



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**  
Dirección General de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ciencias Físicas  
Unidad de Posgrado

## **Estudio de la geometría y estructura del subsuelo para la prospección de acuíferos en los términos municipales de Alcalá de los Gazules, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro, España**

### **TESIS**

Para optar el Grado Académico de Magíster en Física con  
mención en Geofísica

### **AUTOR**

Arturo Santos ZEVALLOS FLORES

### **ASESORES**

Mg. Octavio FASHÉ RAYMUNDO

Dr. Pedro CARRASCO GARCÍA (Co-asesor)

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Zevallos, A. (2020). *Estudio de la geometría y estructura del subsuelo para la prospección de acuíferos en los términos municipales de Alcalá de los Gazules, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro, España*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Arturo Santos Zevallos Flores
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	42188956
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0003-0033-2083">https://orcid.org/0000-0003-0033-2083</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10351868
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-6743-7800">https://orcid.org/0000-0002-6743-7800</a>
<b>Datos de co-asesor</b>	
Nombres y apellidos	Pedro Carrasco García
Tipo de documento de identidad	Cédula de identidad
Número de documento de identidad	ESP / 70808154D
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0002-0676-8278">https://orcid.org/0000-0002-0676-8278</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	Juan Neil Mendoza Nolorbe
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25760992
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	Nabilt Jill Moggiano Aburto
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45103226
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	Nick Jhonatan Moreno Moreno
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	44337297



<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	A.2.4.3. Ciencias del Suelo
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	<p>Áreas de Estudios: (Tres términos Municipales)  País: España  Comunidad Autónoma: Andalucía / Valenciana / Castilla y León.  Provincia: Cádiz / Castellón/ Ávila.  Termino Municipal: Alcalá de los Gazules / San Jorge / Casas del Puerto de Villatoro.  Lugar: Investigación en Finca N°1 (Alcalá de los Gazules) Latitud: 36.535030°  Longitud: -5.750544°</p> <p>Lugar: Investigación en Finca N°2 (San Jorge) Latitud: 40.574885°  Longitud: 0.407216°</p> <p>Lugar: Investigación en Finca N°3 (Casas del Puerto de Villatoro) Latitud: 40.524587°  Longitud: -5.200095°</p>
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2016 - Junio2018
URL de disciplinas OCDE	<p>Geoquímica, Geofísica  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04</a>  Ingeniería ambiental y geológica  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01</a>  Geotecnia  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.02">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.02</a></p>



UNMSM

**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

Universidad del Perú. Decana de América

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Vicedecanato de Investigación y Posgrado**

**Unidad de Posgrado**

“Año de la Universalización de la Salud”

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA  
OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN FÍSICA CON MENCIÓN EN  
GEOFÍSICA**

Siendo las 16:30 horas del 01 de setiembre de 2020, en la Sala de Sesión Virtual de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, presidido por el señor Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe como presidente, y con la presencia de los siguientes miembros del Jurado Examinador:

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe	(Presidente)
Mg. Nabil Jill Moggiano Aburto	(Miembro integrante)
Mg. Nick Jhonatan Moreno Moreno	(Miembro integrante)
Dr. Pedro Carrasco García	(co-asesor)
Mg. Octavio Fashé Raymundo	(Asesor)

Para la sustentación oral y pública de la tesis para optar el Grado Académico de Magister en Física con mención en Geofísica, del Bachiller Arturo Santos Zevallos Flores con código de matrícula N°15137015.

Después de darse lectura al expediente de Grado, en el que consta haberse cumplido con todas las disposiciones reglamentarias, los señores miembros del Jurado Examinador, atendieron a la exposición de la tesis titulada:

**“Estudio de la Geometría y estructura del subsuelo para la prospección de acuíferos en los términos municipales de Alcalá de los Gazules, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro, España”**

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el presidente y los miembros del Jurado Examinador pasaron a otra sala virtual para la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado Examinador el Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe, invitó a los miembros del Jurado Examinador a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al resultado de la deliberación. Obteniendo como resultado la calificación de:

Muy bueno (MENCIÓN)	18 (NÚMERO)	Dieciocho (LETRAS)
------------------------	----------------	-----------------------

A continuación, el Presidente del Jurado Examinador entrega el Acta de Sustentación de Tesis a la Unidad de Posgrado para continuar el trámite correspondiente del Grado Académico de Magister en Física con mención en Geofísica al Bachiller Arturo Santos Zevallos Flores.

Siendo las 18:00 horas, se levantó la sesión.

Los miembros del Jurado Examinador suscriben el Acta de sustentación de tesis en la Ciudad de Lima, a los 01 días del mes de setiembre de 2020.



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
Universidad del Perú. Decana de América  
**Facultad de Ciencias Físicas**  
**Vicedecanato de Investigación y Posgrado**  
**Unidad de Posgrado**  
“Año de la Universalización de la Salud”

Acta de Sustentación de Tesis del Bach. Arturo Santos Zevallos Flores.

**Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe**

**PRESIDENTE**

**Mg. Nabil Jill Moggiano Aburto**

**MIEMBRO INTEGRANTE**

**Mg. Nick Jhonatan Moreno Moreno**

**MIEMBRO INTEGRANTE**

**Dr. Pedro Carrasco García**

**CO-ASESOR**

**Mg. Octavio Fashé Raymundo**

**ASESOR**

RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES:

**Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:**

https: <https://meet.google.com/sbn-xadh-upq>

ID: [meet.google.com/sbn-xadh-upq](https://meet.google.com/sbn-xadh-upq)

Grabación archivada en:

[https://drive.google.com/drive/folders/1pL34onTkKHAuk5cQsujjI9jbW\\_WstHSZ?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1pL34onTkKHAuk5cQsujjI9jbW_WstHSZ?usp=sharing)

**CALIFICACIÓN OBTENIDA: 18 (Dieciocho)**

**DEDICADO A:**

A mi familia, por la comprensión y confianza que depositaron durante mis estudios de posgrado en la UNMSM y durante la realización de esta tesis en la Universidad de Salamanca – Ávila, España.

## GRATITUD

En principio agradecer a mi padre celestial por ser mi fuerza cada día. Así mismo también a mi Asesor de tesis Mg. Octavio Fashé Raymundo, por incentivar me en realizar la tesis cada día e impartir su conocimiento a través de sus clases durante las clases de pregrado y posgrado - UNMSM.

Así mismo agradecer a la empresa **Técnicas Geofísicas S.L.** por participar en los diferentes proyectos. La compañía cuenta con más de 50 años realizando investigaciones geofísicas, brindando soluciones a diferentes problemas y retos que implican las obras de ingeniería. La empresa en mención tiene como gerente general al Ing. Javier carrasco García.

El desarrollo de esta tesis se realizó con la empresa Técnicas Geofísicas S.L, en diferentes Comunidades de España, agradecimientos especiales por los conocimientos impartidos a los profesionales: Ing. Pedro Carrasco Morillo, geofísico e Ing. de minas con más de 50 años experiencia profesional, ex director de la Escuelas de Minas de las Universidades de Madrid y Salamanca; al Ing. Daniel Porras Sanchiz, por las clases en las formas de Representación de Datos Geofísicos; al Ing. Javier carrasco García por las explicaciones en el procesamientos de los distintos datos geofísicos; y, al Ing. Carlos Vallejo Muñoz.

Finalmente, un agradecimiento especial al **Dr. Pedro Carrasco García y Familia** por el apoyo en el procesamiento, interpretación y generación de planos para la presentación final de la presente tesis, así como la oportunidad ofrecida de participar en diferentes proyectos de ingeniería, tanto públicas como privadas en España.

