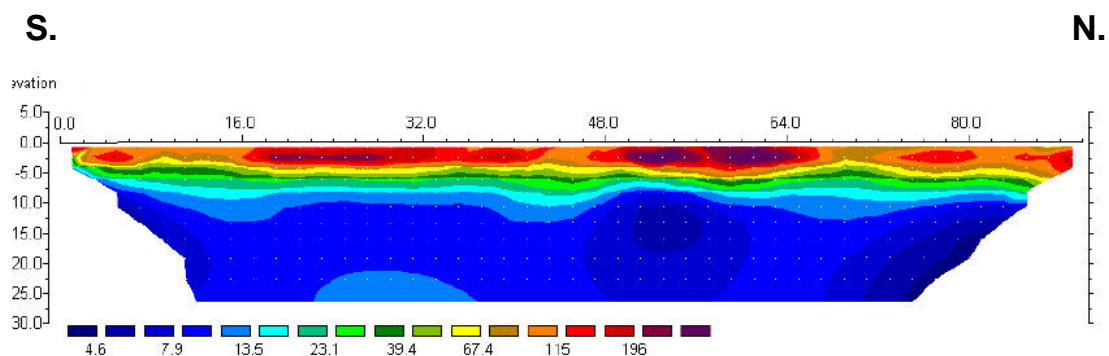


Figura 349. Perfil BAT9-2

PERFIL BAT9-3

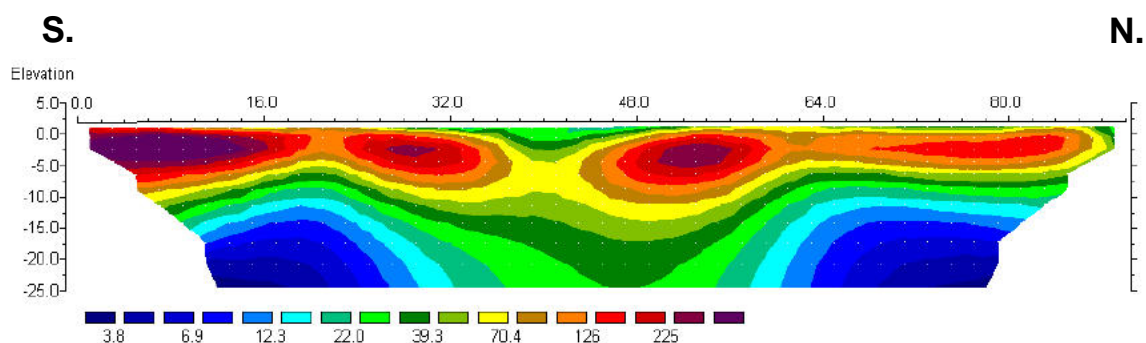


Figura 350. Perfil BAT9-3

PERFIL BAT9-4

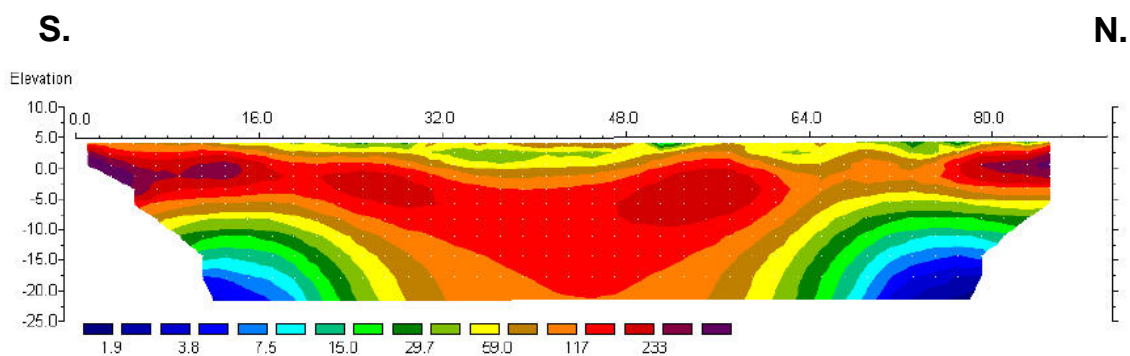


Figura 351. Perfil BAT9-4



PERFIL BAT9-5

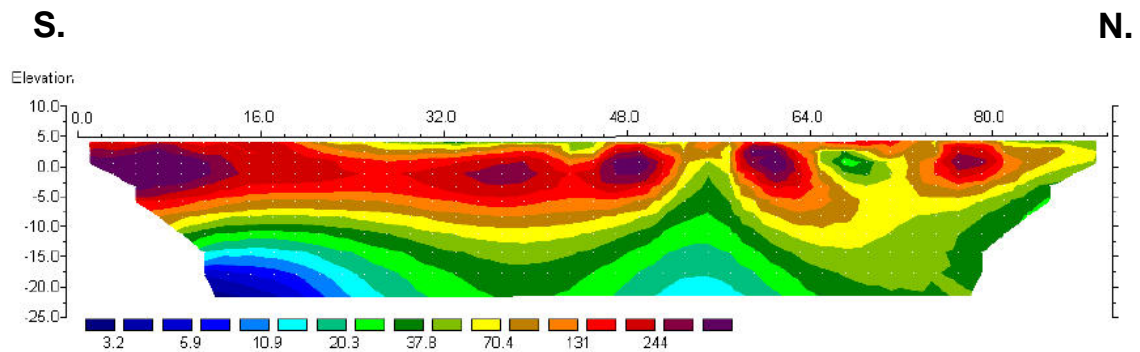


Figura 352. Perfil BAT9-5

9.3.1.5 – Campaña 2007: perfiles de prospección y localización del yacimiento BAT-10 (perfil BAT10-1)