Finalmente, agradecer a mis padres, hermanos, esposa e hijos por el apoyo incondicional que me han brindado durante mi formación profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE DE CONTENIDOS	6
FIGURAS	9
CUADROS	12
ANEXOS	12
RESUMEN	13

### CAPÍTULO I

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	20
1.2 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO	21
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.4 ÁREAS DE ESTUDIO	22
1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.5.1. Problema Universal	24
1.5.2. Problemas Particulares	24
1.6 OBJETIVOS	24
1.6.1. Objetivo Universal	24
1.6.2. Objetivos Específicos	25
1.7 HIPÓTESIS	25
1.7.1. Hipótesis General	25
1.7.2. Hipótesis Específicas	25
<b>2. MÉTODOS APLICADOS</b>	<b>26</b>
2.1 INTRODUCCIÓN	26
2.2 ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY-ERT	26
2.2.1. Introducción	26
2.2.2. Ecuaciones	27
2.2.3. Determinación de la Resistividad Aparente	29
2.2.3. Determinación de la Resistividad Real	29
2.2.4. Dispositivos	31
2.2.4. Superioridad y Deficiencias entre Dispositivos	33
2.2.5. Algunos factores	37
2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS	38
2.3.1. Formulaciones de Maxwell	38
2.3.2. Fórmulas de la Onda Electromagnética	38
2.3.3. Condición de frontera	39
2.3.4. Resultado de las Fórmulas de las Ondas	40
2.3.5. M.E. en el dominio del Tiempo y Frecuencia	41
2.4 SONDAJE ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE TIEMPO SEDT	42
2.4.1. Introducción del TDEM	42
2.4.2. Sondaje Electromagnético en el dominio del tiempo TDEM	42
2.4.3. El principio Método TDEM	46
2.4.4. Resistividad aparente en TDEM	48
2.4.5. Configuraciones - TDEM	49
2.5 DOMINIO DE LA FRECUENCIA EM	50
2.5.1. Introducción	50

2.5.2. Funcionamiento del Método.....	51
2.5.3. Fundamento eléctrico.....	52
2.5.4. Profundidad de penetración de radiación EM .....	56
2.5.4. Forma de Ubicación de las antenas.....	58
2.5.5. Very Low Frequency – VLF .....	59
2.5.5.1. Antecedentes del método .....	59
2.5.5.2. Método de prospección con VLF .....	60
2.5.5.3. Tipos básicos de interpretación de datos VLF .....	63
2.5.5.4. Secciones de densidad de corriente.....	65
<b>3. METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN .....</b>	<b>67</b>
3.1 TÉCNICAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA: .....	67
3.2 MÉTODOS ELÉCTRICOS .....	68
3.2.1. Instrumento Geofísico .....	68
3.2.2. Procedimiento de campo .....	70
3.2.2.1. Programa de la investigación .....	70
3.2.2.2. Arreglo y levantamiento de la información.....	70
3.2.2.3. Profundidad de investigación.....	71
3.2.2.4. Tratamiento adecuado del levantamiento de la información.....	71
3.2.2.5. Análisis e Interpretación .....	73
3.2.2.6. Superioridad - Deficiencias.....	74
3.3 SONDAJE ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DE TIEMPO SEDT .....	75
3.3.1. Instrumento Geofísico .....	75
3.3.2. Procedimiento de campo .....	78
3.3.2.1. Programa de Investigación .....	78
3.3.2.2. Adquisición y levantamiento de la información .....	78
3.3.2.3. Tratamiento adecuado del levantamiento de la información.....	78
3.3.2.4. Análisis e Interpretación .....	81
3.3.2.5. Superioridad y Deficiencias .....	81
3.4 VERY LOW FREQUENCY – VLF .....	82
3.4.1. Equipo requerido - Electromagnetic VLF Method.....	82
3.4.2. Procedimiento de Campo.....	83
3.4.2.1. Programa de Investigación .....	83
3.4.2.2. Adquisición de los datos .....	84
3.4.2.3. Profundidad de investigación.....	84
3.4.2.4. Análisis e Interpretación .....	85
3.4.2.5. Superioridad y Deficiencia del método .....	86
<b>4. RESULTADO DE LA INVESTIGACION POR CADA SITIO .....</b>	<b>87</b>
4.1 PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA - T.M. ALCALÁ DE LOS GAZULES, PROVINCIA DE CÁDIZ.....	87
4.1.1 Introducción.....	87
4.1.2 Emplazamiento de Interés .....	88
4.1.3 Geología .....	89
4.1.3.1. Información Hidrogeológica.....	90
4.1.4 Procedimientos de Trabajo de Campo.....	95
4.1.5 Procesamiento e Interpretación de Datos .....	96
4.1.6 Resultado de la Investigación .....	97
4.1.6.1. Tomografía Eléctrica.....	97
4.1.6.2. Ensayo TEM.....	98

4.1.7 Conclusión & Recomendación .....	99
4.2 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN UNA FINCA PERTENECIENTE AL TÉRMINO MUNICIPAL DE SAN JORGE (CASTELLÓN) .....	101
4.2.1 Introducción.....	101
4.2.2 Emplazamiento de Interés .....	102
4.2.3 Geología .....	102
4.2.4 Procedimientos de Trabajo de Campo.....	105
4.2.5 Procesamiento e Interpretación de Datos TDEM.....	106
4.2.6 Resultado de la Investigación .....	107
4.2.7 Conclusión & Recomendación .....	108
4.3 PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA – T. M. CASAS DEL PUERTO DE VILLATORO (ÁVILA).....	110
4.3.1 Introducción.....	110
4.3.2 Objetivos .....	111
4.3.3 Emplazamiento de Interés .....	111
4.3.4 Geología e Hidrogeología de la Zona .....	112
4.3.5 Procedimientos de Trabajo de Campo.....	115
4.3.6 Procesamiento e Interpretación de Datos VLF .....	115
4.3.7 Resultado de la Investigación .....	118
4.3.8 Conclusiones y Recomendaciones .....	125
4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	127
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>130</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	130
5.2 RECOMENDACIONES .....	132
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>133</b>



## FIGURAS

- Figura 1.1** Emplazamiento del proyecto de interés (Fuente: Google Earth, 27/11/17)
- Figura 1.2** Ubicación de las líneas geofísicas en el Término Municipal de Alcalá de los Gazules (Fuente: Google Earth, 13/02/18)
- Figura 1.3** Ubicación de las líneas geofísicas en el Término Municipal de San Jorge (Fuente: Google Earth, 13/02/18)
- Figura 1.4** Ubicación de las líneas geofísicas en el Término Municipal de Casas del Puerto de Villatoro (Fuente: Google Earth, 13/02/18)
- Figura 2.1** Principio del método resistivo, dispositivo electródico lineal (cuadrupolo) (Knödel, 2007).
- Figura 2.2** Mediciones dispositivo tipo Wenner (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments).
- Figura 2.3** Dispositivo Wenner-Schlumberger (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)
- Figura 2.4** Dispositivo Dipolo-Dipolo (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)
- Figura 2.5** Dispositivo Polo-Dipolo (Directo) (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)
- Figura 2.6** Dispositivo Polo-Dipolo (Inverso) (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)
- Figura 2.7** Según Edwards 1977, muestra la profundidad media entre los distintos tipos de arreglos.
- Figura 2.8** Vista de la sensibilidad, arreglo Dipolo-Dipolo.
- Figura 2.9** Vista de la sensibilidad, arreglo Wenner-Schlumberger
- Figura 2.10** Vista de la sensibilidad, arreglo Wenner
- Figura 2.11** Vista de la sensibilidad, arreglo Polo-Polo
- Figura 2.12** Arreglos Polo-Dipolo (Directo) y Polo-Dipolo (Inverso)
- Figura 2.13** Vista de la sensibilidad, Polo-Dipolo
- Figura 2.14** Valores de resistividades de suelos y roca (Orellana, 1972).
- Figura 2.15a** Diagrama de flujos de corrientes
- Figura 2.15b** Flujo de corriente transitoria en el suelo. (a) Justo después de que el transmisor se apague. (b) - (d) En tiempos progresivamente posteriores.
- Figura 2.16** Configuración de campo TDEM - Typical Central Loop Configuration.
- Figura 2.17** Campo primario (McNeill, 1990).
- Figura 2.18** Inducción de corrientes eléctricas (McNeill, 1990).
- Figura 2.19** Campo secundario (McNeill, 1990).
- Figura 2.20** Esquema de corriente, EMF y campo secundario, en el tiempo (Navarro Luna, 2006).
- Figura 2.21** TDEM Eddy Current Flow - early time (McNeill, 1990).
- Figura 2.22** TDEM Eddy Current Flow - late time (McNeill, 1990).
- Figura 2.23** Inducción corriente vs la profundidad, con tiempos variables (Navarro Luna, 2006).

- Figura 2.24** Se muestra el aumento de 10 Stack vs 1000 stacking mejorando notablemente la curva (Pedro C., 2013).
- Figura 2.25** Se muestra que la profundidad es I.P. a la conductividad.
- Figura 2.26** Resistividad de materiales asociadas a arcilla, margas menores a 10 Ohm.m (SEDT, Técnicas Geofísicas SL.)
- Figura 2.27** Configuraciones del sistema SEDT y DOWN-HOLE (Manual de operaciones del Equipo TerraTem).
- Figura 2.28** Proceso de detección del Cuerpo Conductor (Reynolds, 2011).
- Figura 2.29** Circuito eléctrico básico que contiene capacitancia (C), inductancia (L) y resistencia (R), los tres componentes eléctricos componentes que describen el comportamiento equivalente del suelo (Reynolds, 2011)
- Figura 2.30** Relaciones entre los voltajes inducidos y los retardos de fase asociados entre los campos magnéticos primarios, secundarios y resultantes (Beck, 1981).
- Figura 2.31** (A) Diagrama vectorial que define las magnitudes y las relaciones de fase de los campos primario y secundario. (B) Las componentes vectoriales del campo secundario en términos de la tensión secundaria ( $S_Y$ ) y el campo magnético actual o primario ( $S_X$ ) (Reynolds, 2011).
- Figura 2.32** (A) Campo secundario orientado en el espacio en un ángulo  $\beta$  al campo primario. (B) Las componentes horizontales y verticales  $R_X$  y  $R_Y$  de la resultante de la suma de los campos primario y secundario. (C) La elipse de polarización inclinada en el ángulo de inclinación  $\theta$  a la horizontal (Reynolds, 2011).
- Figura 2.33** Diagrama esquemático del principio VLF (ABEM WADI, Interpretation Guide).
- Figura 2.34** Ubicación de ejes, E y H, antena transmisora - Very Low Frequency (Pedro Martínez, 2006).
- Figura 2.35** Esquema de funcionamiento del sistema VLF (Ogilvy y Lee, 1991).
- Figura 2.36** Izda. Componentes del campo EM de una emisora remota de VLF y corrientes eléctricas en la superficie. Derecha. Componentes del campo eléctrico a lo largo del perfil que cruza perpendicularmente la fractura (Ogilvy y Lee, 1991).
- Figura 2.37** La zona falla / fracturada, se identifica en la parte "real" como una curva anómala. En la parte "imaginaria" no se detecta anomalía (valores cercanos a 0). Esto se observa en zonas conductoras, caracterizadas por un material con alta resistividad. Esta gráfica es típica para representar una zona de falla / fractura con una estructura llena de agua dulce (Manual de Abem Wadi).
- Figura 2.38** La zona falla / fracturada se identifica en la parte "real" como una curva anómala. En la parte "imaginaria" hay una anomalía simétrica detectada en los valores negativos. Esto se debe a la presencia de buenas zonas conductoras. Esta gráfica es típica para representar una zona de falla / fractura con una estructura llena de agua salina (Manual de Abem Wadi).

- Figura 2.39** Anomalía típica en VLF – Data original (Abem Wadi manual).
- Figura 2.40** Anomalía típica en VLF – Data filtrada (Abem Wadi manual).
- Figura 2.41** Sección de densidad de corriente de un perfil VLF
- Figura 3.1** Receptor que conecta los Cables Potenciales y de Corriente “Syscal Pro”.
- Figura 3.2** Detalle del Resistivímetro modelo SYSCAL PRO y la batería
- Figura 3.3** Conexión entre el electrodo y el cable multiconductor
- Figura 3.4** Equipo Syscal Pro
- Figura 3.5** Eliminación de valores anómalos de la sección (Goelectrical Imaging 2-D & 3D Geotomo Software).
- Figura 3.6** Sintetiza el subsuelo en cuadrados, atreves de análisis numérico (Goelectrical Imaging 2-D & 3D Geotomo Software).
- Figura 3.7** Conexión del Equipo TerraTx-50 de Monex GeoScope con sus 8 baterías y su batería de alimentación del equipo.
- Figura 3.8** Equipo TerraTem de Monex GeoScope
- Figura 3.9** Equipo TerraTx-50 de Monex GeoScope
- Figura 3.10** Equipo VLF diseñado por la empresa ABEM WADI
- Figura 4.1.1** Situación General
- Figura 4.1.2** Hoja Magna 1063, Algar (IGME)
- Figura 4.1.3** Planta Hidrogeológica
- Figura 4.1.4** Situación del Perfil de Tomografía, SEDT-1 y SEDT-2
- Figura 4.1.5** Toma de datos de campo TE y SEDT.
- Figura 4.1.6** Sección Tomografía Eléctrica
- Figura 4.1.7** Situación de la zona recomendada para emplazar el sondeo
- Figura 4.1.8** Sondeo recomendado sobre perfil de Tomografía Eléctrica
- Figura 4.1.9** Tendido del cable multidipolos e instalación al equipo SYSCAL PRO.
- Figura 4.1.10** Instalación de la estaca en el infinito LTE-1, Arreglo polo – Dipolo.
- Figura 4.1.11** Uso y manejo del equipo TDEM. Arreglo Single Loop.
- Figura 4.1.12** Ejecución del sondeo electromagnético en el dominio del tiempo SEDT-1. Arreglo Single Loop.
- Figura 4.2.1** Situación General del área investigada
- Figura 4.2.2** Mapa Geológico N° 546 “Ulldecona”
- Figura 4.2.3** Leyenda Mapa Geológico N° 546 “Ulldecona”
- Figura 4.2.4** Mapa Geológico N° 546 “Ulldecona” - Google Earth.
- Figura 4.2.5** Situación Perfil Geoeléctrico
- Figura 4.2.6** Sección Geoeléctrica
- Figura 4.2.7** Situación de la zona recomendada para emplazar el sondeo
- Figura 4.2.8** Vista panorámica del TDEM – 1. Arreglo Single Loop.
- Figura 4.2.9** Instalación y Adquisición de datos - SEDT-1. Arreglo Single Loop.
- Figura 4.2.10** Uso y manejo del equipo TERRA TX50. Arreglo Coincidente Loop.
- Figura 4.2.11** Ejecución del Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo SEDT-2. Arreglo Coincidente Loop.
- Figura 4.3.1** Localización general de la zona de estudio
- Figura 4.3.2** Plano geológico (Hojas 529 y 530) – IGME.
- Figura 4.3.3** Leyenda (Hoja 529 Santa María del Berrocal) – IGME.
- Figura 4.3.4** Leyenda (Hoja 530 Vadillo de La Sierra) – IGME.