PERFIL BAT10-1

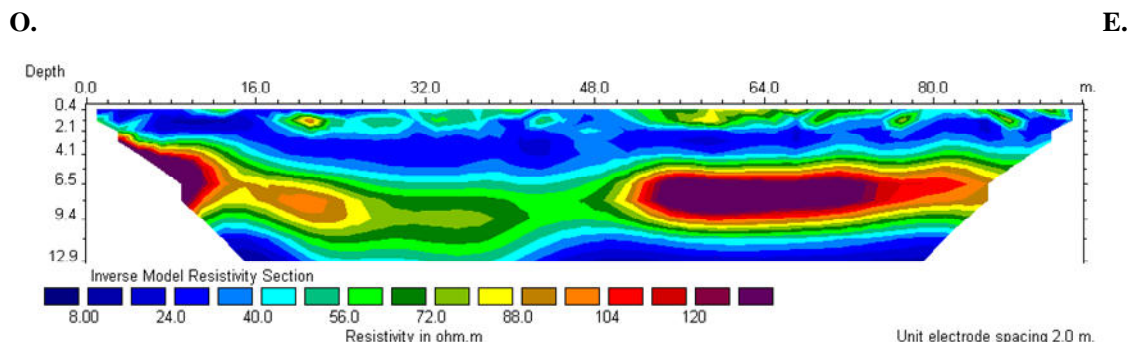


Figura 353. Perfil BAT10-1

PERFIL BAT10-2

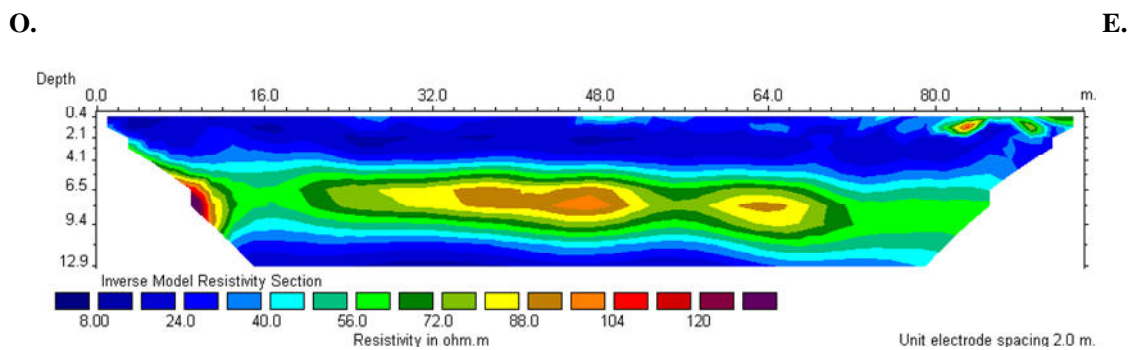


Figura 354. Perfil BAT10-2



PERFIL BAT10-3

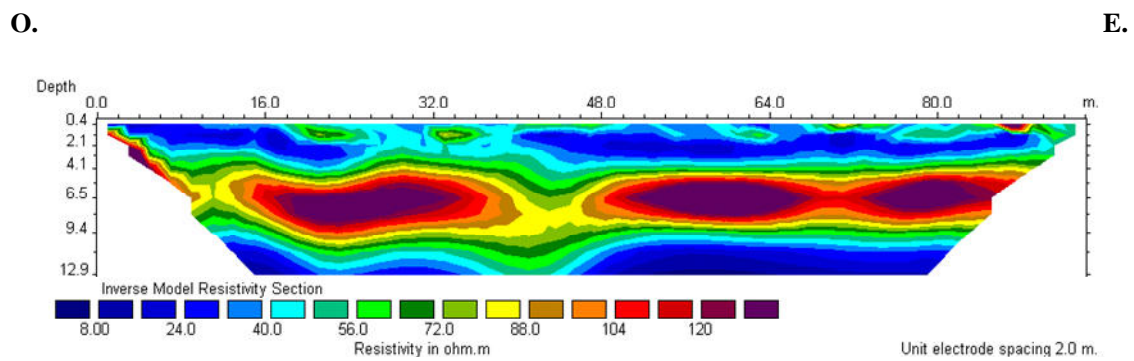


Figura 355. Perfil BAT10-3

PERFIL BAT10-4

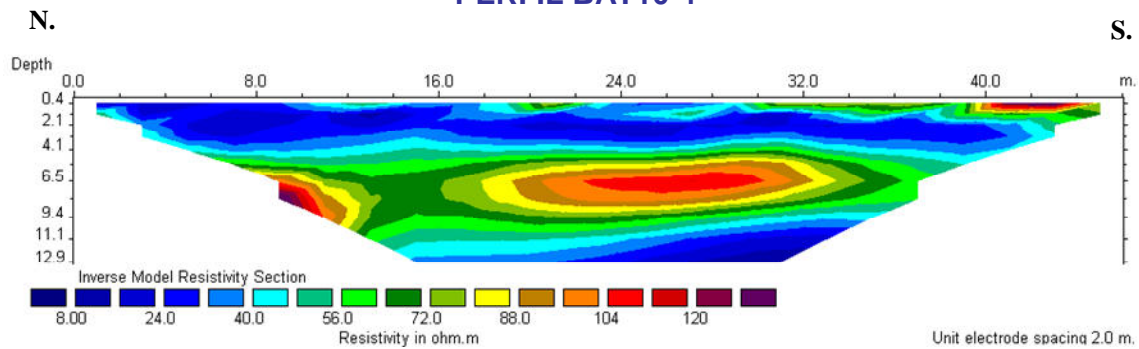


Figura 356. Perfil BAT10-4

PERFIL BAT10-5

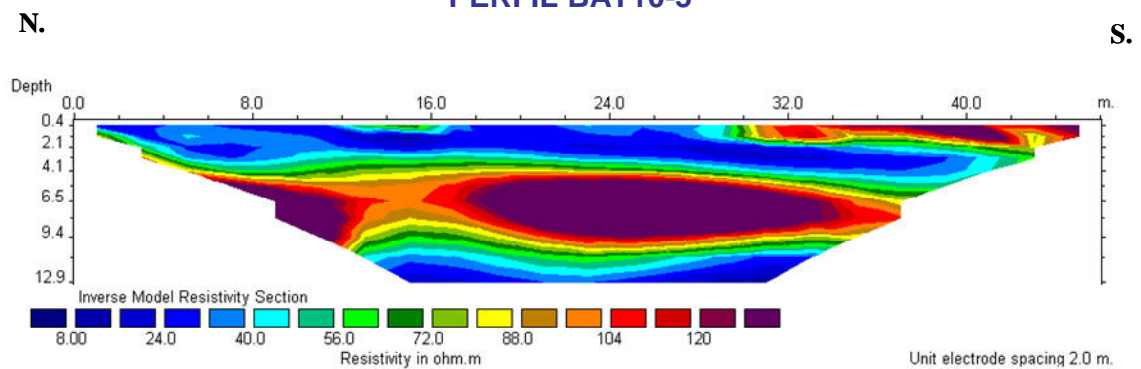


Figura 357. Perfil BAT10-5

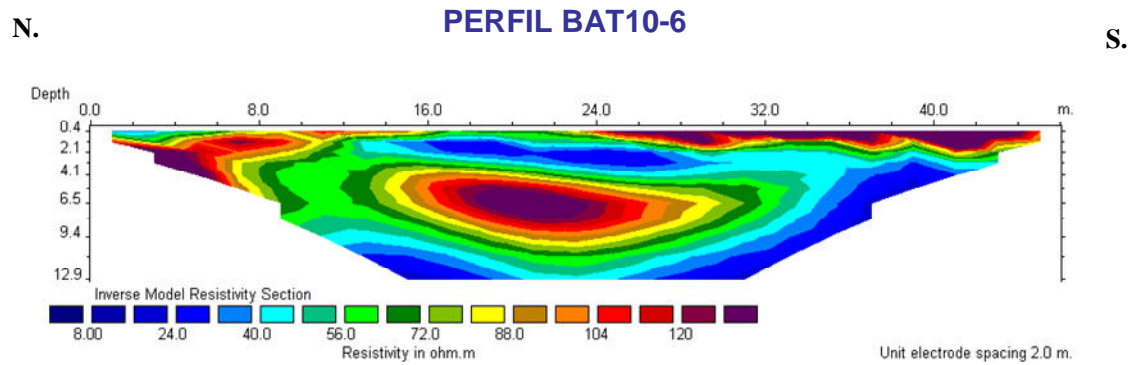


Figura 358. Perfil BAT10-6

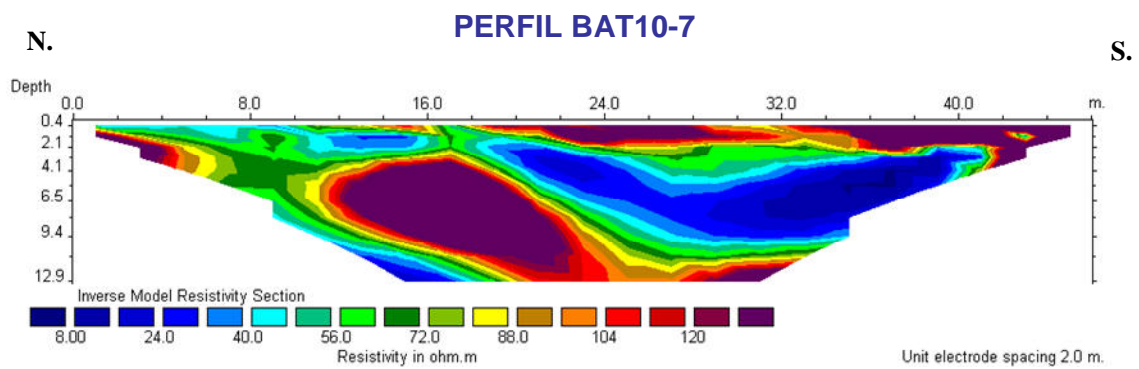


Figura 359. Perfil BAT10-7

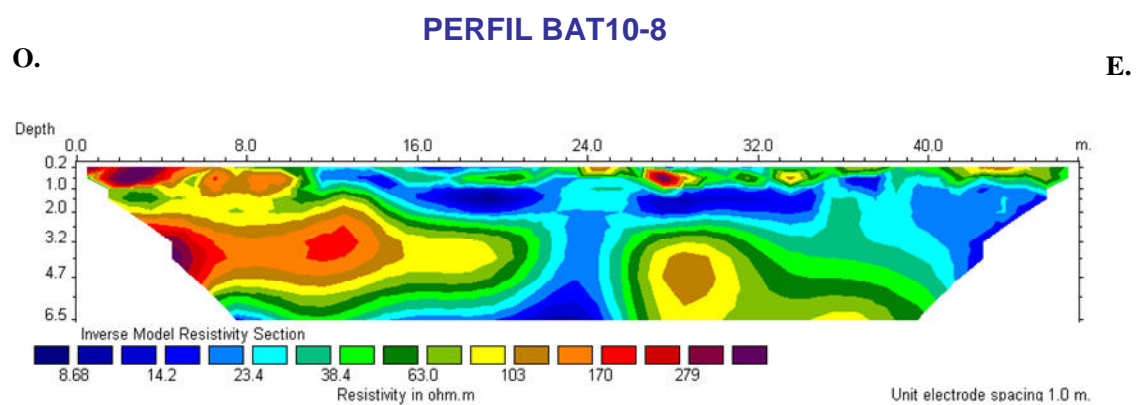


Figura 360. Perfil BAT10-8



N. **PERFIL BAT10-10** **S.**

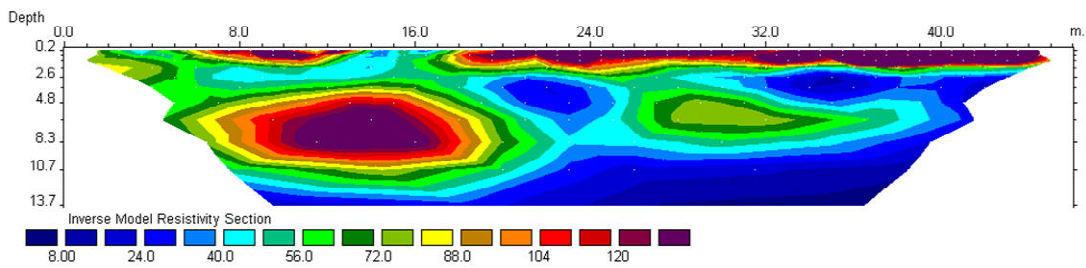


Figura 361. Perfil BAT10-10

N. **PERFIL BAT10-11** **S.**

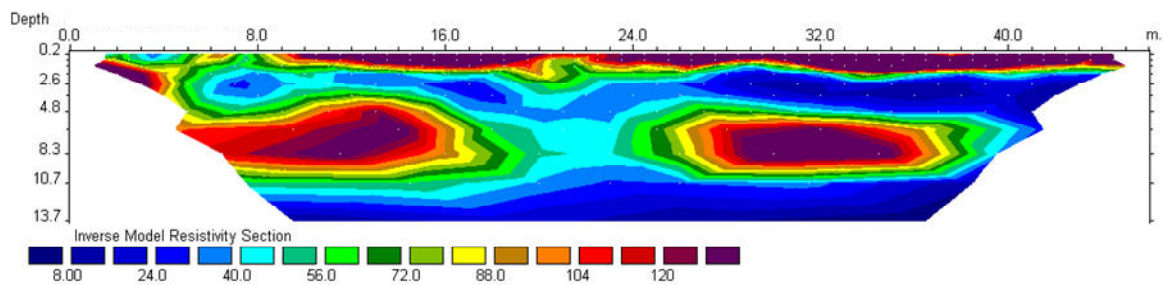


Figura 362. Perfil BAT10-11

N. **PERFIL BAT10-12** **S.**

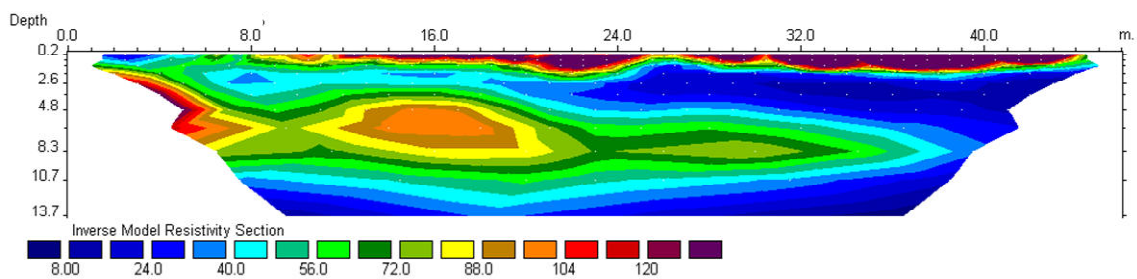


Figura 363. Perfil BAT10-12

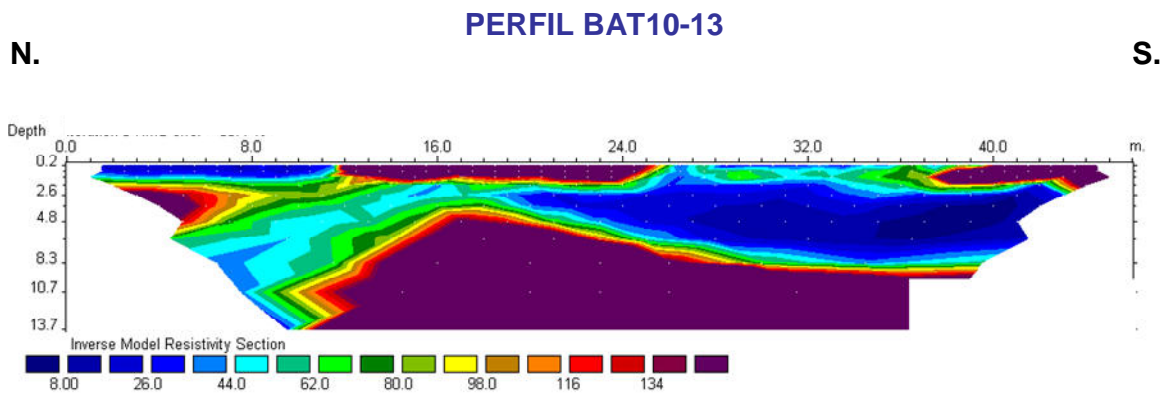


Figura 364. Perfil BAT10-13

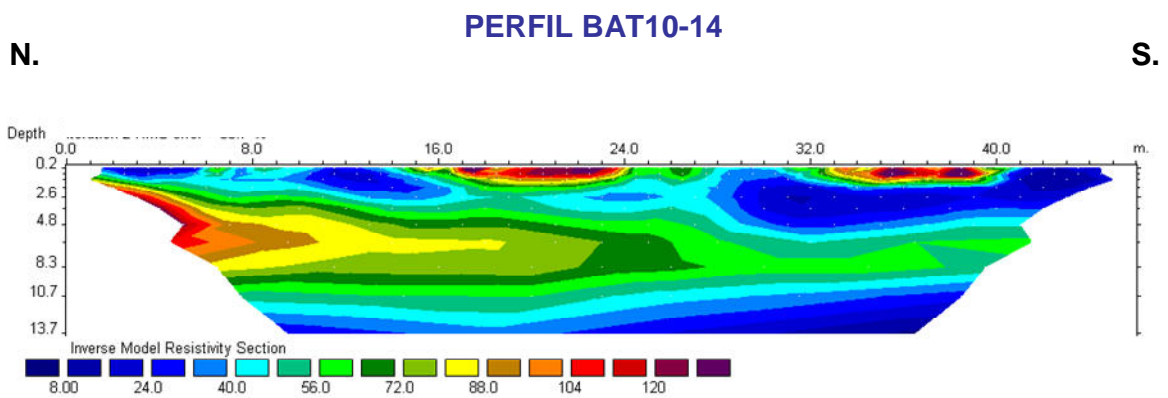


Figura 365. Perfil BAT10-14

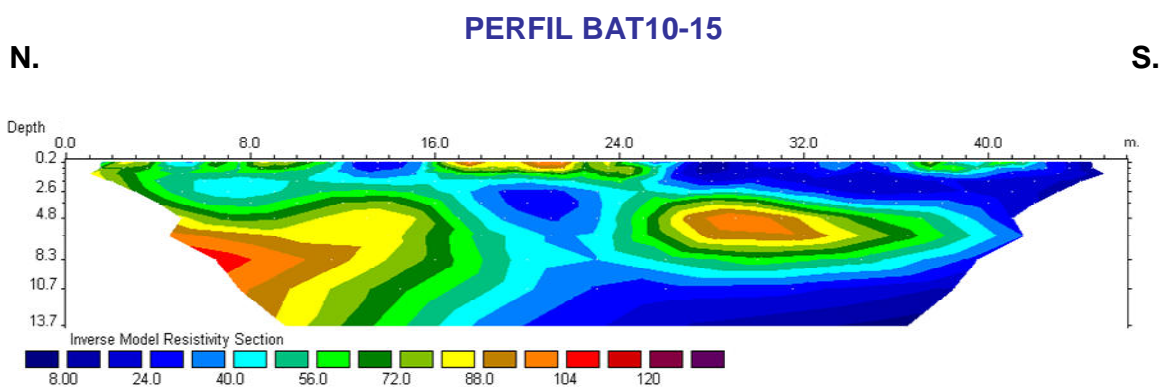


Figura 366. Perfil BAT10-15

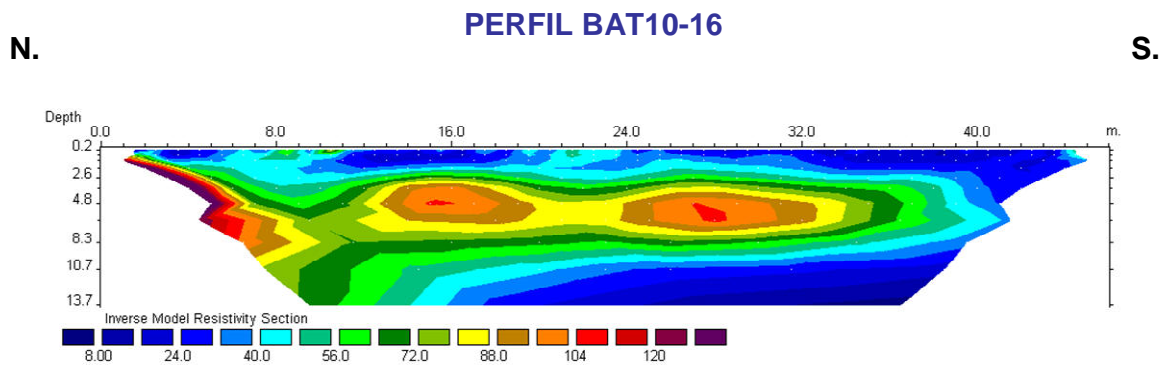


Figura 367. Perfil BAT10-16

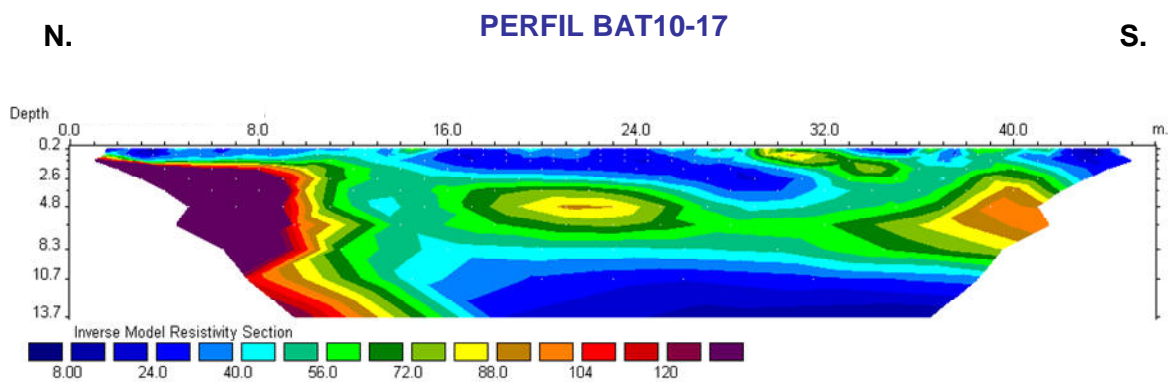


Figura 368. Perfil BAT10-17

9.3.1.6 – Campaña 2010: perfiles de caracterización geológica del Cerro de los Batallones en transecto N-S (perfiles 1/10 y 3/10) y caracterización del yacimiento en excavación BAT-3 (perfil 2/10)

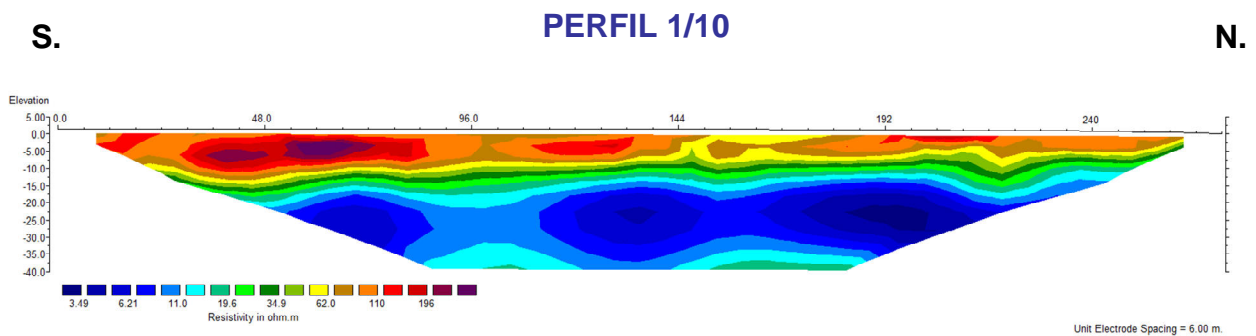


Figura 369. Perfil 1/10

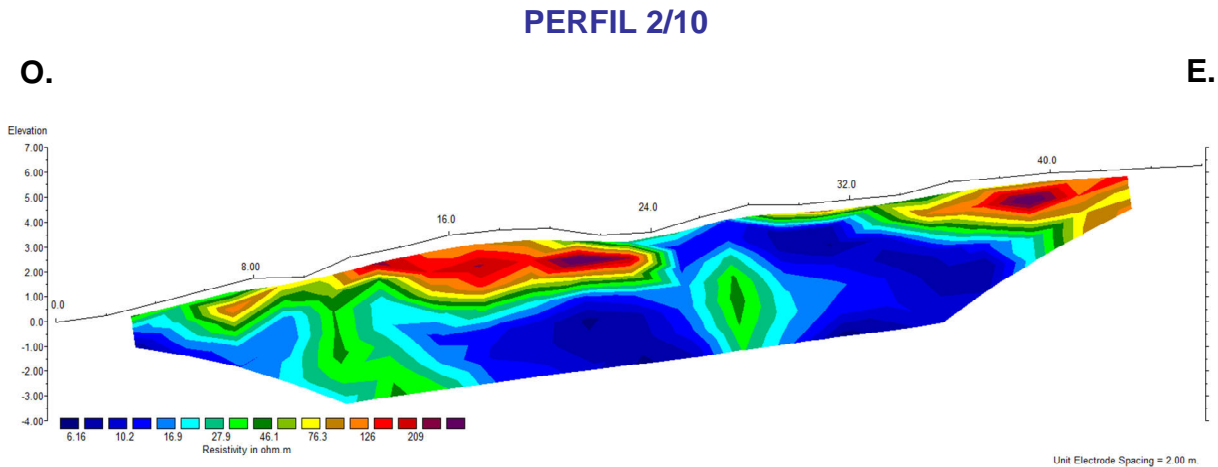


Figura 370. Perfil 2/10

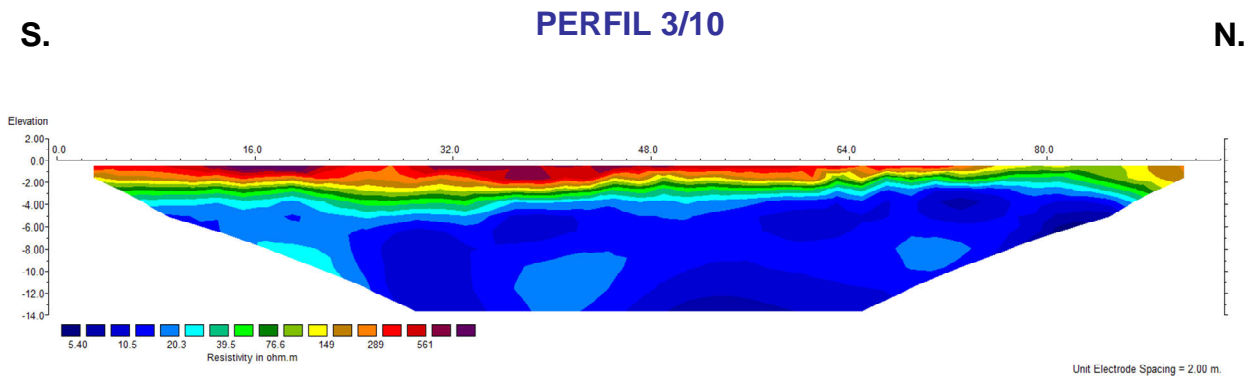


Figura 371. Perfil 3/10

9.3.1.7 – Campaña 2013 perfiles de Caracterización 2D y 3D del yacimiento en excavación BAT-3.