- Figura 4.3.5** Situación de Perfiles Electromagnéticos VLF
- Figura 4.3.6** Geológico regional, perfil VLF-01 (Hojas 529) – IGME.
- Figura 4.3.7** Geológico regional, perfil VLF-02 (Hojas 529) – IGME.
- Figura 4.3.8** Geológico regional, perfil VLF-03 (Hojas 529 y 530) – IGME.
- Figura 4.3.9** Ortofoto 1 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-1
- Figura 4.3.10** Perfil Electromagnético VLF-1
- Figura 4.3.11** Ortofoto 2 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-2
- Figura 4.3.12** Perfil Electromagnético VLF-2
- Figura 4.3.13** Ortofoto 3 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-3.
- Figura 4.3.14** Perfil Electromagnético VLF-3
- Figura 4.3.15** Zonas favorables detectadas
- Figura 4.3.16** Zona de Estudio 1- Perfil VLF-1. Toma de datos cada 10m.
- Figura 4.3.17** Zona de Estudio 2- Perfil VLF-2. Toma de datos cada 10m.
- Figura 4.3.18** La zona de mayor grado de alteración y/o contacto, entre el granito alterado y el dique de diabasa. Se muestra en el perfil VLF-3. Zona de Estudio 3 - Perfil VLF-3. Toma de datos cada 10m.
- Figura 4.3.19** Zona de Estudio 3 - Perfil VLF-3. Toma de datos cada 10m
- Figura 4.3.20** Vista panorámica de la Zona de Estudio 3 – Equipo De Perforación A Rotopercusión.
- Figura 4.3.21** Explotación de Agua Subterránea - Zona de Estudio 3.

## CUADROS

<b>Cuadro 1.1</b>	Países que pueden encontrarse transmisores (ABEM WADI, Interpretation Guide).
<b>Cuadro 1.2</b>	Coordenadas WGS 84 – Ensayo Geofísico Tomografía Eléctrica
<b>Cuadro 1.3</b>	Coordenadas WGS 84 – Ensayos Geofísicos TDEM
<b>Cuadro 1.4</b>	Relación del Ensayo de Tomografía Eléctrica
<b>Cuadro 1.5</b>	Relación de Ensayos Geofísicos - TDEM
<b>Cuadro 1.6</b>	Inventario de puntos de agua.
<b>Cuadro 1.7</b>	Columnas Litológicas (Inventarios de Puntos de Aguas)
<b>Cuadro 1.8</b>	Coordenadas WGS 84 – Ensayos Geofísicos TDEM
<b>Cuadro 1.9</b>	Relación de Ensayos Geofísicos - TDEM
<b>Cuadro 1.10</b>	Coordenadas WGS 84 – Ensayo Geofísico VLF
<b>Cuadro 1.11</b>	Relación del Ensayo de VLF

## ANEXOS

<b>Anexo I</b>	T.M. de Alcalá de los Gazules (Cádiz)
<b>Anexo 1.1</b>	Curvas SEDT
<b>Anexo 1.2</b>	Panel Fotográfico - Tomografía Eléctrica
<b>Anexo 1.3</b>	Panel Fotográfico - TDEM
<b>Anexo II</b>	T.M. de San Jorge (Castellón)
<b>Anexo 2.1</b>	Curvas SEDT.
<b>Anexo 2.2</b>	Panel Fotográfico - TERRATEM
<b>Anexo 2.3</b>	Panel Fotográfico - TERRA TX 50
<b>Anexo III</b>	T.M. de Casas del Puerto de Villatoro (Ávila).
<b>Anexo 3.1</b>	Panel Fotográfico - VLF.

## RESUMEN

Según Juan M., 2010, reporta que cuando un lugar no tiene agua subterránea, es recomendable aplicar métodos geofísicos para la localización un acuífero potenciales.

Las áreas de estudio investigadas fueron el TM Alcalá, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro ubicadas en las provincias de Cádiz, Castellón y Ávila, respectivamente, España.

La investigación parte del problema: (¿Cuál es el tratado de la Geometría y distribución del suelo en la vertical para la Prospección de Acuíferos en el TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España?). El objetivo general es (Determinar la Geometría y Estructura del Subsuelo para la Prospección de Acuíferos en el TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España); y la hipótesis principal: (Estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo servirán para determinar la Prospección de Acuíferos en el TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España).

El tratado de la Geometría y distribución del suelo en la vertical consiste en medir y calcular las características de los cuerpos a investigar, así mismo nos permite asociar un sistema físico con las características de los suelos y/o rocas en profundidad, esto depende del método a aplicar: Tomografía Eléctrica, Sondeo Electromagnético TEM y Very Low Frequency – VLF.

Como resolver el problema del déficit de agua en el TM Alcalá, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro ubicadas en las provincias de Cádiz, Castellón y Ávila, respectivamente, para ello se plantea realizar un estudio detallado analizando la geología, luego de ello realizar investigaciones de exploración con los métodos directos e indirectos.

La exploración con los métodos directos corresponden a los diferentes Sistema de perforación, sin embargo, aplicar este método en las extensas áreas de las fincas es inviable por los costos. Para explorar las extensas áreas de investigación se plantea realizar investigaciones de exploración geofísica con los métodos indirectos y ellos a su vez se realizarán en base a la geología del área.

Para la realización de esta tesis se usó los métodos eléctricos, sondeo electromagnético TEM y Very Low Frequency – VLF (A. A. R. Zohdy, G. P. Eaton, and D. R. Mabey, 1974).

La Metodología usada para resolver el problema será: una Revisión de la información disponible, Medición de Campo, Levantamiento de datos Geofísicos, Equipos Geofísicos para Tomografía Eléctrica, Sondeo Electromagnético TEM y Very Low Frequency – VLF y Tratamientos de Datos geofísicos obtenidos in situ y gabinete.

A partir de las tres áreas de estudio, se determinó en cada uno lo siguiente:

**ZONA DE ESTUDIO-1:** del análisis de la línea de tomografía eléctrica se tiene que los espesor más grandes se encuentran en dirección Este, por lo que es adecuado para la perforación de un pozo exploratorio, el cual deberá alcanzar una profundidad de 120 m. **ZONA DE ESTUDIO-2:** del análisis del Perfil

Geoelectrico – SEDT, se tiene que el espesor menos profundo superficialmente se encuentra en dirección SW-NE, por lo que es adecuado para la perforación de un pozo exploratorio, el cual deberá alcanzar una profundidad de 300 m.

**ZONA DE ESTUDIO-3:** del análisis de la sección de densidad de corriente VLF-3, se determinó la diferencia de los valores de resistividades o conductividades eléctricas del subsuelo y los características de los suelos y/o rocas del terreno. Se recomienda la perforación de un pozo exploratorio, el cual deberá alcanzar una profundidad de 100 m.