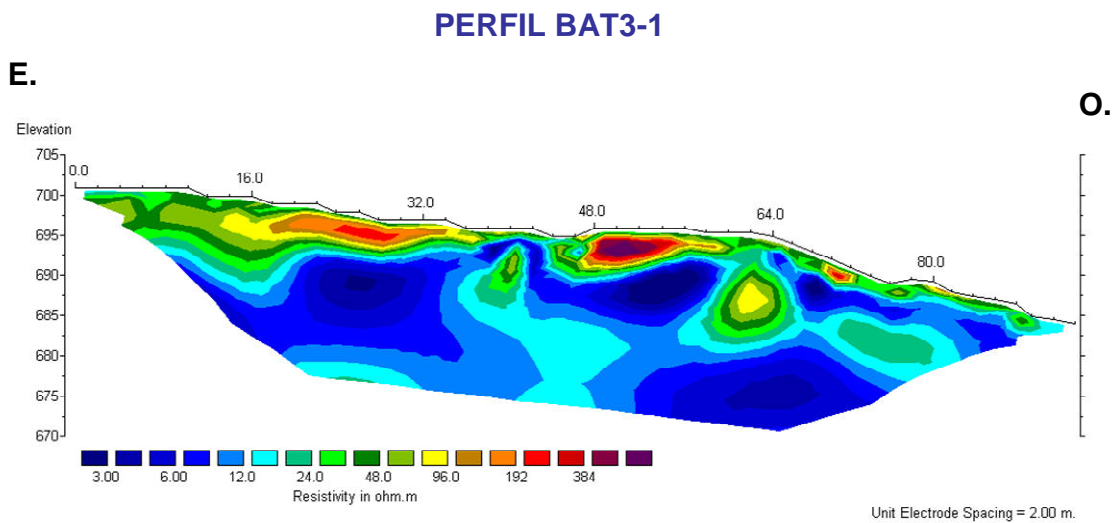


Figura 372. Perfil BAT3-1



PERFIL BAT3-2

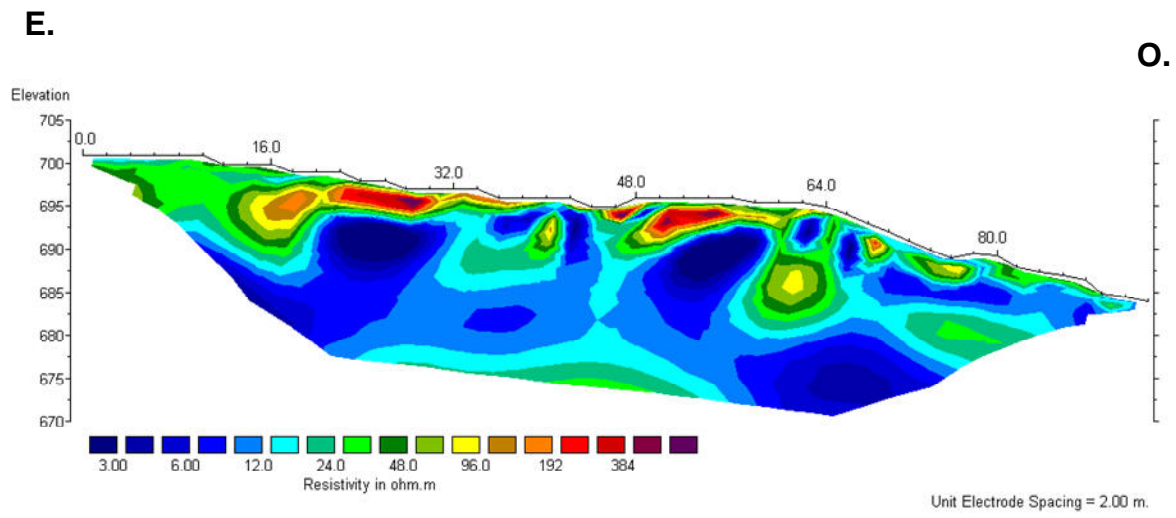


Figura 373. Perfil BAT3-2

PERFIL BAT3-3

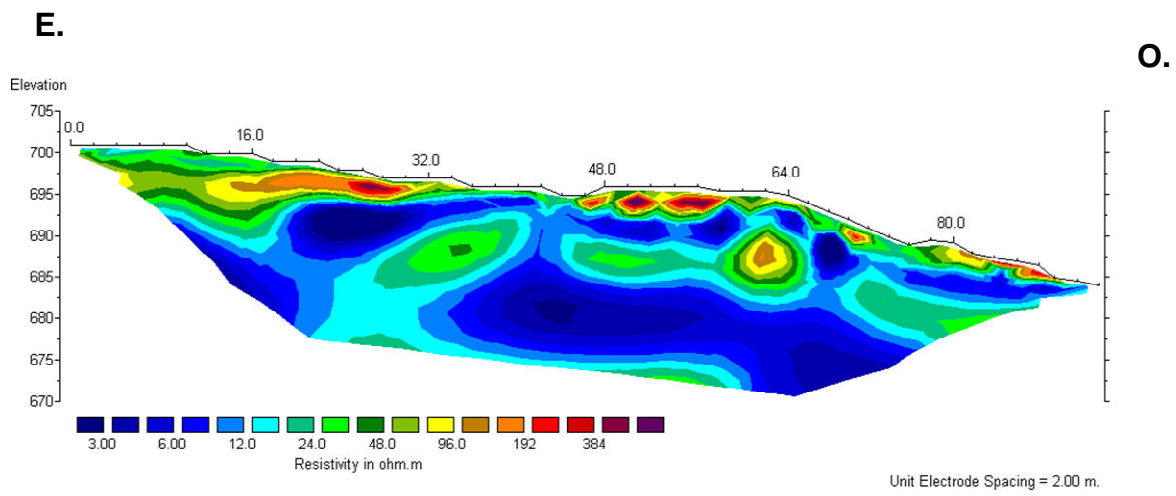


Figura 374. Perfil BAT3-3



9.3.2.- Tomografía Eléctrica 3D

El empleo de la Técnica de Tomografía Eléctrica 3D responde a los siguientes factores:

- Elevada sensibilidad del parámetro registrado (resistividad) a la existencia de discontinuidades geoelectricas.
- Obtención de secciones de resistividad bidimensionales y tridimensionales mediante programas de representación que permitirán determinar la posición de los posibles yacimientos en el Cerro de los Batallones. El estudio permite cartografiar en 3D la ubicación y forma de los yacimientos en caso de su existencia dentro de la zona de estudio.
- Precisión en la determinación de los valores de resistividad tanto en la vertical, como lateralmente, dado el alto número de datos utilizados.

Los trabajos de investigación geofísica mediante tomografía eléctrica 3D han consistido en la realización de perfiles de investigación paralelos para posteriormente ser procesados en 3D para localizar con alta resolución, los posibles yacimientos del Cerro de los Batallones.

La figura 375 muestra el análisis 3D realizado partiendo de los perfiles 2D BAT3-1, BAT3-2 y BAT3-3 (figuras 372 a 374) para la caracterización del yacimiento BAT- 3

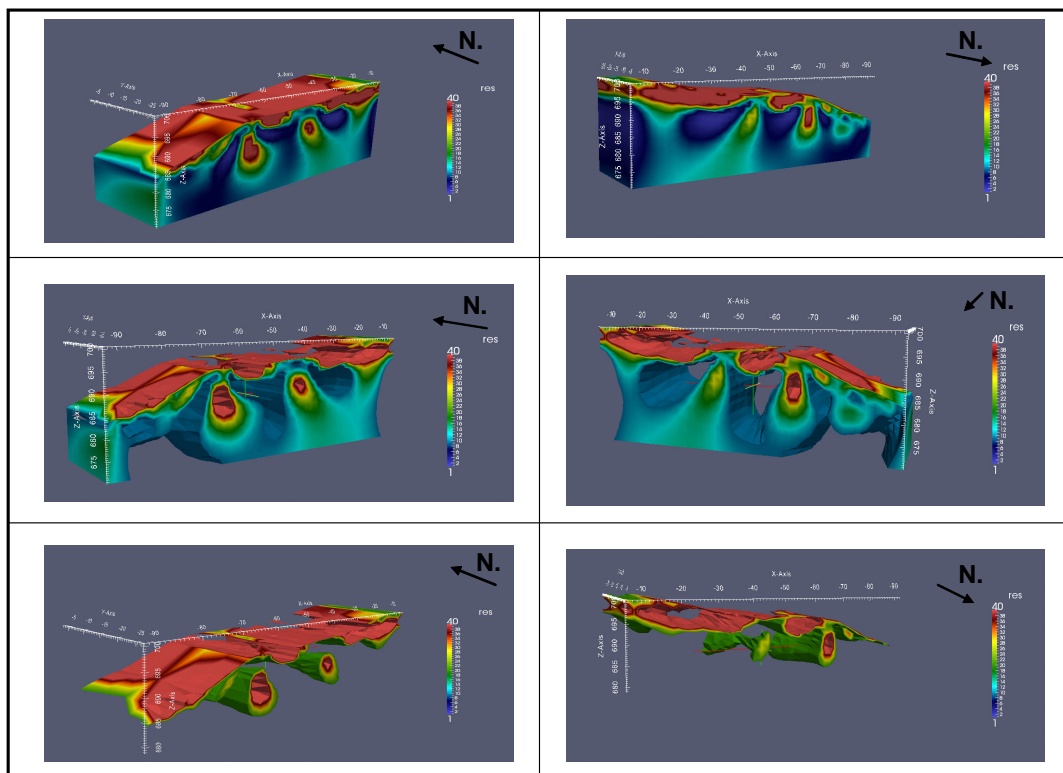


Figura 375. Modelo 3D realizado para la caracterización del BAT-3.



9.3.3.- Creación de un Modelo 3D mediante el programa SketchUP

Con los perfiles de tomografía eléctrica se ha ido realizando a lo largo de los años un modelo 3D del subsuelo con el programa SketchUp donde se incluyen la totalidad de los perfiles. El objetivo ha sido el de recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática, esto ha permitido acceder eficientemente y de manera organizada a los datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada con mayor facilidad. Esta forma de almacenamiento de los perfiles de tomografía eléctrica permite que los datos sean fácilmente manipulables, resolviendo problemas de localización, almacenamiento, mapas, etc.

La utilización de esta herramienta de gestión de información espacial ha permitido de forma sencilla ampliar las campañas geofísicas del Cerro de los Batallones teniendo en cuenta la localización de datos geofísicos previos, además de la accesibilidad, el tamaño y la ubicación de los terrenos. Lo que nos permite aprovechar mejor el tiempo y los recursos de los que se disponen. Una vez hemos obtenido mediante herramientas de gestión de información espacial nuestro modelo de representación global de la zona de estudio, este podrá ser siempre ampliado de forma sencilla introduciéndole nuevos datos de Tomografía eléctrica a nuestro modelo, con la finalidad de mejorar nuestro conocimiento del Cerro de los Batallones.