Para el emplazamiento de los sondeos en las tres zonas, se recomiendan situarlos en dirección vertical del acuífero.

**PALABRAS CLAVES:** Métodos de Tomografía Eléctrica, Sondeo Electromagnético TEM, Very Low Frequency – VLF y Prospección de Acuíferos.

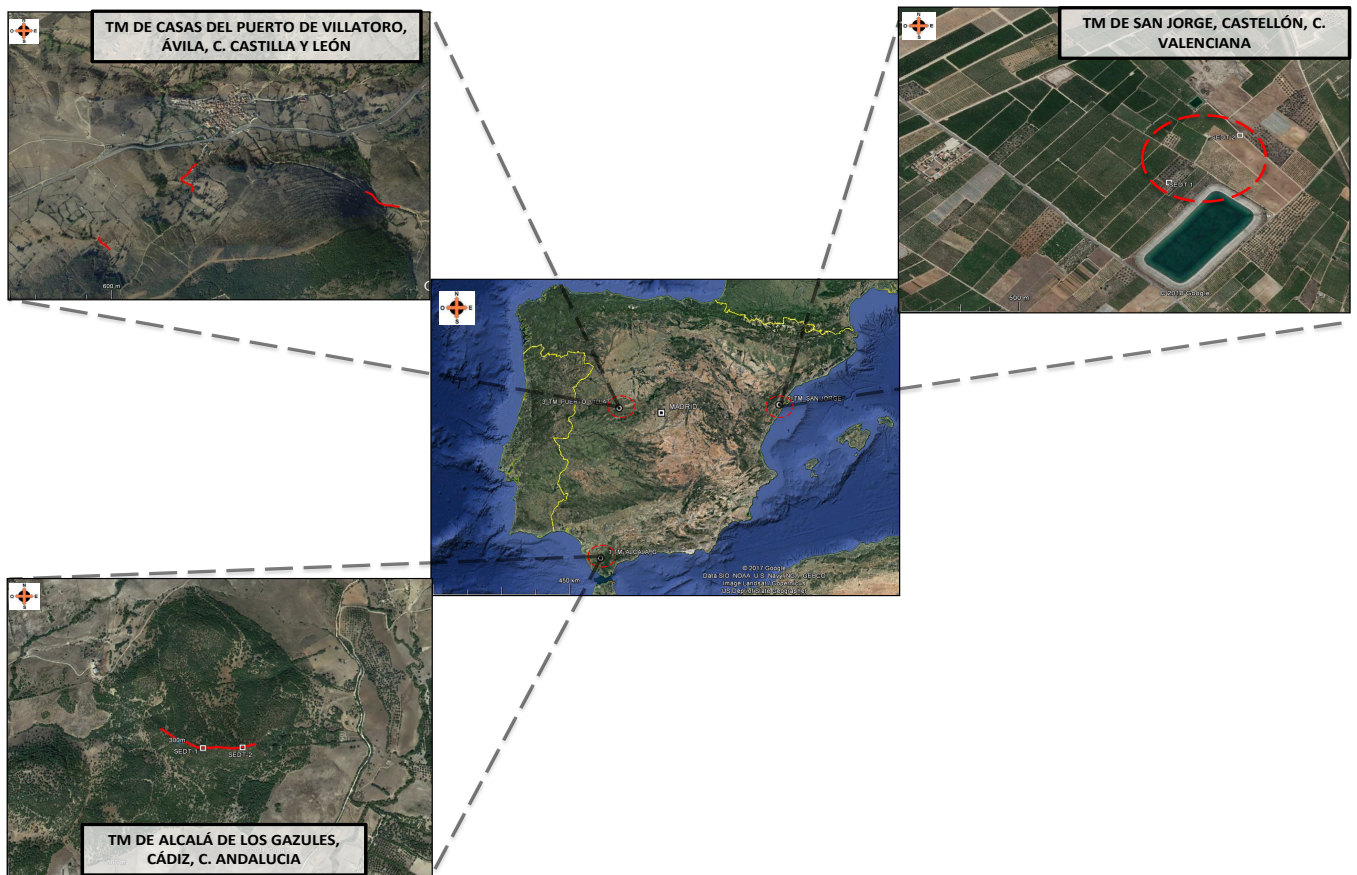
# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

En muchos países desarrollados y en desarrollo, no solo se depende de aguas subterráneas como fuente primaria de agua potable, sino también como utilización agraria y producción. La dependencia del agua subterránea, es tal que es necesario garantizar que haya cantidades significativas de agua y que el agua sea de alta calidad. El uso de la geofísica para la ubicación de recursos de aguas subterráneas y para las evaluaciones de la calidad del agua aumento debido a los rápidos avances en hardware y software.

Las áreas de estudio fueron en el TM Alcalá, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro ubicadas en las provincias de Cádiz, Castellón y Ávila, respectivamente. La proyección UTM, está dada por la Zona 30-31N y WGS-84. El centro del área de estudio del T.M. de Alcalá de los Gazules se encuentra localizada aproximadamente entre las coordenadas geográficas 5°45'1.55"O, 36°32'5.28"N, el área del T.M. de San Jorge en 0°24'18.24"E 40°34'24.77"N y el área del T.M. de Casas del Puerto de Villatoro en 5°11'59.90"O, 40°31'26.30"N. Con una distancia y dirección aproximada de 460.5 km al SW, 343.5 km al NE y 127.0 km al NW, respectivamente de la ciudad de Madrid.





**Figura 1.1:** Emplazamiento del proyecto de interés (**Fuente:** Google Earth, 27/11/17)

La investigación parte de la problemática: ¿Cuál es el tratado de la Geometría y distribución del suelo en la vertical para la Prospección de Acuíferos en los TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España?.

El objetivo general es: Determinar la Geometría y Estructura del Subsuelo para la Prospección de Acuíferos en los TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España.

Y la hipótesis principal: El Estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo servirán para determinar la Prospección de Acuíferos en los TM Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España, servirán para determinar la Prospección de Acuíferos.

Como resolver el problema del déficit de agua en el TM Alcalá, San Jorge y Casas del Puerto de Villatoro ubicadas en las provincias de Cádiz, Castellón y Ávila, respectivamente, para ello se plantea realizar un estudio detallado analizando la geología, luego de ello realizar investigaciones de exploración con los métodos directos e indirectos.

Realizar exploración con los métodos directos (Sistema de perforación: RotoperCUSión, Circulación inversa, Rotación con circulación inversa de lodos, RotoperCUSión con circulación directa, percusión, rotación) en las extensas áreas de las fincas nos podría llevar a cubrir gastos incensarios. Para el estudio de las extensas áreas de investigación se plantea realizar investigaciones de exploración geofísica (métodos indirectos).

Dentro los métodos geofísicos existentes tenemos: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), Tomografía Eléctrica 2D y 3D, Tomografía Eléctrica marina, Potencial Espontaneo, Polarización Inducida, Puesta a masa, Georadar (Ground Penetrating Radar - GPR), Sísmica de refracción, Down-hole / Cross-hole, Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal (MASW), Análisis de Microtrepidaciones en Arreglo Multicanal (MAM), Refraction Microtremors (ReMi), Coeficientes espectrales H/V, Sísmica paralela, Testificación geofísica, Gravimetría, Magnetometría, Teledetección (Geofísica desde Satélite), Sondeo Magnetotelúrico (MT, AMT, CSAMT), Sondeo Electromagnéticos TEM y Very Low Frequency – VLF, Método de resonancia magnética, entre otros.

Para la realización de esta tesis se usó los métodos eléctricos y electromagnéticos, dado que se han utilizado ampliamente en las investigaciones geofísicas de aguas subterráneas debido a la correlación que a menudo existe entre las propiedades eléctricas, las formaciones geológicas y su contenido de fluido (Flathe, 1955; Zohdy, 1969; Flathe, 1970; Ogilvy, 1991; Zohdy et al, 1974; Fitterman and Stewart, 1986; McNeill, 1990). El Very Low Frequency Method VLF a menudo se realiza como un estudio de reconocimiento, ya que grandes áreas de terreno se pueden cubrir rápidamente, McNeill y Labson (1991) han dado una revisión completa del método VLF y Covell et al. (1996), presento la ubicación de pozos en un lecho de roca en zonas de fracturas que contienen agua.

El fundamento físico del método eléctrico requiere de 4 electrodos, de las cuales 2 electrodos A/B inyectan corriente continua al suelo, medido con un miliamperímetro, los otros 2 electrodos M/N, medirán la diferencial de potencial con un milivoltímetro, con los valores de corriente, voltaje y la constante K, obtenemos la resistividad aparente a una profundidad estimada. así mismo el SEDT, consiste en generar un campo magnético primario, mediante la circulación de una corriente constante, sin embargo si esta corriente se anula,

se genera una inducción de corrientes (EMF), estas corrientes, forman espirales con la profundidad, de las cuales se reduce su intensidad con el tiempo, formándose un campo magnético secundario. Este campo secundario obtiene información de la resistividad del subsuelo, debido al voltaje variado en el tiempo. El voltaje de tiempos cortos nos da información de resistividad superficial y viceversa. Y finalmente el proceso físico que interviene en el método Electromagnéticos Very Low Frequency a largas distancias de la fuente la longitud de onda se aproxima a una onda plana, y es una combinación de un campo primario ( $H_p$ ) que al desplazarse en fase frente a un cuerpo conductor este se convierte entonces en la fuente de un campo secundario. Es decir, las corrientes en el conductor son generadas cuando las ondas de radio (campo electromagnético) pasan a través de un conductor enterrado, creando un campo electromagnético secundario.

La Metodología usada para resolver el problema será: una Revisión de la información disponible que consistirá en el reconocimiento fotogeológico, geológico e hidrogeológico; luego se procederá con la Medición de Campo para ello se planteara una distribución de las líneas, según la geología, topografía, así como aplicar el método que contribuiría mejor a identificar anomalías para la prospección de acuíferos pudiendo ser tomografía eléctrica, métodos Electromagnéticos en el Dominio de Tiempo y Very Low Frequency Method VLF; para el Levantamiento de Datos Geofísicos dependerá mucho de los parámetros de adquisición y/o observación de la data en campo, para Tomografía Eléctrica: Factor de calidad  $Q=0$ , Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT: Evitar ruidos en la curva de resistividad aparente y el método Electromagnéticos Very Low Frequency Method VLF: asegurar de captar la señal electromagnética y/o utilizar el radio transmisor; con respecto a los Equipos Geofísicos principalmente se utilizara: para Tomografía Eléctrica un SYSCAL Pro Standard & Switch 48, para el Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT se utilizara: El Terratem-10A (receptor) y el TERRATX-50 External Terratem Transmitter de Monex GeoScope y para el método Electromagnéticos Very Low Frequency Method VLF se usara: el equipo Eléctromagnético de Medidas Abem Wadi, cada uno de estos equipos están compuestos de accesorios adicionales; Finalmente para el Tratamientos de Datos: para la Electrical Resistivity Tomography-ERT, obtenemos un perfil

bidimensional de resistividad real, obtenida del área de estudio, el programa de inversión que se usara será el RES2DINV v3.53, para el Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT el objetivo es determinar un modelo estratificado unidimensional a partir de las curvas registradas, para se usara el software de TEM Plot Terra TEM y el Programa IX1D v3, para el método Electromagnéticos Very Low Frequency Method VLF el objetivo es obtener secciones de densidad de corriente a partir de los perfiles medidos aplicando filtros de forma separada para obtener las componentes en fase (real) y en cuadratura (imaginaria) de las anomalías para ello se usara el software Ramag v2.2.

Los métodos descritos anteriormente son ampliamente utilizados para la investigación de agua subterránea según las normas:

- D6431–99. Direct Current Resistivity.
- D6820. Time Domain Electromagnetic - TEM
- D6639–01. Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigation.
- ASTM G57-95. Wenner test for Soil Resistivity.

Finalmente, la tesis se organizará en cinco capítulos y se adjuntará sus respectivos anexos.

## **1.1 Antecedentes del Problema**

### **a) Según, Felipe D. 2012.**

Describe en su trabajo de investigación, la exploración geofísica mediante los métodos eléctricos (S.E.V. y P.E.) para exploraciones de aguas subterráneas y termales, el estudio se llevó a cabo en la universidad de Concepción y en Parque Menetúe.

El estudio se centró en realizar una grilla de P.E. en la zona estudio, para ubicar las zonas con mayor probabilidad de encontrar agua subterránea, en esas zonas con mayor probabilidad se realizaron SEVs, para estimar la profundidad del acuífero.

Como resultado de la tesis expone que mediante la exploración geofísica se pudo determinar que el dominio termal es debido a lo estructural por el mapeo de fallas y afloramientos.

**b) Según, Pedro C. 2013.**

El investigador en su tesis doctoral propone el uso de distintos métodos de prospección geofísica para problemas en hidrogeología, geotecnia, medio ambiente y minería.

Los problemas desarrollados por el investigador fueron filtraciones, deslizamientos, localización de fallas, búsqueda de agua subterránea en distintos medios geológicos, localización de sitios arqueológicos, exploración marina, cavidades, plumas contaminantes, etc.

Por otra parte, el investigador utiliza instrumentos informáticos, para ordenar los datos geofísicos siguiendo un sistema, estas herramientas nos permite realizar una interpretación adecuada al tener una visualización de los gráficos unidimensional, bidimensional y tridimensional de los distintos problemas expuestos anteriormente.

**1.2 Importancia del Estudio**

Actualmente se cuenta con abundante bibliografía para los estudios geofísicos por agua subterránea, con distintos métodos geofísicos.

El presente trabajo de investigación presenta a detalle, tres metodologías de estudios para la exploración de agua subterránea aplicando métodos eléctricos, electromagnéticos en dominio de tiempo y frecuencia. Para cada uno de los métodos se muestra el fundamento teórico, metodología de adquisición, equipos utilizados para su elaboración, así mismo, criterios para el procesamiento de datos.

Con estos ítems se pretende mostrar las bondades de los métodos geofísicos empleados, las cuales nos permiten identificar zonas favorables para la explotación de aguas subterráneas, siendo estos métodos aplicados indirectos.

**1.3 Justificación de la Investigación**

Este ítem inicia con los antecedentes del proyecto, para aplicar el método geofísico idóneo, según la particularidad del proyecto.