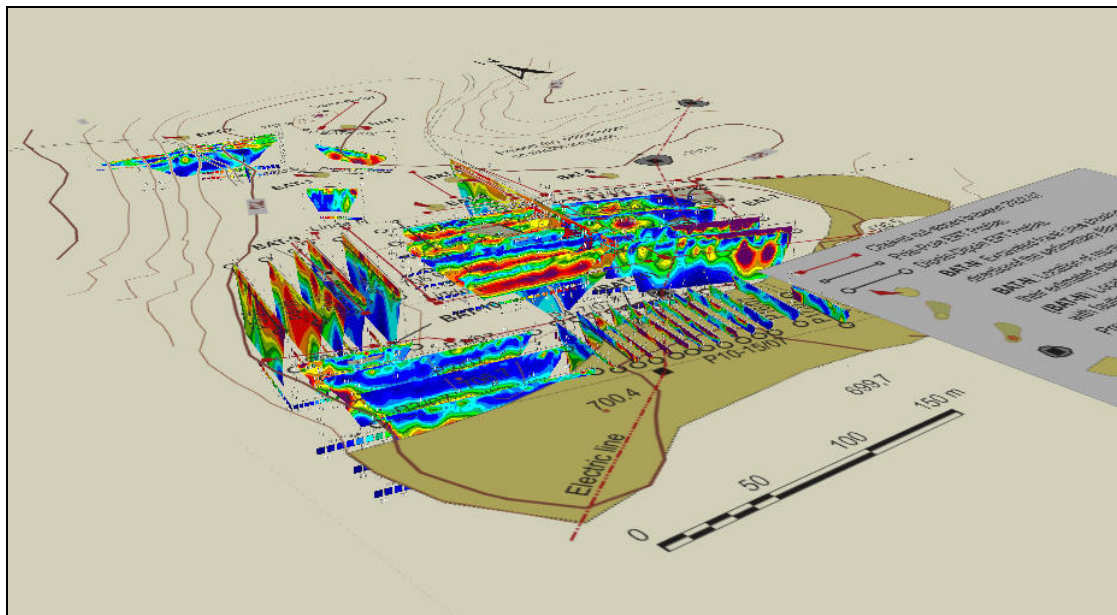


Figura 376. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones

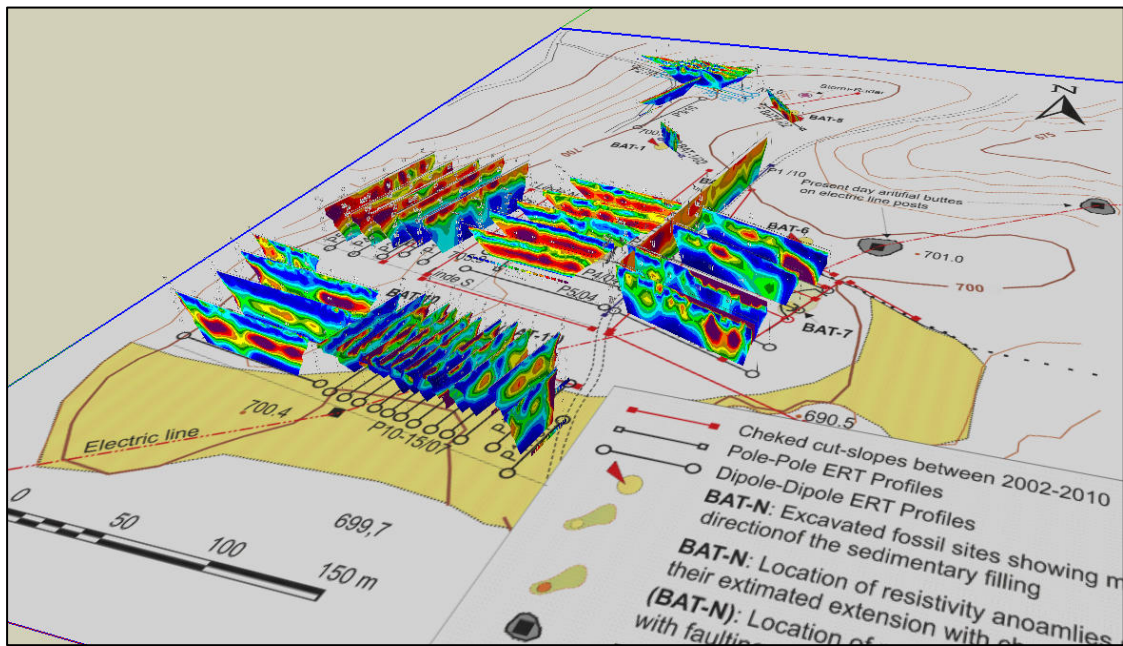


Figura 377. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones

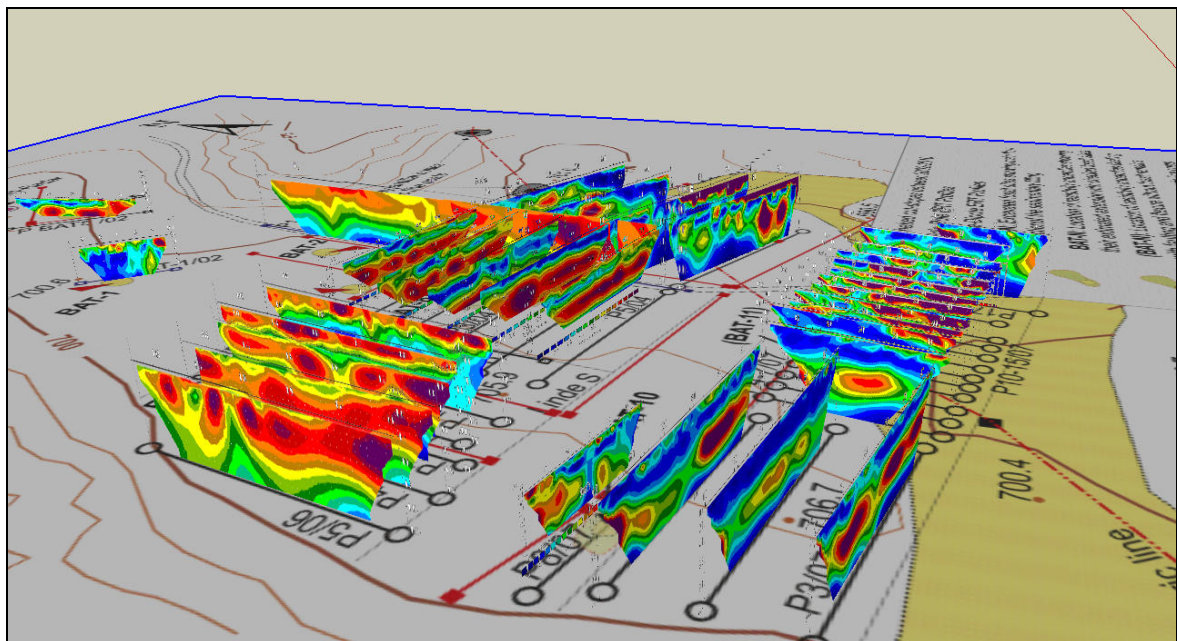


Figura 378. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones

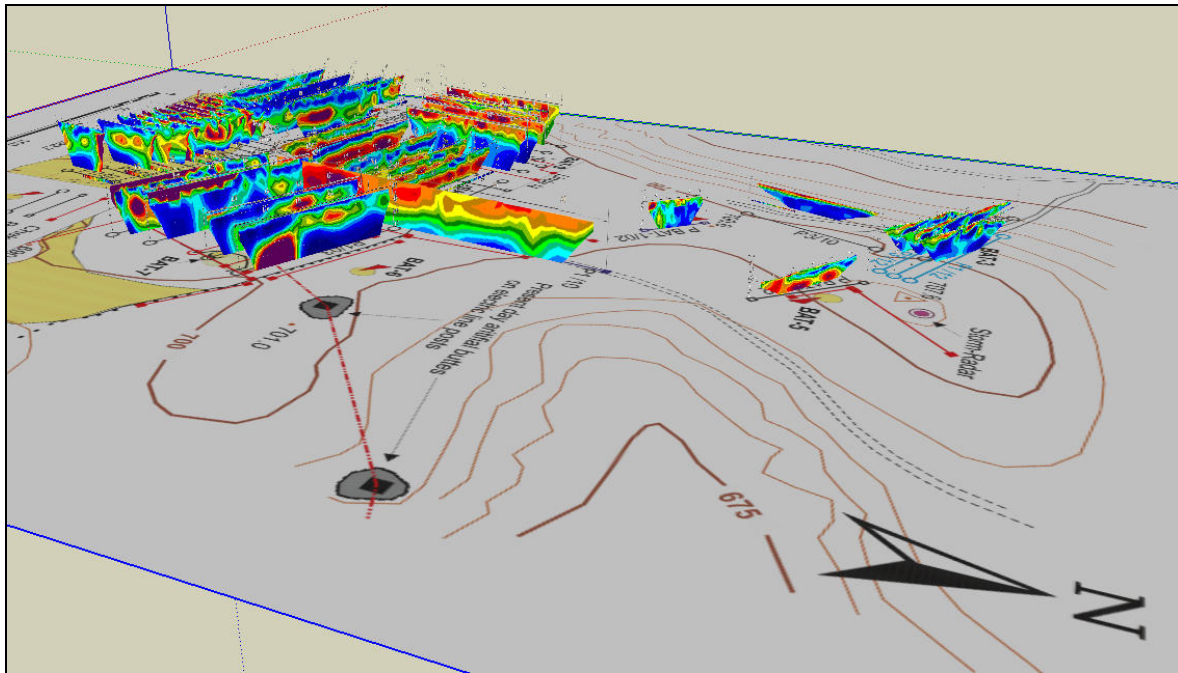


Figura 379. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones

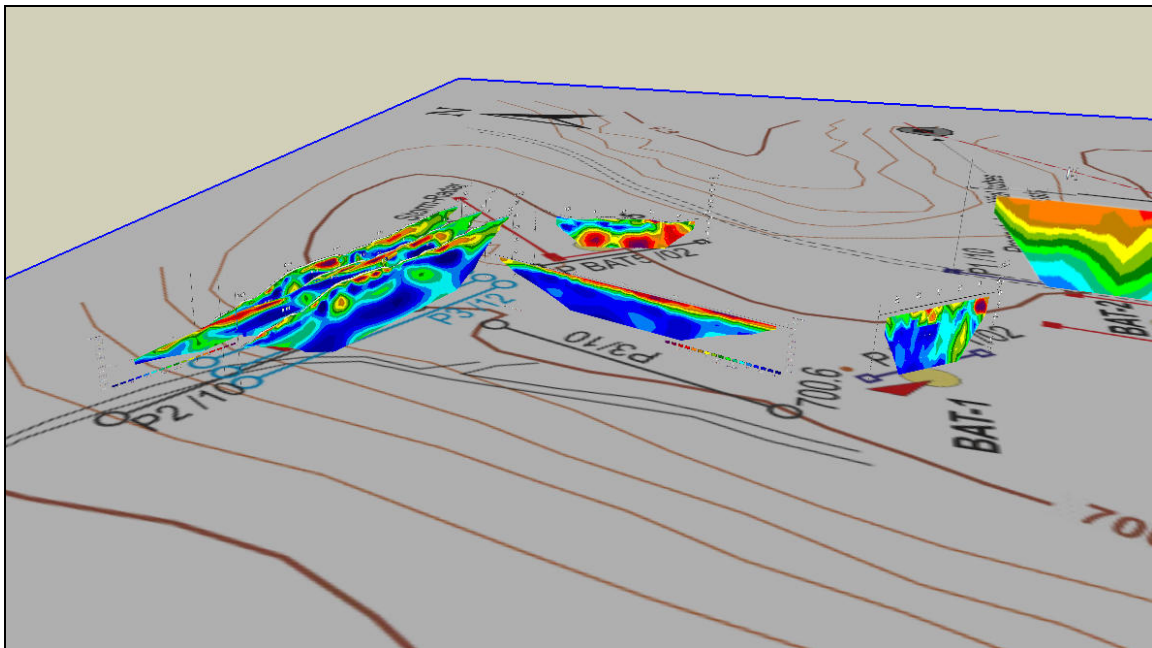


Figura 380. Imagen del Modelo 3D creado en SketchUp de para la caracterización del Cerro de los Batallones



9.4.- Análisis de la investigación y mejoras

El análisis conjunto de la prospección geofísica para la localización de sistemas de yacimientos de mamíferos miocenos del Cerro de los Batallones permite obtener las siguientes conclusiones:

- 1) Todos los yacimientos del Cerro de los Batallones participan de las mismas características: acumulaciones paleontológicas excepcionales en rellenos discordantes con los sedimentos estratificados de la sucesión sedimentaria general del cerro.
- 2) Los yacimientos aparecen en diferentes niveles estratigráficos, ya que en realidad son discordantes y generalmente responden a cavidades desarrolladas en los materiales carbonatados y siliciclásticos del techo de la Unidad Intermedia Miocena (Vallesiense). Existen dos tipos de yacimientos unos superficiales (tipo 1) dominados por la acumulación de grandes herbívoros y otros profundos (tipo 2) dominado por la acumulación de carnívoros.
- 3) La utilidad de la tomografía eléctrica de resistividades en la prospección de los yacimientos de vertebrados del Cerro de Los Batallones radica en el hecho de la existencia de niveles de sílex (muy resistivos) y materiales siliciclásticos finos y rellenos fosilíferos de menor resistividad que permite bien su diferenciación. La mayoría de los yacimientos se encuentran aparentemente perforando los niveles de sílex, la prospección geoelectrica de nuevos yacimientos se ha centrado en la identificación de rupturas, flexuras y curvaturas de dichos niveles resistivos.
- 4) La aplicación de la tomografía eléctrica han ayudado a definir la geometría y extensión espacial de tales yacimientos previos a la explotación minera de los sectores estudiados a partir del año 2003 utilidad. Se ha permitido así la protección del yacimiento y del patrimonio paleontológico que estos contienen, pero también la realización de catas con excavadoras que permitieran confrontar los datos procedentes de las tomografías con la estructura real de los yacimientos, permitiéndonos ir refinando las pautas y dispositivos de investigación año tras año. Este es el caso de los yacimientos BAT-7, BAT-9 y BAT-10 identificados por tomografía. En la actualidad tras la explotación de las áreas circundantes quedan como pequeños cerros testigos en el interior del cerro. Tan solo BAT-10 se haya en proceso de excavación paleontológica. BAT-7 y BAT-9 se encuentran en reserva y tan solo se les ha practicado catas y trincheras preliminares de exploración.
- 5) Los datos procedentes de las tomografías eléctricas permiten inferir que los yacimientos se encuentran interconectados por chimeneas verticales adoptando un dispositivo de tipo “reloj de arena”. Lo que ha permitido inferir el modelo genético de características pseudokársticas (piping) de las cavidades. Los sucesivos modelos se han ido refinando desde las iniciales propuestas de Pozo et al. (2004b) y Silva et al. (2004) a otros más detallados, permitiendo la mejora acerca del conocimiento de los procesos geológicos, geomorfológicos y tafonómicos que permitieron la génesis de las cavidades, su posterior relleno y la formación/preservación de las acumulaciones fósiles (Calvo et al., 2012; 2013; Domingo et al., 2013).



- 6) Los análisis geoelectricos para la caracterización de yacimientos en proceso de excavación, ha mostrado que dispositivos de medida con espaciado de 1m ofrecen una buena resolución que permite inferir la geometría de la distribución de los rellenos de las cavidades fósiles e identificar zonas donde es más probable la acumulación de elementos fósiles, como las brechas basales de BAT-1. Aparte de ha este yacimiento, la tomografía para caracterización se ha aplicado con espaciados de 2m a yacimientos parcialmente excavados como BAT-5, BAT-10 y finalmente BAT-3. En este último se ha desarrollado un modelo 3D para su caracterización, permitiendo diferenciar zonas menos resistivas y mas resistivas de geometría subcircular-cilíndrica y desarrollo horizontal que podría tratarse de los primeros conductos o cavidades horizontales detectadas en el cerro. Su aplicación a los otros yacimientos según prosiga su excavación permitirá planificar las labores de excavación del mismo.
- 7) Se ha utilizado el programa SketchUP como herramienta de gestión información espacial que ha permitido recopilar, organizar y estudiar convenientemente los datos de las campañas de tomografías eléctricas de manera sistemática, esto ha permitido acceder eficientemente y de manera organizada a los datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada con mayor facilidad. Esta forma de almacenamiento de los perfiles de tomografía eléctrica permite que los datos sean fácilmente manipulables, resolviendo problemas de localización, almacenamiento, mapas, etc. Mediante este sistema podrán incluirse las campañas futuras de tomografía eléctrica a nuestro modelo, con la finalidad de mejorar nuestro conocimiento del Cerro de los Batallones.

En definitiva la prospección y caracterización geoelectrica del sistema de yacimientos fósiles de Batallones presenta diferentes vertientes, técnicas, teóricas y relacionadas con la protección del patrimonio histórico – paleontológico. La vertiente técnica es que la prospección geoelectrica ha permitido su localización y caracterización, con anterioridad al año 2003 los yacimientos iban saliendo a la luz por la acción de las excavadoras de la explotación minera de sepiolita. La vertiente teórica es que, ha facilitado la caracterización geométrica de las cavidades, dando claves esenciales sobre su posible génesis y posterior proceso de relleno. Por último, la prospección geofísica ha permitido preservar para su futura excavación yacimientos, que sin esta tecnología, hubieran sido sin duda parcialmente arrasados.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES



ÍNDICE

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

1.- CONCLUSIONES

1.1.- Aportaciones originales

1.2.- Conclusiones metodológicas.

1.3.- Consideraciones finales.

2.- FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN



1.- CONCLUSIONES

En la presente tesis doctoral se ha planteado un avance en las técnicas de prospección geofísica ligadas fundamentalmente a métodos geo-eléctricos y electromagnéticos. Este avance está basado en la innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial.

Innovación porque se han mejorado y obtenido el mayor rendimiento de algunas técnicas geofísicas con el objeto de aumentar su profundidad de investigación. Esto ha permitido aplicarlas al estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ y para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

Innovación porque se han buscado nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología y la geotécnica, más concretamente para la caracterización de deslizamientos y la localización de filtraciones en presas. Además de las anteriormente citadas para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

Innovación porque se han aplicado dichas técnicas a la resolución de problemas geológicos complejos como es el caso del sistema de yacimientos de vertebrados miocenos del Cerro de Los Batallones (Madrid). Se han probado distintos métodos y dispositivos de tomografía eléctrica 2D y 3D permitiendo localizar los yacimientos antes de su destrucción parcial por los trabajos de excavación mineros de la zona, así como caracterizar la geometría de las antiguas cavidades subterráneas en las que se acumularon los vertebrados, poniendo las bases para su interpretación geológica como fenómenos de piping (Calvo et al., 2012).

Uso de herramientas de gestión de información espacial porque su aplicación permite recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática. Esto permite acceder eficientemente y de manera organizada a datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada de los mismos con mayor facilidad. A su vez, la implementación de estos datos en soportes y visualizadores gráficos geo-espaciales y geo-referenciados permiten llevar a cabo análisis 2D y 3D de los problemas hidrogeológicos, geológicos y geotécnicos planteados en esta tesis con una mayor eficacia.

1.1.- Aportaciones originales.

El desarrollo de la presente tesis doctoral ha permitido realizar una serie de aportaciones innovadoras que se han enfocado a la mejora de técnicas de prospección y al desarrollo de nuevas aplicaciones de las técnicas al uso. Entre las aportaciones originales cabe destacar:

- Se han mejorado las técnicas geofísicas de Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y Tomografía eléctrica aumentando la profundidad de penetración máxima a 3 km y a 1 km respectivamente. No se ha encontrado bibliografía donde se hayan alcanzado estas profundidades de investigación con estos métodos. Este avance más la aplicación de herramientas de gestión de información espacial han sido básicos para la aplicación de estas dos técnicas geofísicas en el estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ y para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.



- Se han desarrollado nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología, la geotecnia y la geología:
 - Caracterización de deslizamientos
 - Localización de filtraciones en presas
 - Caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂
 - Prospección de estructuras hidrogeológicas profundas
 - Prospección de sistemas de yacimientos paleontológicos complejos
- Se ha confirmado que las Técnicas Geofísicas asociadas a programas de gestión de información espacial forman una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos, arqueológicos y medioambientales.

1.2.- Conclusiones metodológicas.

Las principales conclusiones con respecto a dichas aportaciones se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Mejora de las técnicas geofísicas de Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SED_T) y Tomografía eléctrica para aumentar la profundidad de penetración:
 - Se han mejorado las técnicas geofísicas de Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SED_T) y Tomografía eléctrica aumentando la profundidad de penetración máxima a 3 km y a 1 km respectivamente. No se ha encontrado bibliografía donde se hayan alcanzado estas profundidades de investigación con estos métodos. Este avance más la aplicación de herramientas de gestión de información espacial han sido básicos para la aplicación de estas dos técnicas geofísicas en el estudio de formaciones geológicas para el almacenaje y la monitorización del CO₂ y para la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas.

Gracias a estos avances la tomografía eléctrica y los sondeos electromagnéticos se muestran como una técnica prospectiva eficaz y representa un avance significativo en la exploración de estructuras geológicas profundas, caracterizando los estratos para profundidades mayores de 500 metros. La resolución del método decrece exponencialmente con la profundidad, pero no la precisión; por ello se plantea la prospección de estructuras y no la prospección de niveles litológicos concretos.

- Estas técnicas permiten la inversión 2D y 3D de perfiles, posibilitando la modelización mediante herramientas de gestión de información espacial de estructuras de Cuencas o Subcuencas hidrogeológicas, ayudando a planificar de forma más rigurosa el emplazamiento de futuras obras de explotación de aguas subterráneas o inyección de CO₂, recargas, evolución de la calidad química, control de invasión salina, vulnerabilidad a contaminaciones, determinación de la



salinidad y el grado de saturación de CO₂ de estructuras hidrogeológicas para el almacenamiento de CO₂.

- Dichas metodologías, aplicadas convenientemente permiten de forma rápida el barrido de grandes áreas, con gran precisión y economía si se las compara con otros métodos (sísmica de reflexión). En una jornada de trabajo en zonas de fácil acceso se puede obtener un perfil de 2 a 4 Km., dependiendo de la profundidad de investigación. No obstante, áreas de difícil acceso o vegetación densa dificultan los trabajos de tendido del dispositivo bajando el rendimiento. Otra ventaja importante es la de poder trabajar en zonas de elevado ruido ambiental (presencia de líneas de alta tensión) con la tomografía eléctrica profunda donde la aplicación de otras técnicas sería inviable.
- Las técnicas de tomografía eléctrica profunda y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo profundos pueden caracterizar y monitorizar almacenamientos geológicos de CO₂ y localizar estructuras hidrogeológicas profundas hasta 2 - 3 Km de profundidad. Estas técnicas son un sistema de trabajo "no invasivo y ambientalmente benigno" con el terreno que proporciona "muchísima información y costes mucho más reducidos que las sísmicas de reflexión y sondeos mecánicos", que se utilizan actualmente.
- Desarrollo nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas en los campos de la hidrogeología, la geotecnia y la geología:
 - Caracterización de deslizamientos: En la presente tesis doctoral, se ha profundizado en la utilización de las técnicas geofísicas de Potencial Espontáneo (PE), del Método de la Emisión de Campo Electromagnético (ECE), de la Tomografía Eléctrica (TE) y de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) para la caracterización de deslizamientos y la detección de futuras zonas de fractura. La literatura existente de la aplicación de estas técnicas en deslizamientos es escasa, aunque en auge, y no se tiene constancia de que hayan sido aplicadas simultáneamente en deslizamientos hasta esta tesis doctoral.

Los resultados obtenidos han confirmado la utilidad de estas técnicas geofísicas para la caracterización de deslizamientos y han planteado nuevas líneas de investigación relacionadas con la detección de zonas de tensión en fallas activas.

- Localización de filtraciones en presas: En el caso de la investigación para la localización de zonas de filtración en presas, los datos de procesamiento del Potencial Espontáneo (PE) y Puesta a masa (PM) indican la utilidad de estas técnicas para localización de zonas de filtración. El análisis detallado de las anomalías de PE y PM se han realizado mediante la ejecución de perfiles de Tomografía Eléctrica (TE) y el estudio de los datos bibliográficos de la zona, los cuales han permitido ratificar la existencia de fenómenos de filtración y por lo tanto, la eficacia de estas técnicas geofísicas.
- Localización y caracterización de yacimientos de vertebrados. La aplicación de



tomografía eléctrica 2D en el sistema de yacimientos miocenos del Cerro de Los Batallones ha permitido la localización de cuatro de los diez yacimientos de esta zona, permitiendo su preservación para posteriores campañas de excavación. De la misma manera se ha caracterizado la geometría de ocho de los diez yacimientos aportando valiosa información para su posterior interpretación geológica. La comparación de las pseudosecciones de resistividades eléctricas con la litología y estructura de las secuencias estratigráficas de la explotación minera y en algunos casos de las expuestas en los propios yacimientos fósiles en distintas campañas de excavación, han permitido refinar los valores de resistividades. Ello ha hecho posible mejorar los dispositivos de toma de datos (orientaciones y espaciados) para la adquisición de información geofísica muy detallada que ha permitido identificar cavidades de 3-4 m de anchura y de algo más de 10 m de profundidad. En algunos casos ha permitido la interpretación no solo de la geometría de las antiguas cavidades, si no también de la propia geometría de su relleno sedimentario y de las brechas que contienen las acumulaciones fósiles.

- Además, se han desarrollado nuevas aplicaciones de las técnicas geofísicas para la caracterización y monitorización de almacenes geológicos de CO₂ y la prospección de estructuras hidrogeológicas profundas como se ha citado anteriormente.
- Técnicas Geofísicas asociadas a programas de gestión de información espacial:
 - Las herramientas de gestión de información espacial son capaces de recopilar, organizar y estudiar convenientemente datos geofísicos de manera sistemática, esto permite acceder eficientemente y de manera organizada a los datos con la finalidad de poder hacer una interpretación integrada con mayor facilidad. Esta forma de almacenamiento y visualización de datos es una herramienta clave para el estudio geológico, hidrológico, minero, geotécnico y medioambiental ya que permite crear bases de datos fácilmente manipulables y modificables, resolviendo problemas de localización, almacenamiento, sistemas de coordenadas, mapas, etc.
 - La utilización de herramientas de gestión de información espacial nos permiten de forma sencilla ampliar campañas geofísicas teniendo en cuenta la localización de datos geofísicos previos, además de la accesibilidad, el tamaño y la ubicación de los terrenos. Lo que nos permite aprovechar mejor el tiempo y los recursos de los que se disponen. Una vez hemos obtenido mediante herramientas de gestión de información espacial nuestro modelo de representación global de la zona de estudio, este podrá ser siempre ampliado de forma sencilla introduciéndole nuevos datos de Tomografía eléctrica, Sísmica de Refracción, sondeos... a nuestro modelo, con la finalidad de mejorar nuestro conocimiento de la zona de estudio.
 - La prospección geofísica realizada en sus diferentes metodologías en combinación con las herramientas de gestión de información espacial ha permitido obtener la morfología de las formaciones en profundidad, caracterizar litológicamente los materiales existentes en profundidad y resolver los problemas



específicos de cada estudio realizado. Por lo que se considera que esta asociación de Geofísica + herramientas SIG forma una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas mineros, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos, arqueológicos y medioambientales.

1.3.- Consideraciones finales.

La variedad de problemas hidrogeológicos, geotécnicos y geológicos en general sobre los que se ha trabajado en la presente tesis, permiten plantearse una serie de consideraciones sobre el futuro uso de las técnicas de prospección geofísicas empleadas.

En primer lugar, creo que debería fomentarse el uso simultáneo de varios métodos de prospección, ya que, esto no es sumar o duplicar información sino potenciarla. El aspecto subjetivo que tiene la interpretación Geofísica (arte de interpretar), que puede llegar a ser ambiguo o incluso estar influido por ideas preconcebidas del investigador, disminuye notablemente al analizar simultáneamente más de una propiedad física del subsuelo. La utilización de dos o más técnicas en la resolución de un problema nos proporciona una aproximación cuantitativa y multiparamétrica sobre la constitución y/o la estructura del subsuelo que enriquece, pero impone límites a las interpretaciones a realizar. Además, en la actualidad existen herramientas de gestión de información espacial que permiten utilizar varios parámetros de forma conjunta. Entiendo que en aquellos contextos en el que se utiliza la geofísica como herramienta de apoyo, puede parecer extraño proponer como alternativa utilizar dos o más métodos de prospección. Las razones, a parte de ser de tipo científico-técnico, son de carácter pragmático, ya que es posible que si se utiliza poco la geofísica es porque o bien no se la conoce suficientemente o bien porque no se tiene la suficiente confianza en ella, en cuyo caso una solución de futuro creo que es precisamente ser capaces de demostrar que es una herramienta útil cuando se la emplea adecuadamente, como creo que ha quedado reflejado en la presente tesis doctoral. Sería deseable no olvidar que la Geofísica no es ni una Ciencia Exacta, ni una religión en la que creer o no creer; es la única herramienta al servicio de la Geología que permite averiguar de forma científica la estructura y constitución del subsuelo. Otros métodos geológicos permiten establecer hipótesis, pero sólo con métodos geofísicos pueden éstas ser confirmadas; para que una herramienta sea útil, en primer lugar hay que saber que existe, contar con ella, aunque también, evidentemente, hay que saber utilizarla.

Una alternativa posible en muchas ocasiones a la imposibilidad de utilizar métodos por falta de recursos económicos, es la reutilización de la información, mediante herramientas de gestión de información espacial que almacenen los datos. Una característica que no se le puede negar al dato de campo geofísico es su objetividad y por lo tanto su validez universal, por lo que puede volver a ser utilizado con un objetivo diferente de aquel para el que se obtuvo primariamente. Existen en nuestro país una gran cantidad de datos geofísicos, como son líneas sísmicas, SEV, gravimetría, magnetometría, etc, que han sido tomados para investigaciones de hidrocarburos o mineras, y que pueden ser perfectamente reutilizados para otro tipo de investigaciones. En la mayor parte de los casos el problema radica en que la información es de difícil acceso y se encuentra dispersa en multitud de informes de empresas privadas y organismos públicos, para lo que sería deseable la existencia de centros de documentación, donde se recuperen estos datos y se pongan a disposición de todo tipo de usuarios.



2.- FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

En el futuro, se pretende encontrar alguna nueva aplicación de las técnicas geofísicas, más concretamente, se pretende crear de una metodología geofísica para el análisis del potencial sísmico en zonas de falla que permita identificar zonas de acumulación de esfuerzos y relajación a lo largo de fallas activas. Esta metodología estaría basada en el análisis del Potencial Espontáneo (PE). La futura identificación de zonas de carga (acumulación de esfuerzos) y descarga (relajación de esfuerzos) mediante el desarrollo de esta técnica, permitiría la localización geoespacial de estas anomalías carga/descarga y la identificación de aquellas áreas dentro de la zona de falla más cargadas, y por tanto susceptibles de sufrir un inminente proceso de ruptura, provocando un terremoto. La técnica se aplicará a zonas de falla conocidas, asociadas a terremotos superficiales y que tengan asociados terremotos históricos destructivos. Dentro de estas, es de especial interés y actualidad la Falla de Lorca-Alhama de Murcia, que atraviesa diagonalmente la Región de Murcia, asociada a la serie sísmica de Lorca de Mayo de 2011. El terremoto principal tuvo una magnitud de 5.2 Mw y fue sentido con una intensidad máxima de VII EMS-98 en la ciudad de Lorca, donde provocó casi una decena de muertes, cientos de heridos y daños muy severos en gran parte del parque inmobiliario urbano (unas 700 edificaciones) y patrimonio histórico de la ciudad, generando pérdidas económicas del orden de los 450 Millones de Euros (IGME, 2011; IGN, 2012).

La técnica de Potencial espontáneo se ha utilizado fundamentalmente para la localización de yacimientos metálicos y en el campo de la hidrogeología y más recientemente se ha aplicado a los riesgos geológicos para el seguimiento de la actividad volcánica. Sin embargo, la experiencia adquirida con esta técnica de investigación en la presente tesis, nos ha advertido de su utilidad para la delimitación espacial de zonas sometidas a fenómenos de deformación en deslizamientos y de su capacidad para la localización zonas de tensión elevada y acumulación de esfuerzos en el subsuelo, que bien pudieran ser aplicados a la investigación de zonas de carga y descarga de esfuerzos en sectores superficiales de zonas de falla.

Esta futura línea de investigación pretende corroborar estas observaciones, exportar y aplicar esta metodología a zonas de falla ligadas a sismicidad, capaces de generar terremotos destructivos. El reciente terremoto de Lorca (5.2 Mw) ofrece una gran oportunidad para el chequeo de esta técnica en fallas activas. El terremoto fue muy superficial (2 km) en el bloque levantado de la falla al Oeste de la Sierra de La Tercia (López Comino et al., 2012), provocando una deformación post-sísmica permanente del terreno del orden de los 3-4 cm evidenciada por análisis Din-Sar (Frontera et al, 2012) y GPS (Méndozza et al., 2012). Esta deformación es coherente con una superficie de ruptura inversa-oblicua de 8 km², sobre una longitud de falla de 4 km, una anchura de 2 km y un desplazamiento medio del orden de 13-14 cm según un azimut N245°E a lo largo del segmento central de la falla Lorca-Totana (Bufforn et al., 2012; Martínez-Díaz et al., 2012). Estos datos sugieren que la deformación, a pesar de no provocar la ruptura del terreno en superficie (IGME, 2011), alcanzó niveles muy superficiales, lo cual haría posible la detección de niveles de concentraciones o relajación de esfuerzos en el subsuelo cercano a lo largo de las zonas de límite de ruptura del terremoto de 2011. Los datos ya publicados por los autores mencionados, junto con la aplicación de métodos empíricos básicos (por ejemplo Wells y Coopersmith, 1994), hacen posible estimar los datos geométricos básicos de la zona de ruptura del terremoto de Lorca y localizar sus límites sobre el terreno. Ello permitirá la investigación de aquellos sectores de la falla donde se estima finalizó el proceso de ruptura y puedan encontrarse



anomalías de carga/descarga en la señal del potencial espontáneo sobre la traza de falla. La técnica irá complementada con la realización de tomografías eléctricas y/o electromagnéticas de la zona a investigar que permitan definir la geometría de la zona de falla en el subsuelo. La ventaja de la metodología a utilizar en estos trabajos de prospección, es que es relativamente sencilla, no invasiva en el terreno y de costes relativamente baratos de ejecutar cuando se dispone del equipamiento adecuado.

La intención de esta línea de investigación es comenzar con el estudio de la Falla de Lorca-Alhama de Murcia, ya que su historia sísmica demuestra que es capaz de recargarse en un lapso temporal breve de algunos meses o años, para dar lugar a otro terremoto de similares características, ya que no rompe en su totalidad durante una serie sísmica particular. La técnica se aplicará a otras zonas de falla conocidas ligadas a terremotos históricos y la investigación quedará enmarcada dentro de los trabajos del proyecto CGL2012-37281-C02.01 (QTECTBETICA) que actualmente se desarrolla en la Universidad de Salamanca y del que formo parte dentro del grupo de colaboradores.



CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA



ÍNDICE

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

1.- BIBLIOGRAFÍA



1.- BIBLIOGRAFÍA

Akersten, W. A. (1985). Canine function in Smilodon (Mammalia; Felidae; Machairodontinae). *Contributions in Science*, 356, 1-22.

Alberdi, M. (1971). Primer ejemplar completo de un *Tetralophodon longirostris* Kaup, 1835, encontrado en España. *Estudios Geológicos*, 27, 181-196.

Alcalá, L. (1994). *Macromamíferos neógenos de la fosa de Alfamba (Teruel)*. Instituto de Estudios Turolenses, Teruel. 554 pp.

Alcalá, L., Alonso Zarza, A. M., Álvarez Sierra, M. A., Azanza, B., Calvo, J.P., Cañaveras, J.P., van Dam, J.A., Garcés, M., Krijgsman, K., van der Meulen, A. J., Morales, J., Peláez-Campomanes, P., Pérez González, A., Sánchez Moral, S., Sancho, R. & Sanz Rubio, E. (2000). El registro sedimentario de las cuencas de Calatayud-Daroca y Teruel. Evolución paleoambiental y paleoclimática de la zona centro-nororiental de la Península Ibérica durante el Neógeno. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13, 323-343.

Alonso-Zarza, A.M., Calvo, J. P., Silva, P.G. & Torres, T. (2004). La Cuenca del Tajo. En: *Geología de España* (J.A.Vera, Ed.) Sociedad Geológica de España- IGME, Madrid, 555-561.

Álvarez Sierra, M. A., Calvo, J. P., Morales, J., Alonso-Zarza, A., Azanza, B., García Paredes, I., Hernández Fernández, M., van der Meulen, A. J., Peláez- Campomanes, P., Quiralte, V., Salesa, M.J., Sánchez, I. M. & Soria, D. (2003). El tránsito Aragoniense-Vallesiense en el área de Daroca-Nombrevilla (Zaragoza, España). *Coloquios de Paleontología*, volumen extraordinario, 1, 25-33.

Andrews, P. (1990). *Owls, Caves and Fossils*. Natural History Museum Publications, London.

Antón, M. & Morales, J. (2000). Inferencias paleoecológicas de la asociación de carnívoros del yacimiento de Cerro Batallones. *Arqueología, Paleontología y Etnografía*, 6, 190-201.

Antón, M., Salesa, M.J., Morales, J. & Turner, A. (2004). First known complete skulls of the scimitar-toothed cat *Machairodus aphanistus* (Felidae, Carnívora) from the Spanish late Miocene site of Batallones-1. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 24, 957-969

Antón, M., Salesa, M. J., Pastor, J.F., Sánchez, I. M., Fraile, S. & Morales, J. (2004b). Implications of the mastoid anatomy of larger extant felids for the evolution and predatory behavior of sabretoothed cats (Mammalia, Carnivora, Felidae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 140, 207-221.



Antón, M., Salesa, M. J., Pastor, J.F., M.J., Peigné, S & Morales, J. (2006). Implications of the functional anatomy of the hand and forearm of *Ailurus fulgens* (Carnivora, Ailuridae) for the evolution of the “false-thumb” in pandas. *Journal of Anatomy*, 209, 757-764.

Aracil, E. (1995). Testificación geofísica: Una herramienta para la inspección de sondeos hidrogeológicos. VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla.

Aracil, E. (2000). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Olmo, M. y López-Geta, J. A. (eds.). Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, IGME, Madrid, 49-59.

Aracil, E. (sin publicar). Registros geofísicos. Aspectos aplicados. Nuevas técnicas de construcción de pozos en terrenos no consolidados. Fermín Villarroya. Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español.

Astier, J.L. (1975). Geofísica aplicada a la hidrogeología, Paraninfo, Madrid.

Aubert, M., & Q. Ye´ne´ Atangana (1996). Self-potential method in hydrogeological exploration of volcanic areas, *Ground Water*, 34, 1010-1016.

Bailey, T. N. (1993). The African Leopard: Ecology and Behavior of a Solitary Felid. *Biology and Resource Management in the Tropics Series*. Columbia University Press. 429 pp.

Barnet Ct. (1984). Simple inversion of Time Domain Electromagnetic Data.(1984). *Geophysics*, 49, 925-933.

Baskin, J. A. (1998). Procyonidae. En *Evolution of Tertiary Mammals of North America, Volume 1: Terrestrial Carnivores, Ungulates, and Ungulatelike Mammals*. C. M. Janis, K. M. Scott & L. L. Jacobs (Eds.). Cambridge University Press, 144-151.

Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier, New York.

Beck, A. E. (1991). *Physical Principles of Exploration Methods*. (2ª ed.). Wuerz, Winnepeg.

Bengt, S. (1984). *Shallow Refraction Seismics*. Champman and Hall, Londres.

Benito, B., Rivas, A.; Gaspar-Escribano, J. M., Murphy, P. (2012). El terremoto de Lorca 2011 en el contexto de la peligrisidad y el riesgo sísmico en Murcia. *Física de la Tierra*, 24, 255-287.