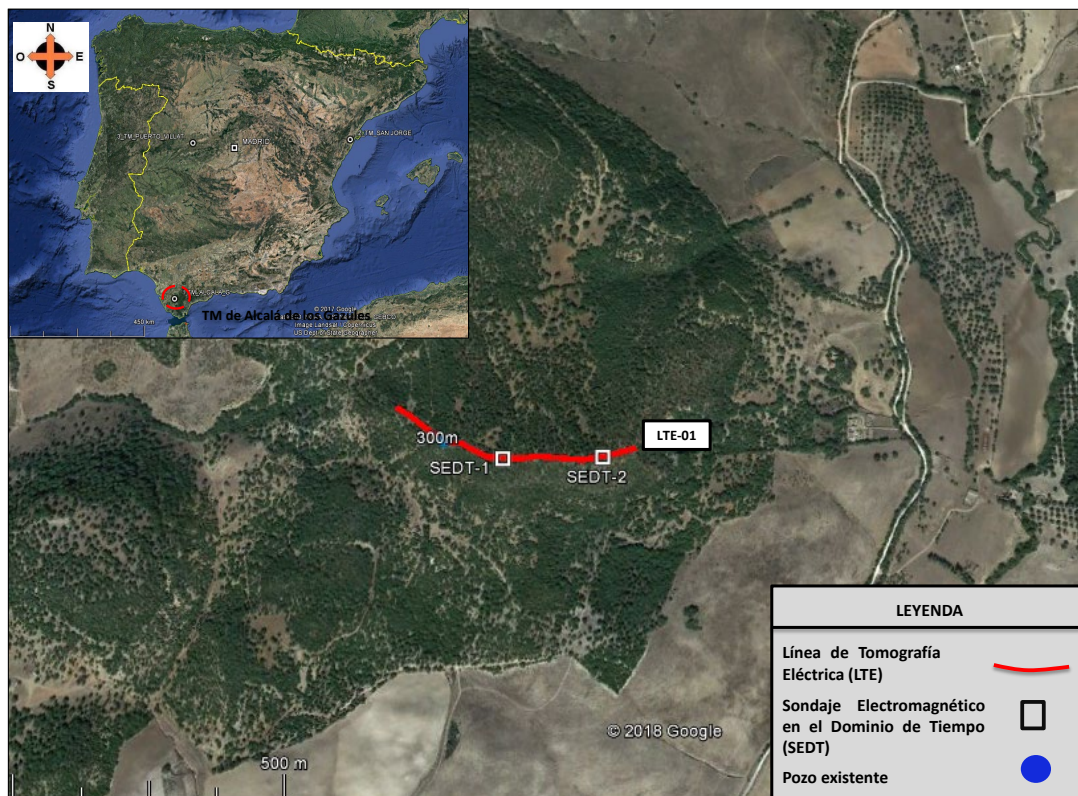
Considerando los antecedentes y los problemas actuales, se realiza un análisis logístico, geológico y revisión de antecedentes del proyecto.

Para la investigación en el T.M. Alcalá (P. Cádiz), San Jorge (P. Castellón) y Casas del Puerto de Villatoro (P. Ávila), se obtuvo toda la información necesaria, tanto logístico (Reconocimiento de la zona de estudio), como geológico (Conocimientos de pozos cercanos).

#### 1.4 Áreas de Estudio

Figura 1.1, observamos el emplazamiento de los proyectos investigados. La ubicación local

El emplazamiento de cada proyecto del T.M. Alcalá, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, se muestra en las Figuras 1.2, 1.3 y 1.4 respectivamente. Así mismo en cada figura se observa los métodos geofísicos empleados para la prospección de acuíferos.

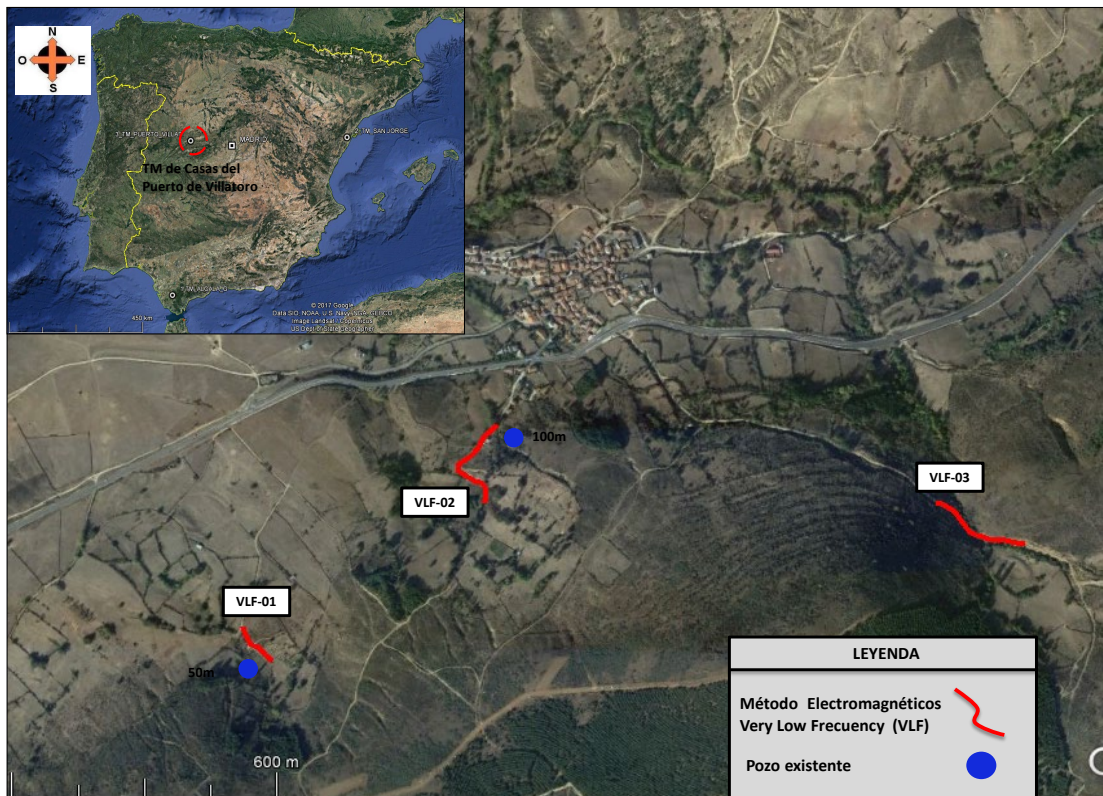


**Figura 1.2:** Ubicación de las líneas geofísicas en el T.M. de Alcalá de los Gazules (Fuente: Google Earth, 13/02/18)





**Figura 1.3:** Ubicación de las líneas geofísicas en el T.M. de San Jorge (Fuente: Google Earth, 13/02/18)



**Figura 1.4:** Ubicación de las líneas geofísicas en el T.M. de Casas del Puerto de Villatoro (Fuente: Google Earth, 13/02/18)

## **1.5 Formulación del Problema**

### **1.5.1. Problema Universal**

¿Cuál es el tratado de la Geometría y distribución del suelo en la vertical para la Prospección de Acuíferos en los T.M. de Alcalá de los Gazules, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España?

### **1.5.2. Problemas Particulares**

- A.** ¿De qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T.M. de Alcalá de los Gazules?
- B.** ¿De qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T.M. de San Jorge?
- C.** ¿De qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T. M. de Casas del Puerto de Villatoro?

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo Universal**

Determinar el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo para la Prospección de Acuíferos en los T. M. de Alcalá de los Gazules, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España

El tratado de la Geometría y distribución del suelo en la vertical, se analizará mediante de los métodos de Tomografía Eléctrica, Time-Domain Electromagnetic Methods y Very Low Frequency – VLF para Prospección de Acuíferos a partir de los ensayos superficiales. Como resultado se presentara las resistividades reales bidimensionales, resistividades reales 1D – 2D y Secciones de densidad de corriente mostrando zonas potencialmente con aguas subterráneas en la zona de estudios.