Bertin. J & Loeb.J (1971). Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization. Geopexploration monographs Series 1 – No.7.

Bellanca, A., Calvo, J.P., Censi, P., Neri, R. & Pozo, M. (1992). Recognition of lake level changes in Miocene lacustrine units, Madrid Basin, Spain. Evidence from facies analysis, isotope geochemistry and clay mineralogy. *Sedimentary Geology*, 76, 135-153.

Bhattacharya, B.B. & Roy, N. (1981). A note on the use of a nomogram for self-potential anomalies, *Geophysical Prospecting*, Vol.29, 102-107.

Bininda-Emonds, O.R.P., Gittleman, J. L. & Purvis, A. (1999). Building large trees by combining phylogenetic information: a complete phylogeny of the extant Carnivora (Mammalia). *Biological Reviews* Volume 74, Issue 2, 143–175.

Birch, F. S. (1998). Imaging the water table by filtering self-potential profiles, *Ground Water*, 36, 779 – 782.

Blais, J.P. & Fry J.J. (2009). Detection of internal erosion and leakages in curative maintenance: methodology and comparison of the efficiency of different methods. European Working Group on Internal Erosion.

Blakely, R. J. (1995). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press. Cambridge.

Bogoslovsky, V.A., Ogilvy, A.-A. (1977). Geophysical methods in the investigation of landslides. *Geophysics*, 42, 562–571.

Brereton, N. R., McEwen, T. J. & Lee, M. K. (1987). Fluid flow in crystalline rocks: relationships between groundwater spring alignments and other surface lineations at Altnabreac, United Kingdom. *Journal of Geophysical Research*, 92 (B8), 7797-7806.

Bryan, R.B., Yair, A. (1982). *Badlands Geomorphology and Piping*. GeoBooks, Norwich. 408 pp.

Bryan, R.B. & Jones, A.A. (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20, 209-218.



Bufo, E., Pro, C., Cesca, S., Sanz de Galdeano, C., Udías, A. (2012). Proceso de ruptura del sismo de Lorca de 11 mayo 2011. *Física de la Tierra*, 24, 71-82.

Bullen, K. E. (1985). *An introduction to the theory of seismology*. (3ª ed.). Cambridge University Press, Nueva York.

Calvo, J.P., Pozo, M., Silva, P.G., Morales, J. (2013). Pattern of sedimentary infilling of fossil mammal traps formed in pseudokarst at Cerro de los Batallones, Madrid Basin, central Spain. *Sedimentology*. doi: 10.1111/sed.12048

Calvo, J.P., Pozo, M., Silva, P.G., Morales, J., Carrasco García, P. (2012). Organización del relleno sedimentario en los yacimientos de mamíferos del Cerro de los Batallones, Cuenca de Madrid. *Geotemas*, 8, III Congreso Geológico de España, Oviedo 2012.

Calvo, J.P., Pozo, M & Jones, B.F. (1995). Preliminary report of seepage mound occurrences in Spain. Comparison with carbonate mounds from the Amargosa Desert, western USA. *Geogaceta* 18, 67-70.

Campbell, D.L., Fitterman, D.V. (2000). Geoelectrical methods for investigating mine dumps. *Proceedings from the fifth international conference on acid rock drainage (ICARD)*, Denver.

Cantos Figuerola, J. (1987). *Tratado de prospección geofísica aplicada*. (3ª ed.). Escuela de Minas, Madrid.

Calvo, J.P., Pozo, M., & Servant- Vildary, S. (1988). Lacustrine diatomite deposits in the Madrid Basin (Central Spain). *Geogaceta*, 4, 14-17.

Cañaveras, J.C., Calvo, J.P., Hoyos, M., Ordóñez, S. (1996). Paleomorphologic features of a intra-Vallesian paleokarst, Tertiary Madrid Basin. Significance of paleokarstic surfaces in continental Basin analysis. En: *Tertiary Iberian Basins*. P.Friend and C.J. Dabrio (eds.). Cambridge University Press, 278-284.

Cerdeño, E. & Sánchez, B. (1998). *Aceratherium incisivum* (Rhinocerotidae) en el Mioceno superior de Cerro de los Batallones (Madrid). *Revista Española de Paleontología*, 13, 51-60.

Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., & Hollands, J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71, B231–B239.



Che (1999). “Delimitación de Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Ebro”. Consulting: INTECSA. <http://oph.chebro.es/documentacion/masasagua/subterranas/masasaguasubterra.htm>.

Chouteau, M. Zhang, P. & Chapellier, D. (1996). Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering. *Geophysical Prospecting*, 44, 215-232.

Christensen N.B, Sørensen K.I. (1998). Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeophysical investigations. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, 75-90.

Clark, T. W., Anderson, E., Douglas, C. & Strickland, M. (1987). *Martes americana*. *Mammalian Species*, 289, 1-8.

Corwin, R. F. (1989). Data quality for engineering self-potential surveys, in *Proceedings, International Symposium on the detection of subsurface flow phenomena, Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer-Verlag, Berlin, 51-72.

Colangelo G. et al (2006). 2D Self-Potential tomographies for studying groundwater flows in the Varco d'Izzo landslide (Basilicata, southern Italy). *Engineering Geology* 88, 274–286.

Colella, A et al. (2004). High-resolution imaging of the High Agri Valley Basin (Southern Italy) with electrical resistivity tomography. *Tectonophysics*, 386, 29–40.

Corwin, R. F., & Morrison H. F. (1977), Self-potential variations preceding earthquakes in Central California, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 171 – 174.

Dahlin, T. & Bernstone, C. (1997). A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, *Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems)*, Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.

Dahlin, T & Loke, M.H. (1998). Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of Applied Geophysics*, 38, 237-249.

Daniels, F. & Alberty, R.A. (1966). *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc, London.



Danielsen, J. E., Auken, E., Jorgensen, F., Sondergaard, V., & Sorensen, K.I. (2003). the application of the transient Electromagnetic method in hydrogeophysical surveys, nota técnica publicada en la revista de aplicaciones geofísicas, 22 pp.

Darnet, M., Marquis, G., & Sailhac, P. (2003). Estimating aquifer hydraulic properties from the inversion of surface Streaming Potential (SP) anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 30(13), 1679, doi:10.1029/2003GL017631.

DeMiguel, D., Fortelius, M., Azanza, B. & Morales, J. (2008). Ancestral feeding state of ruminants reconsidered: earliest grazing adaptation claims a mixed condition for Cervidae *BMC Evolutionary Biology*, aceptado en prensa

Dey, A. & Morrison, H.F., (1979a). Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 1020-1036.

Dey, A. & Morrison, H.F., (1979b). Resistivity modelling for arbitrary shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, 44, 753-780.

DGA (2005). “Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las Cuencas Intercomunitarias”.

Dobrin, M. B. & Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*, 4th ed., McGraw-Hill, Singapore.

Domingo, M.S., Alberdi, M.T., Azanza, B., Silva, P.G., Morales, J. (2013). Origin of an Assemblage Massively Dominated by Carnivorans from the Miocene of Spain. *PLoS ONE* 8(5): e63046. doi:10.1371/journal.pone.0063046.

Domingo, M. S., Alberdi, M. T. & Azanza, B. (2007a). A new quantitative biochronological ordination for the Upper Neogene mammalian localities of Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 255, 361-376.

Domingo, M.S., Martín Escorza, C. & Morales, J. (2006). Nuevos datos sobre la estructura interna del yacimiento vallesiense de Batallones-1 (Madrid, España). *Estudios Geológicos*, 62, 65-72.



Domingo, M. S., Sánchez, I. M., Morales, J. & Alberdi, M. T. (2007b). Miocene prey and predators: diversity of the Moschidae (Ruminantia; Pecora) from the carnivore-trap site of Batallones-1 (Late Vallesian; MN 10; Madrid Basin; Spain) and evidence of carnivore trophic activity on moschids. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 27, 69A.

Durant, S. M. (2000). Predator avoidance, breeding experience and reproductive success in endangered cheetahs, *Acinonyx jubatus*. *Animal behaviour*, 60, 121-130.

Eccles, D., Sammonds, P.R. & Clint, O.C. (2005). Laboratory studies of electrical potential during rock failure, *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 933-949.

Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

Eisenberg, J. (1981). *The Mammalian Radiation*. University of Chicago Press, Chicago. 610 pp.

Emerson, S. B. & Radinsky, L. (1980). Functional analysis of sabertooth cranial morphology. *Paleobiology*, 6, 295-312.

Fitterman DV, Stewart MT. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, 51, 995 - 1005.

Flynn, J. J. & Nedbal, M. A. (1998). Phylogeny of the Carnivora (Mammalia): congruence vs incompatibility among multiple data sets. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 9, 414-426.

Flynn, J. J., Nedbal, M. A., Dragoo, J. W. & Honeycutt, R. L. (2000). Whence the Red Panda? *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 17, 190-199.

Flynn, J. J., Finarelli, J. A., Zehr, S., Hsu, J. & Nedbal, M. A. (2005). Molecular Phylogeny of the Carnivora (Mammalia): Assessing the Impact of Increased Sampling on Resolving Enigmatic Relationships. *Systematic Biology*, 54, 317-337.

Fournier, C.(1989). Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area : Case history of the Chaine des Puys (Puy de Dôme), France. *Geophysical prospecting*, 37, 647-668.

Frangos, W. (1994). Electrical detection and monitoring of leaks in lined waste disposal ponds. *SAGEEP. Geophysics*, 62, 1737-1744.



Fraile, S., Pesquero, M. D., García Somoza, P., & Morales, J. (2003). El Cerro de los Batallones: un caso práctico de actuación paleontológica de carácter preventivo. *Coloquios de Paleontología*, volumen extraordinario, 1, 163-169.

Frischia, A.R., Van Valkenburgh, B., Spencer, L. & Harris, J. (2008). Chronology and spatial distribution of large mammal bones in Pit 91, Rancho La Brea. *Palaios*, 23, 35-42.

Frontera, T., Blanco, P., Concha, A., Goula, X., Pérez Aragüés, F. (2012). Medidas de deformaciones cosísmicas con DInSAR para el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. *Física de la Tierra*, 24, 151-169.

Gallipoli, M., Lapenna, V., Lorenzo, P., Mucciarelli, M., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F. (2000). Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 117-128.

Garcés, W., Krijgsman, M., Peláez- Campomanes, P., Álvarez Sierra, M. A. & Daams, R. (2003). Hipparion dispersal in Europe: magnetostratigraphic constraints from the Daroca area (Spain). *Coloquios de Paleontología*, volumen extraordinario, 1, 171-178.

Gentry, A. W., Rössner, G. E., & Heizmann, E. P J. (1999). Suborder Ruminantia. En *The Miocene Land Mammals of Europe*. G. E. R. Rössner and K. Heisig (eds), Verlag Dr. Friedrich Pfeil. München, 225-253.

Ginsburg, L. (1999). Carnivora. En *The Miocene Land Mammals of Europe*. G. E. R. Rössner and K. Heisig (eds), Verlag Dr. Friedrich Pfeil. München, 109-148.

Glynn O. Cress, B. T. Brady, Glen A. Rowell. (1987). Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory, *Geophysical Research Letters*, 14, 4.

Göhlich, U. (1999). Order Proboscidea. En *The Miocene Land Mammals of Europe*. G. E. R. Rössner and K. Heisig (eds), Verlag Dr. Friedrich Pfeil. München, 157-168.

Gonyea W. J. (1976). Behavioral implications of saber-toothed felid morphology. *Paleobiology*, 2, 232-342.

Griffiths, D.H. & Turnbull, J. (1985). A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3 (No. 7), 16-20.



Griffiths, D.H., Turnbull, J. & Olayinka, A.I. (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break*, 8, 121-129.

Griffiths, D.H. & Barker, R.D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.

Groot-Hedlin, C. & Constable, S.C. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.

Gutiérrez Elorza, M. (2001). *Geomorfología Climática*. Ed. Omega, Barcelona, 642 pp.

Halliday, W.R. (2004). Pseudokarst. En: *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. J. Gunn (Ed.). Routledge. 960 pp.

Hanby, J. P. & Bygott, J. D. (1979). Population Changes in Lions and Other Predators. En *Serengeti, Dynamics of an Ecosystem*. A. R. E. Sinclair & M. Norton- Griffiths (Eds.) University of Chicago Press, 248-262.

Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics* 21, 423–448.

Hjelt, S. E., Kaikkonen, P. & Pietilä, R. (1985). On the interpretation of VLF resistivity measurements. *Geoexplorations*, 23, 171-181.

Hoek Ostende L. W. van den & Furió M. (2005). Spain. En *The fossil record of the Eurasian Neogene insectivores (Erinaceomorpha, Soricomorpha, Mammalia, Part I. Spain)*. Hoek Ostende L.W. van den, Doukas C. S. & Reumer, J. W F. (Eds.) *Scripta Geologica Special issue*, 5, 148-284.

Iakubovskii, I.U. V., Liajov, L.L. (1980). *Exploración eléctrica*. Ed. Reverté, Barcelona.

IGME (1970). “Mapa geológico E. 1:200.000. Hoja 23 (Huesca)”.

IGME Zaragoza (2007). “Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica de la cuenca del Ebro”.

IGME (2011). Informe geológico preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 Mw 5.1. IGME, Madrid (Spain). 47 pp.



IGN (2012). Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011. IGN, Madrid (Spain). 129 pp.

Janis, C.M. (1984). Tragulids as living fossils. En Living Fossils. Eldredge N, Stanley SM, eds. New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo. Casebooks in Earth sciences, 87-94.

Joakim, A. (2003). "Integrated interpretation of transient electromagnetic and seismic data", Universidad de Aarhus, Dinamarca.

Jouniaux, L., & Pozzi, J.P. (1995). Streaming potential and permeability of saturated sandstones under triaxial stress: consequences for electrotelluric anomalies prior to earthquakes, J. Geophys. Res., 100(B6), 10,197-209.

Julivert, M. (1967). La ventana de río Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga. Trabajos de Geología. Univ. De Oviedo, 1, 59-76.

Kaikkonen, P. & Sharma, S. S. (1997). Delineation of near-surface structures using VLF and VLF-R data - An insight from the joint inversion results. The Leading Edge, 16, 1683-1686.

Kaufman, A.A & Keller, V.G. (1983). Frequency and transient sounding. Elsevier Publishing Comp, Amsterdam.

Keller, G.V & Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.

Kelly, W.E., Mares, S. (1993). Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice. Elsevier. Developments in Water Science n° 44, Elsevier, Amsterdam.

Kearey, P. & Brooks, M. (1991). An introduction to Geophysical Exploration, second edition, Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Kirsch, R. (2006). "Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology," Springer, New York.

Klein, R. G. & Cruz-Urbe, K. (1984). The analysis of animal Bones from Archaeological Sites. The University of Chicago Press, Chicago. 266 pp.

Klimchouck, A. B & Andrejchuk, V. N. (2003). Speleogenesis, and evolution of karst aquifers. The Virtual Scientific Journal, 19 pp.



Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Leguey, S., Pozo, M. & Medina, J.A. (1985). Polygenesis of sepiolite and palygorskite in a fluvial-lacustrine environment in the Neogene Basin of Madrid. *Mineralogica et Petrographica Acta*, 29 A, 287-301.

Li, Y. & Oldenburg, D.W. (1992). Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*, 109, 343-362.

López-Comino, J.A., Mancilla, F., Morales, J., Stich, D. (2012). Rupture Directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca Earthquake (Spain). *Geophys. Res. Lett.*, 39, L03301.

Loke, M.H. & Barker, R.D. (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Loke, M.H. & Barker, R.D.,(1996b). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.

Loke, M.H. (1999). Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Eml.

Loke, M.H. (2000). Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.

Loke, M.H. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. University of Birmingham.

Loke, M.H. (2002). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.

Loke, M.H. & Dahlin, T. (2002). A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162.

Lorne, B., Perrier, F, & avouac J.P. (1999). Streaming potential measurements: 2. Relationship between electrical and hydraulic flow patterns from rock samples during deformation, *J. Geophys. Res.*, 104, 17879-17896.



Lyman, R.E. (1994). *Vertebrate Taphonomy*. Cambridge Manuals in Archaeology. Cambridge University Press, Cambridge. Martín Escorza, C. & Morales, J. (2006). Estructura interna del yacimiento mioceno de Batallones (Madrid). XVI Biental de la Real Sociedad de Historia Natural. Teruel. Comunicación.

MARM-IGME (2010). “Encomienda de Gestión para la realización de trabajos científicotécnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas”.

Marshall, D.J. & Madden, T.R. (1959). Induced-polarization a study its causes: *Geophysics*, 24, 790-816

Martínez-Díaz, J.J., Bejar, M., Álvarez-Gómez, J.A., Mancilla, F., Stich, D., Herrera, G., Morales, J. (2012). Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture. The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake. *Tectonophysics*, 546-547, 28-37.

Martínez-Pagán, P., Aracil Ávila, E., Faz Cano, A. (2004). Técnicas geoelectricas para la detección y monitorización de filtraciones en embalses. En: *Ingeopres*. Madrid: Entorno Gráfico, 133, 28-30.

Mazàc, O., Benes, L., Landa, I. and Skuthan, B. (1990). Geoelectrical detection of sealing foil quality in light-ash dumps. *Investigations in geophysics n° 5*. SEG.

McGillivray, P.R. & Oldenburg, D.W. (1990). Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem : A comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.

McNeill, J. D. (1980a). Applications of transient electromagnetic technics. Technical Note TN-7, Geonics Ltd., Mississauga, Ontario, Canada, 17pp.

Meju, M.A. (2000). Geoelectrical investigation on old/abandoned, covered landfill sites in urban areas. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 115-150

Mein, P., & Martín-Suárez, E. (1993). *Galerix iberica* sp. nov. (Erinaceidae, Insectivora, Mammalia) from the Late Miocene and Early Pliocene of the Iberian Peninsula. *Geobios*, 26, 723-730.

Mendoza, L., Kehm, A., Koppert, A., Martín Dávila, J., Gárate, J. Becker, M. (2012). The Lorca Earthquake observed by GPS: a Test Case for GPS Seismology. *Física de la Tierra*, 24, 129-150.



Merino, L. & Morales, J. (2006). Mineralogía y geoquímica del esqueleto de los mastodontes de los yacimientos Batallones- 1, 2 y 5. Implicaciones tafonómicas. *Estudios Geológicos*, 62, 53-64.

Merino, L. & Morales, J. (2008). Relación del índice de cristalinidad (IC) con la edad y el contenido de iones F y CO₃ en muestras de vertebrados fósiles. *Estudios Geológicos*, 64, 00-00

Métais, G., Chaimanee, Y., Jaeger, J-J. & Ducrocq, S. (2001). New remains of primitive ruminants from Thailand: evidence of the early evolution of the Ruminantia in Asia. *Zoologica Scripta*, 30, 231-248.

Métais, G., Chaimanee, Y., Jaeger, J-J. & Ducrocq, S. (2007). Eocene bunoselenodont Artiodactyla from southern Thailand and the early evolution of Ruminantia in South Asia. *Naturwissenschaften*, 94, 493-498.

Moore, J.R., & Glaser, S.D. (2005). Self potential observations during hydraulic fracturing in the laboratory, Proceedings, 40th U.S. Rock Mechanics Symposium, Anchorage Alaska.

Morales, J. (2004). El yacimiento paleontológico del Cerro de los Batallones (Torrejón de Velasco, Madrid). J. L. Sanz (Coordinador). Aportaciones recientes en el conocimiento de la historia de la vida. Fundación de Cultura Ciudad de Cuenca, 245-277.

Morales, J., Alcalá, L., Álvarez- Sierra, M.A., Antón, M., M.A., Azanza, B., Calvo, J.P., Carrasco, P., Fraile, S., García-Paredes, I., Gómez, E., Hernández-Fernández, M., Merino, L., van der Meulen, Martín-Escorza, C., A., Montoya, P., Nieto, M., Peigné, S., Pérez, B., Peláez-Campomanes, P., Pozo, M., Quiralte, V., Salesa, M.J., Sánchez, I.M., Sánchez-Marco, A., J.P., Silva, P.G., Soria, D. & Turner, A. (2004). Paleontología del sistema de yacimientos de mamíferos miocenos del Cerro de los Batallones, Cuenca de Madrid. *Geogaceta*, 35, 139-142

Morales, J., Alcalá, L. & Nieto, M. (1993). Las faunas de vertebrados del Terciario. En "Madrid antes del Hombre". Ed. J. Morales. CSIC-Comunidad de Madrid

Morales, J., Alcalá, L., Amezua, L., Antón, M., Fraile, S., Gómez, E., Montoya, P., Nieto, M., Pérez, B., Salesa, M. J. & Sánchez, I. (2000). El yacimiento del Cerro de los Batallones. En *Patrimonio Paleontológico de la Comunidad de Madrid*. Eds.

Morales, J., Nieto, M., Amezua, L., Fraile, S., Herráez, E., Peláez- Campomanes, P., Salesa, M.J., Sánchez, I.M. & Soria, D. (2003). *Arqueología, Paleontología y Etnografía*, 6, 179-190.



Morales, J., Antón, M & Salesa, M.J. (2006). Batallones: un tesoro paleontológico en el sur de Madrid. *Quercus*, 250, 31-36.

Morales, J., Capitán, J. & Calvo, J.P. (1995). El Cerro de los Batallones (Torrejón de Velasco, Madrid). Uno de los yacimientos más extraordinarios del Terciario de España. *Tierra y Tecnología*, 11, 43-48.

Morales, J., Capitán, J., Calvo, J.P. & Sesé, C. (1992). Nuevo yacimiento de vertebrados del Mioceno superior al sur de Madrid (Cerro Batallones, Torrejón de Velasco). *Geogaceta*, 12, 77-80.

Morales, J. & Soria, D. (2000). Importancia y futuro del yacimiento de Cerro de los Batallones. *Arqueología, paleontología y etnografía*, 6, 1131-6241.

Morse, D. H. (1974). Niche breadth as a function of social dominance. *American Naturalist*, 108, 808-830.

Nabighian M.N., Macnae J.C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Nabighian MN (Ed.) Society of Exploration Geophysicists, 811-879.

Nowak, R. M. (1999). *Walker's Mammals of the World, Sixth Edition. Volume II* The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London.

Núñez, R., Miller, B. & Lindzey, F. (2000). Food habits of jaguars and pumas in Jalisco, Mexico. *Journal of Zoology*, 252, 373-379

Ogilvy, A.A., M.A. Ayed, & V.A. Bogoslovsky (1969). Geophysical Studies of water leakages from reservoirs. *Geophysics*, 17, 36-62.

Ogilvy, R. D., & Lee, A. C. (1991). Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosections. *Geophysical Prospecting*, 39, 567-580.

Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Paraninfo, Madrid.

Parasnes D.S. (1971). *Geofísica Minera*. De. Paraninfo, Madrid.



Parasnis, D.S. (1973). *Mining Geophysics*: Elsevier, New York.

Paterson, N. R., & Ronka, V. (1971). Five years of surveying with the very low frequency electromagnetic method: *Geoexploration*, 9, 7-26.

Pazdirek, O. & Blaha, V. (1996). Examples of resistivity imaging using ME-I00 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts. Amsterdam.

Peigné, S., Salesa, M. J., Antón, M., & Morales, J. (2005). Ailurid carnivoran mammal *Simocyon* from the late Miocene of Spain and the systematics of the genus. *Acta Paleontologica Polonica*, 50, 219-238.

Peigné, S., Salesa, M. J., Antón, M. & Morales, J. (2008). A new Amphicyonine (Carnivora: Amphicyonidae) from the Late Miocene of Batallones-1 (Madrid, Spain). *Paleontology*. Aceptado-en prensa
Pesquero, M. D. 2006. *Tafonomía del yacimiento de vertebrados miocenos de Cerro de la Garita (Concud, Teruel)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
Powell, R. A. 1981. *Martes pennanti*. *Mammalian Species*, 156, 1-6.

Pérez – Estaún, A., Bastida, F., Alonso, J.L., Marquínez, J., Aller, J., Álvarez-Marrón, J., Marcos, A. & Pulgar, J.A. (1988). A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust Belt: The Cantabrian Zone (Variscan Ibero-American Arc). *Tectonics*, 7, 17-537.

Porsani, JI et al (2012). TDEM survey in an area of seismicity induced by water wells in Paraná sedimentary basin, Northern São Paulo State, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 82, 75-8.

Pozo, M. & Calvo, J.P. (2004). Mineralogía y geoquímica isotópica de facies carbonáticas del cerro de los Batallones (Cuenca de Madrid). *Implicaciones paleoambientales*. *MACLA*, 2, 31-32.

Pozo, M. & Casas, J. (1999). Origin of kerolite and associated magnesium clays in palustrine-lacustrine environments. The Esquivias Deposit (Neogene Madrid Basin, Spain). *Clay Minerals*, 34, 395- 418.

Pozo, M. & López, M.J. (2004). Facies biosilíceas en el Neógeno de la Cuenca de Madrid. Origen e implicaciones sedimentológicas. *Revista de la Sociedad Española de Geología*, 17, 229-248.



Pozo, M., Carretero, M.I. & Galán, E. (2005b). Variabilidad geoquímica en las facies sepiolíticas de la Cuenca de Madrid. *MACLA*, 3, 161-163.

Pozo, M., Medina, J.A & Leguey, S. (1985). Mineralogénesis de palygorskita en la zona central de la Cuenca de Madrid. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 8, 271-283.

Pozo, M., Calvo, J.P., Casas, J. & Medina, J.A. (2003a). Sepiolite paleosoils, paleovertisols and lacustrine deposits- an integrated approach to the formation of mammal traps, Cerro de Batallones, Madrid Basin, Spain. 22nd IAS Meeting of Sedimentology-Opatija, Abstracts, 162.

Pozo, M., Casas, J., Medina, J. A. & Calvo, J.P. (2007a). Origin of mineralogical assemblages and textures in the Batallones butte sepiolite deposit (Neogene Madrid Basin, Spain). *Euroclay 2007. Abstract Book*. Aveiro, Portugal. 143 pp.

Pozo, M., Casas, J., Medina, J. A. & Calvo, J.P. (2007b). Estudio mineralógico del tránsito de facies sepiolíticas a carbonáticas en el Cerro de los Batallones (Cuenca de Madrid). *MACLA*, 7, 97 pp.

Pozo, M., Casas, J., Calvo, J.P., Medina, J.A. & Martín Rubí, J.A. (2003c). Caracterización y origen de paleosuelos sepiolíticos condensados (Cerro de los Batallones. Mioceno, Cuenca de Madrid). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 26-A, 47-48.

Pozo, M., Casas, J., Medina, J.A, Calvo, J.P. & Silva, P.G. (2006). Caracterización de depósitos carbonáticos ligados a paleosurgencias en el sector de Batallones- Malcovadeso (Neógeno de la cuenca de Madrid). *Estudios Geológicos*, 62, 73-88.

Pozo, M., Calvo, J.P., Casas, J., Medina, J.A., Silva, P.G., & Morales, J. (2005a). Caracterización de formaciones carbonáticas travertínicas asociadas a facies detríticas del sector de Batallones-Malcovadeso (Cuenca de Madrid). *MACLA*, 3, 165-166.

Pozo, M., Calvo, J.P., Morales, J., Silva, P., Peláez-Campomanes, P., & Nieto, M. (2003b). The Cerro de Batallones site: a case study for mammals trap lakes. III Limnogeological International Congress, Abstract Volume, Tucson, Arizona. 220-221.

Pozo, M., Calvo, J.P., Silva, P.G., Morales, J., Peláez-Campomanes, P & Nieto, M. (2004). Geología del sistema de yacimientos de mamíferos miocenos del Cerro de los Batallones, Cuenca de Madrid *Geogaceta*, 35, 143-146.



Rabinowitz, A. R. & Nottingham, B.G. (1986). Ecology and behaviour of the Jaguar (*Panthera onca*) in Belize, Central America. *Journal of Zoology*, 210, 149-159.

Ram Babu, H.V. & Atchuta Rao, D. (1988). A rapida graphical method for the interpretation of the self-potential anomaly over a two-dimensional inclined sheet of finite depth extent. *Geophysics*, 53, 1126-1128.

Randall-Roberts, J.A.(1989). Calculo de profundidad de acuíferos por análisis de curvas de potencial espontáneo, *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, 9, 283- 291.

Randall-Roberts, J.A.(1996). Potencial espontáneo (P.E.) en exploración para agua subterránea, *ALHSUD,3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea,S.L.P. México*. 5 pp.

Rawn-Schatzinger, V. (1992). The scimitar cat *Homotherium serum* Cope. *Illinois State Museum Reports of Investigation*, 47, 1-80.

Ray, J. C. (1995). *Civettictis civetta*. *Mammalian Species*, 488, 1-7.

Revil, A., Ehouarne, L., & Thyreault, E. (2001), Tomography of self-potential anomalies of electrochemical nature, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4363 – 4366.

Revil, A., Hermitte, D., Voltz, M., Moussa, R., Lacas, J.G., Bourrié, G., Trolard, F. (2002). Self-Potential signals associated with variations of the hydraulic head during an infiltration experiment. *Geophysical Research Letters* 29, 1106 pp.

Reynolds, J.M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley.

Rhoades, J. D., Raats, P. A. C. & Prather, R. J. (1976). Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 651-655.

Roberts, M. S. & Gittleman, J. L. 1984. *Ailurus fulgens*. *Mammalian Species*, 222, 1-8.

Rosqvist, H., Dahlin, T., Fourie, A., Röhrs, L., Bengtssons, A. & Larsson, M. (2003). Mapping of eachate plumes at two landfill sites in South Africa using geoelectrical imaging techniques, *Procs. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy*.10p.



Salesa, M.J. (2002). Estudio Anatómico, Biomecánico, Paleoecológico y Filogenético de *Paramachairodus ogygia* (Kaup, 1832) Pilgrim, 1913 (Felidae, Machairodontinae) del yacimiento vallesiense (Mioceno superior) de Batallones-1 (Torrejón de Velasco, Madrid). Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 1-370.

Salesa, M. J. & Fraile, S. (2000). Los carnívoros fósiles del Neógeno madrileño. En *Patrimonio Paleontológico de la Comunidad de Madrid*. Eds. J. Morales, M. Nieto, L. Amezua, S. Fraile, E. Herráez, P. Peláez-Campomanes, M.J. Salesa, I.M. Sánchez y D. Soria. *Arqueología, Paleontología y Etnografía*, 6, 248-255.

Salesa, M. J., Antón, M., Peigné, S. & Morales, J. (2005a). Primera evidencia de “falso pulgar” en el registro fósil: *Simocyon batalleri* (Carnivora, Ailuridae) y la evolución de los pandas. XXI Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología. Sevilla. Comunicación.

Salesa, M.J., Antón, M., Peigné, S. & Morales, J. (2006b). Evidence of a false thumb in a fossil carnivore clarifies the evolution of pandas. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 103, 379-382.

Salesa, M.J., Antón, M., Peigné, S. & Morales, J. (2006c). Paleoecología y anatomía funcional de *Simocyon batalleri* (Viret, 1929) (Carnivora, Ailuridae) del Mioceno superior de Batallones-1. En Fernández Martínez, E (Ed.) *Libro de Resúmenes – XXII Jornadas de Paleontología*, 82-82.

Salesa, M. J., Antón, M., Peigné, S. & Morales, J. (2008). Functional anatomy and biomechanics of the postcranial skeleton of *Simocyon batalleri* (Viret, 1929) (Carnivora, Ailuridae) from the late Miocene of Spain. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 152, 00-00.

Salesa, M. J., Antón, M., Turner, A. & Morales, J. (2004). Anatomía funcional del complejo cráneo-cervical de *Paramachairodus ogygia* (Kaup, 1832) (Felidae, Machairodontinae): el origen de las adaptaciones macairodontinas”. XX Jornadas de Paleontología de la Sociedad Española de Paleontología. Alcalá de Henares. Comunicación.

Salesa, M. J., Antón, M., Turner, A & Morales, J. (2005b). Aspects of the functional morphology in the cranial and cervical skeleton of the sabre-toothed cat *Paramachairodus ogygia* (Kaup, 1832) (Felidae, Machairodontina) from the Late miocene of Spain: Implications for the origins of the machairodont killing bite. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 144, 363-377.

Salesa, M. J., Antón, M., Turner, A. & Morales, J. (2005c). Aproximación a la Paleobiología de *Paramachairodus ogygia* (Felidae, Machairodontinae): inferencias etológicas y ecológicas a partir de la población de Batallones-1 (MN 10, Madrid)” XXI Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología. Sevilla. Comunicación.



Salesa, M. J., Antón, M., Turner, A. & Morales, J. (2006a). Inferred behaviour and ecology of the primitive sabre-toothed cat *Paramachairodus ogygia* (Felidae machairodontinae) from the Late Miocene of Spain. *Journal of Zoology*, 268, 243-254.

Salesa, M. J., Montoya, P., Alcalá, L. & Morales, J. (2003). El género *Paramachairodus* Pilgrim, 1913 (Felidae, Machairodontinae) en el Mioceno superior español. *Coloquios de Paleontología*, volumen extraordinario, 1, 603-615.

Sánchez I. M. (2006). Evolución y sistemática de los Moschidae (Mammalia; Artiodactyla) del Mioceno medio y superior de España. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1-513.

Sánchez, I. M. & Morales, J. (2004). Los rumiantes inermes (Artiodactyla, Mammalia) de la Comunidad de Madrid. *Zona Arqueológica*, 4, 518-524

Sánchez, I.M. & Morales, J. (2005). Distribución Estratigráfica y Geográfica de Moschidae (Mammalia; Artiodactyla). XXI Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología. Sevilla. Comunicación.

Sánchez, I.M. & Morales, J. (2006). Distribución biocronológica de los Moschidae (Mammalia, Ruminantia) de España. *Estudios Geológicos*, 62, 553-546.

Sánchez, B. & Cerdeño, E. (2000). Los rinocerontes fósiles de la Comunidad de Madrid. En *Patrimonio Paleontológico de la Comunidad de Madrid*. Eds. J. Morales, M. Nieto, L. Amezua, S. Fraile, E. Herráez, P. Peláez-Campomanes, M.J. Salesa, I.M. Sánchez y D. Soria. *Arqueología, Paleontología y Etnografía*, 6, 270- 274.

Sánchez-Marco, A. (2000). Aves fósiles de Madrid. En *Patrimonio Paleontológico de la Comunidad de Madrid*. Eds. J.Morales, M. Nieto, L. Amezua, S. Fraile, F.Herráez, P. Peláez-Campomanes, M.J. Salesa, I.M. Sánchez y D. Soria. *Arqueología, Paleontología y Etnografía*, 6, 247- 248.

Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.

Saydam, A. S., (1981). Very low-frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements. *Geophysics*, 46, 1594-1605.



Scott, K.M. & Janis, C. M. (1993). Relationships of the Ruminantia (Artiodactyla) and an analysis of the characters used in ruminant taxonomy. In *Mammal Phylogeny: Placentals*: Szalay FS, Novacek MJ, McKenna MC, eds. Springer Verlag, New York, 282-302.

Seidensticker, J. (1976). On the Ecological Separation between Tigers and Leopards. *Biotropica*, 8, 225-234

Seigel, H. O., (1959), Mathematical formulation and type curves for induced polarization: *Geophysics*, 24, 547–565.

Semenov, A.S. (1948). The theory of the method based on charge bodies applied to equipotential conductors [in Russian]: *Vses. Nauchno-Issled. Geol.Inst.Geofiz*, 13, 3-56.

Sill, W. R. (1983), SP modelling from primary flows, *Geophysics*, 48, 76-86.

Silva, P.G., Morales, J., Pozo, M., Calvo, J.P. & Peláez-Campomanes, P. (2004). Itinerarios geomorfológicos por Castilla – La Mancha. (En A. Pérez González, et al. coord.).SEG-CSIC., Toledo, 13-48.

Simms, M.J. (1994). Emplacement and preservation of vertebrates in caves and fissures. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 112, 261-283.

Simon-Coinçon, R., Thiry, M. & Scmitt, J.M. (1997). Variety and relationships of weathering feactures along the early Tertiary paleosurface in the southwestern French Massif Central and the nearby Aquitaine Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 51- 79.

Sheriff, R. E. (1989). *Geophysical Methods*, first edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Silvester P.P. & Ferrari R.L. (1990). *Finite elements for electrical engineers* (2nd. ed.) . Cambridge University Press, New York.

Smith et. al., (1994). An automatic technique for presentation of coincident-loop, impulse-response, transient electromagnetic data: *Geophysics*, 59, 1542-1550.

Soto, R y Casas, A.M. (2001), “Geometría y cinemática de las estructuras Norte-Sur de la cuenca de Aínsa”. *Rev. Soc. Geol. España*, 14, 3-4.



Spencer, L.M., Van Valkenburgh, B. & Harris, J.M. (2003). Taphonomic analysis of large mammals recovered from the Pleistocene Rancho La Brea tar seeps. *Paleobiology*, 29, 561-575.

Stock, C. & Harris, J.M., (1992). Rancho La Brea: A Record of Pleistocene Life in California, Science Series 37: Natural History Museum of Los Angeles County, Los Angeles. Tru ment geochemistry and taphonomy of terrestrial vertebrate assemblages. *Palaios*, 14, 555-568.

Tamburriello, G et al. (2008). Deep electrical resistivity tomography and geothermal analysis of Bradano foredeep deposits in Venosa area (Southern Italy): preliminary results. *Annals of geophysics*, 51, 1 pp

Teixell, A y Barnolas, A (1995): “Significado de la discordancia de Mediano en relación con las estructuras adyacentes (Eoceno, Pirineo central)”. *Geogaceta*, 18.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., (1990), *Applied Geophysics*, 2ª ed., Cambridge University Press, New York.

Trueman, C.N., Behrensmeyer, A.K., Tuross, N. & Weiner, S. (2004). Mineralogical and compositional changes in bones exposed on soil surfaces in Amboseli National Park, Kenya: diagenetic mechanisms and the role of sediment pore fluids. *Journal of Archaeological Science*, 31, 721-739.

Twidale, C.R. (1987). Sinkholes (Dolines) in lateritised sediment western Sturt Plateau, Northern Territory, Australia. *Geomorphology*, 1, 33-52.

Twidale, C.R. (2002). The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: or development and implications of an idea. *Earth-Science Reviews*, 57, 37-74.

Vegas, R., Míguez, F. & Pérez González, K. (1975). Cartografía y memoria geológica de la hoja de Getafe (19- 23). Mapa Geológico de España escala 1:50.000 2ª Serie (MAGNA). IGME. Serv. Pub. Mº Industria, Madrid.

Ward, S.H. (1990). *Geotechnical and environmental geophysics*. SEG, Tulsa.

Warwick, J.W., Stoker, C., Meyer, T.R. (1982). Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978–2012.



Wang, X. (1997). New cranial material of Simocyon from China, and its implications for phylogenetic relationship to the red panda (*Ailurus*). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 17:, 184-198

Webb, S. D. & Taylor, B.E. (1980). The phylogeny of hornless ruminants and a description of the cranium of *Archaeomeryx*, *Bulletin of American Museum of Natural History*, 167, 117-158.

Wells, D.L. y Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.

Wright, J.L. (1988). VLF interpretation manual, publicación particular, 85 pp.

Yoshida, S. (2001), Convection current generated prior to rupture in saturated rocks, *J. Geophys. Res.*, 106, 2103-2120.



ANEJOS



REPORTAJE FOTOGRÁFICO



Imagen 48. Vista general de la zona de estudio (deslizamiento de Formigal) con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Enero de 2.012.

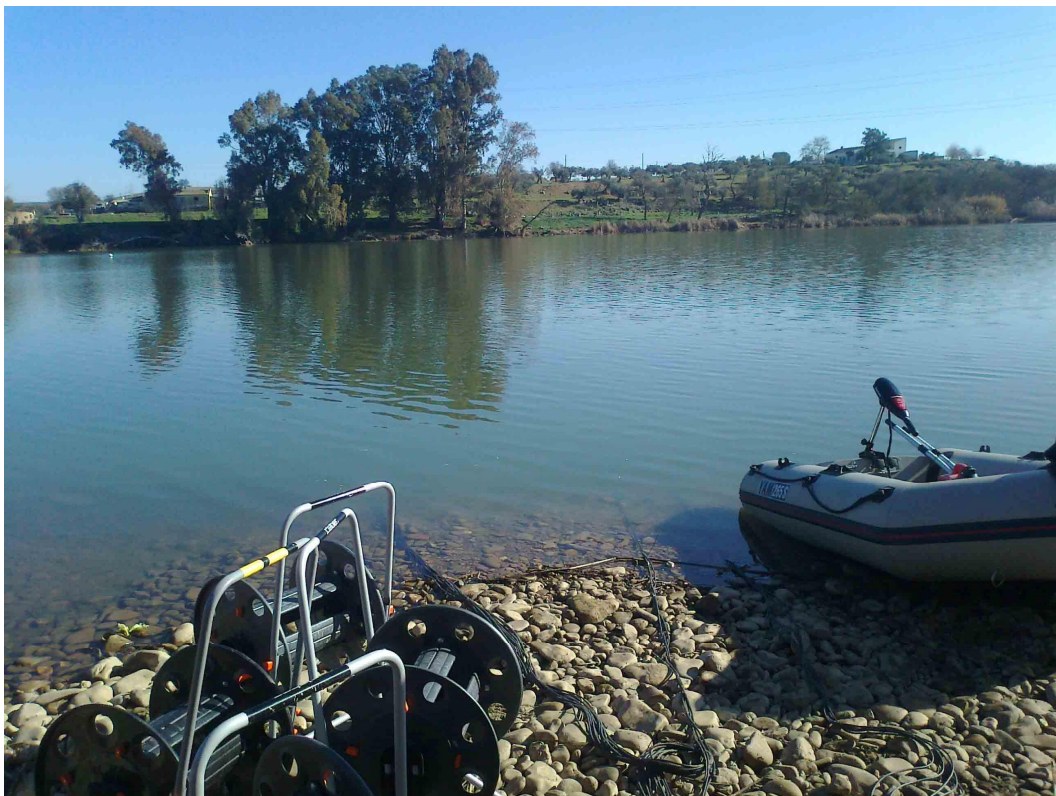


Imagen 49. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica acuática. Río Guadiana (Mérida). Enero de 2.012.



Imagen 50. Detalle del Equipo Syscal-Pro y disposición de las conexiones para la realización de tomografía eléctrica acuática. Río Guadiana (Mérida). Enero de 2012.



Imagen 51. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT. Cigales (Valladolid). Marzo de 2010.



Imagen 52. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Guadix (Granada). Julio de 2.010.



Imagen 53. Vista general del embalse de Beninar y el material necesario para la realización de Potencial espontáneo. Septiembre de 2.008.



Imagen 54. Vista general del embalse de Beninar y emplazamiento de dispositivo de tomografía eléctrica acuática. Julio de 2.008.



Imagen 55. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Polarización inducida. Embalse de Beninar (Granada). Octubre de 2.008.



Imagen 56. Vista general de la zona de estudio en el Puerto de Barcelona con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Agosto de 2.009.



Imagen 57. Vista general de la zona de estudio en el Puerto de Barcelona con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Agosto de 2.009.



Imagen 58. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica 3D. Embalse de Santolea (Teruel). Octubre de 2010.



Imagen 59. Realización de la tomo de datos con equipo Abem Wadi (VLF). Embalse de Santolea (Teruel). Julio de 2010.



Imagen 60. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Baza (Granada). Enero de 2.011. Baza



Imagen 61. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica profunda. Baza (Granada). Enero de 2.011.

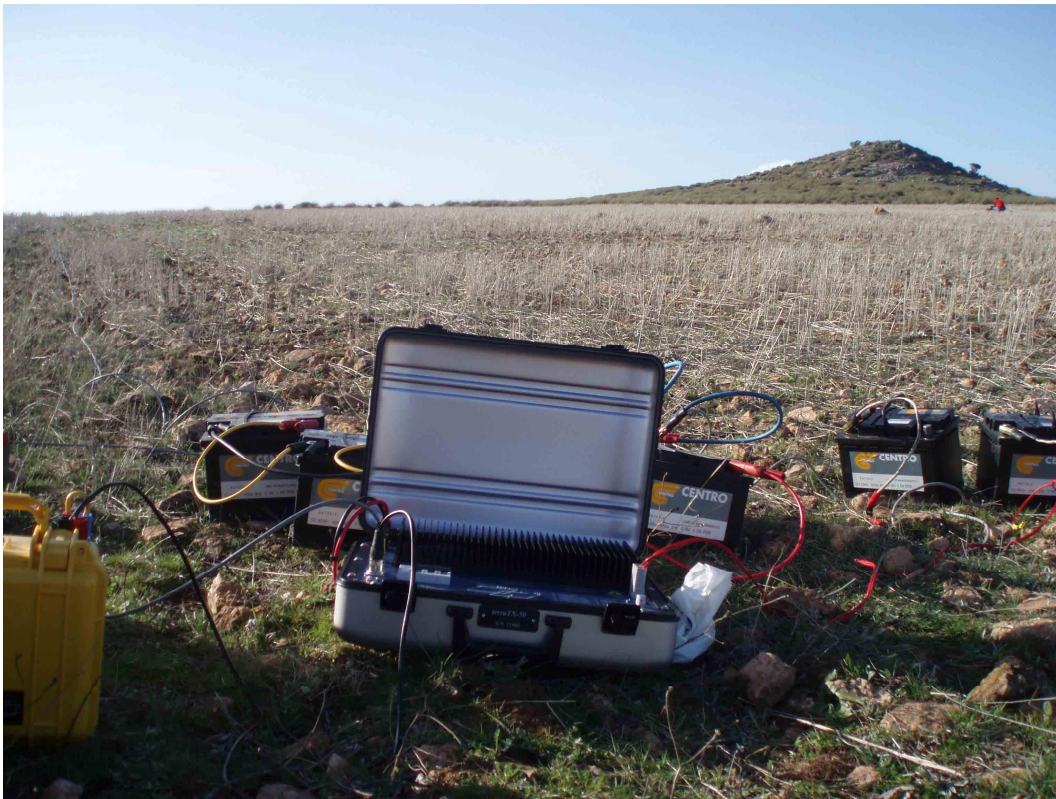


Imagen 62. Vista general de zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT profundo. Baza (Granada). Marzo de 2.011.



Imagen 63. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica. Embalse de Linares (Segovia). Febrero de 2.011.



Imagen 64. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de SEDT. Higuieruelas (Valencia). Mayo de 2.009.



Imagen 65. Vista general de la zona de estudio con dispositivo adoptado para realización de Tomografía Eléctrica marina. Valencia. Enero de 2.012.

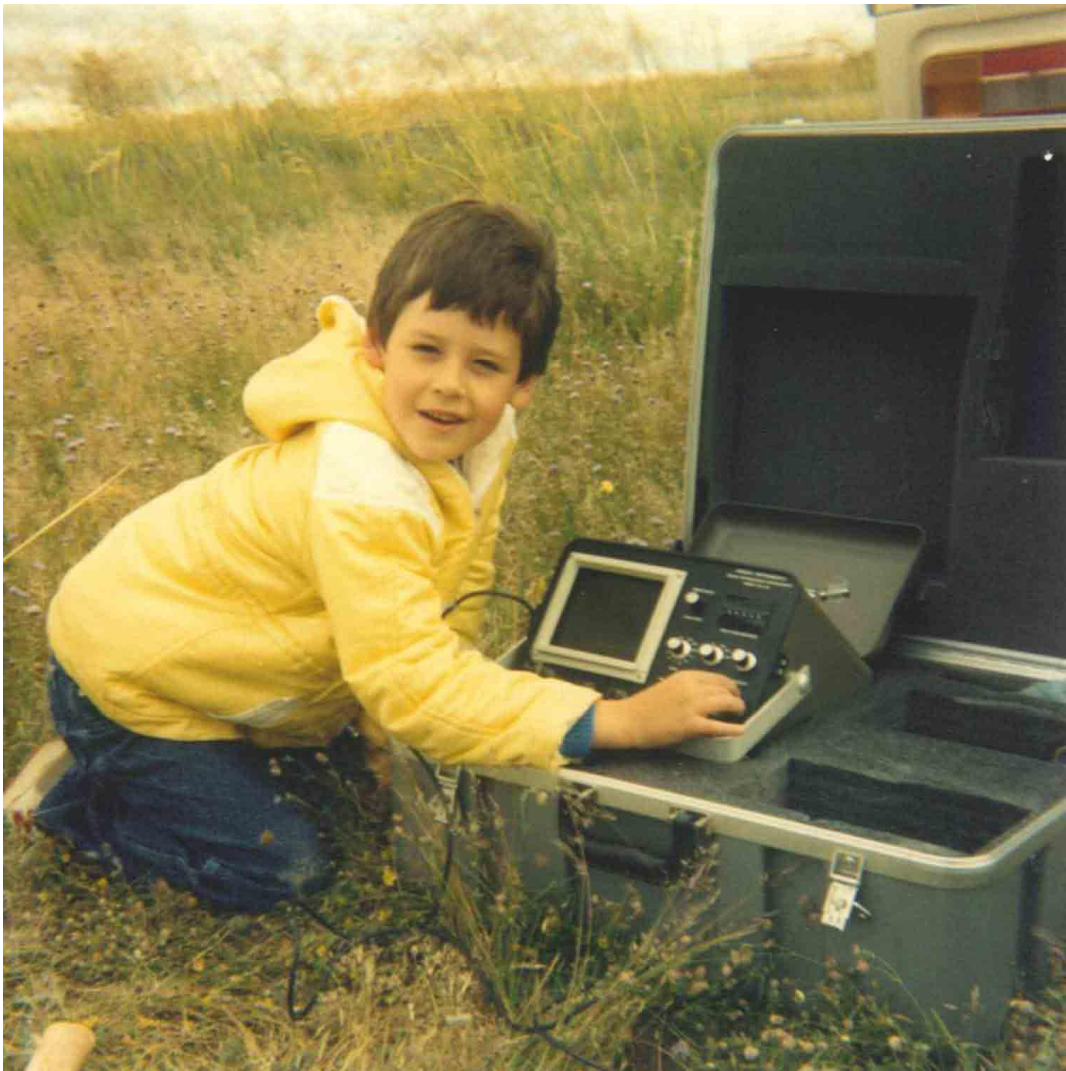


Imagen 66. Iniciación en el campo de la prospección geofísica del doctorando. Ávila. Septiembre de 1.989.