Durante el desarrollo del presente trabajo se pretende obtener información hidrogeológica relevantes, tales como la resistividad de las rocas o de los suelos estos a su vez dependen de su naturaleza, composición, porosidad,



contenido de humedad y cambio de temperatura. Esta información puede ser útil para el monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

- A.** Evaluar de qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T. M. de Alcalá de los Gazules.
- B.** Evaluar de qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T. M. de San Jorge.
- C.** Evaluar de qué manera el estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para la Prospección de Acuíferos en el T. M. de Casas del Puerto de Villatoro.

## **1.7 Hipótesis**

### **1.7.1. Hipótesis General**

El Estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo servirán para determinar la Prospección de Acuíferos en los T. M. de Alcalá de los Gazules, San Jorge y casas del puerto de Villatoro, España.

### **1.7.2. Hipótesis Específicas**

#### **A. HIPÓTESIS ESPECÍFICA “A”:**

El estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para evaluar la Prospección de Acuíferos en el T. M. de Alcalá de los Gazules.

#### **B. HIPÓTESIS ESPECÍFICA “B”:**

El estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para evaluar la Prospección de Acuíferos en el T. M. de San Jorge.

#### **C. HIPÓTESIS ESPECÍFICA “C”:**

El estudio de la Geometría y Estructura del Subsuelo influye para evaluar la Prospección de Acuíferos en el T. M. de Casas del Puerto de Villatoro.

## CAPÍTULO II

### 2. MÉTODOS APLICADOS

#### 2.1 Introducción

Los Métodos geofísicos aplicados en cada Término Municipal fue el siguiente:

- a) Alcalá de los Gazules (Prov. Cádiz), Tomografía Eléctrica - ERT y Time Domain Electromagnetic Methods.
- b) San Jorge (Prov. Castellón), Time Domain Electromagnetic Methods.
- c) Casas del Puerto de Villatoro (Prov. Ávila), Frequency Domain Electromagnetic Methods (Very Low Frequency Method VLF).

A continuación se detalla el fundamento teórico de cada método aplicado.

#### 2.2 Electrical Resistivity Tomography-ERT

##### 2.2.1. Introducción

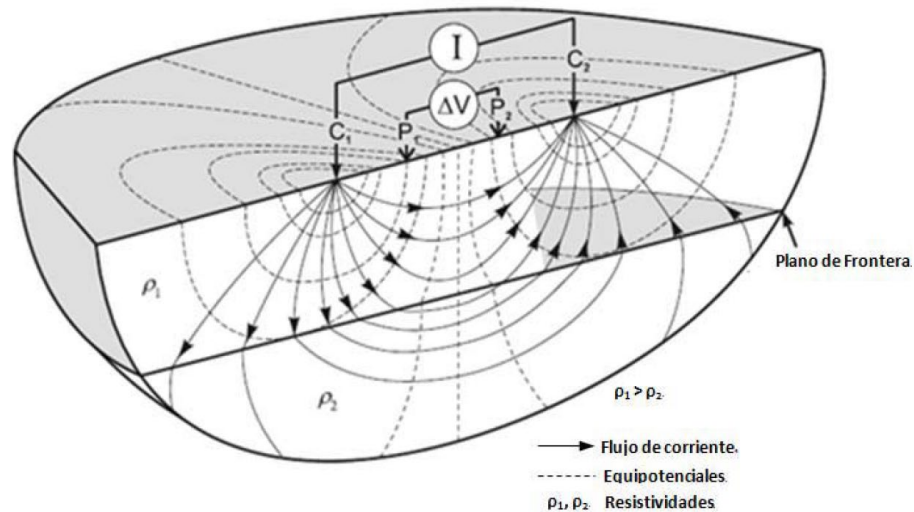
Electrical Resistivity Tomography, nos provee información sobre la resistividad aparente del subsuelo, obteniendo modelos bidimensionales y tridimensionales, de la zona de estudio. Este método se puede aplicar a distintos problemas geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, medioambiente y minería. El fundamento físico del método eléctrico requiere de 4 electrodos, de las cuales 2 electrodos A/B inyectan corriente continua al suelo medido con un miliamperímetro, los otros 2 electrodos M/N, medirán la diferencial de potencial con un milivoltímetro, con los valores de corriente, voltaje y la constante K, obtenemos la resistividad aparente a una profundidad estimada y para la obtención de la resistividad real del subsuelo el software RES2DINV desarrolla la inversión de los datos mediante un sistema iterativo.

##### **Objetivo**

El objetivo al aplicar la Tomografía eléctrica es obtener una sección de resistividades reales bidimensionales, para el análisis y/o determinación de la exploración del agua subterránea se deberá interpretar la sección geoelectrica, a partir de toda la información disponible.

## 2.2.2. Ecuaciones

En el grafico (Figura 2.1), se observa la generación de un campo eléctrico a partir de la corriente eléctrica inyectada al subsuelo.



**Figura 2.1:** Principio del método resistivo, dispositivo electródico lineal (cuadrupolo) (Knödel, 2007).

El fundamento físico del método eléctrico requiere de 4 electrodos, de las cuales 2 electrodos A/B inyectan corriente continua al suelo medido con un miliamperímetro, los otros 2 electrodos M/N, medirán la diferencial de potencial con un milivoltímetro, con los valores de corriente, voltaje y la constante K, obtenemos la resistividad aparente a una profundidad estimada.

Las formulaciones físicas según:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday (1)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ampere (2)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Gauss para campos eléctricos (3)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Gauss para campos magnéticos (4)}$$

Dónde:

$(\vec{E})$ : Campo eléctrico ( $V/m$ )

$(\vec{H})$ : Campo magnético ( $A/m$ )

$(\vec{D})$ : Desplazamiento ( $C/m^2$ )

( $\vec{B}$ ): Inducción magnética (Tesla) o ( $\text{wb}/\text{m}^2$ )

( $J$ ): Densidad corriente ( $\text{A}/\text{m}^2$ )

( $\rho$ ): Densidad de carga eléctrica ( $\text{C}/\text{m}^3$ )

De las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtiene lo siguiente:

$$B = \mu(\omega, H, r, t, T, P)H \quad (5)$$

$$J = \sigma(\omega, E, r, t, T, P)E \quad (6)$$

$$D = \varepsilon(\omega, E, r, t, T, P)E \quad (7)$$

Donde  $\varepsilon, \rho, \mu$  son tensores

( $\varepsilon$ ): Constante dieléctrica ( $\text{F}/\text{m}$ )

( $\sigma$ ): Conductividad ( $\text{S}/\text{m}$ )

( $\mu$ ): Permeabilidad magnética ( $\text{H}/\text{m}$ )

El valor ( $\varepsilon = 8,85 \times 10^{12} \text{F}/\text{m}$  y  $\mu = 4\pi \times 10^7 \text{H}/\text{m}$ ), se consideran constantes.

Apartir de la ecuación (1), si el campo eléctrico está en estado estacionario, entonces.

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = 0 \quad \text{El campo eléctrico es rotacional (8)}$$

Por lo, que el potencial eléctrico ( $\Delta U$ ) estaría dado por:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U \quad (9)$$

Considerando una superficie semiesférica y si  $r$  es el radio entonces, la ecuación estaría dado por:

$$2\pi r^2 J = I \quad (10)$$

Sustituyendo:

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (11)$$

Obteniendo:

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (12)$$

La diferencia de potencial entre dos puntos estaría dada por la ecuación (13),

$$\Delta U_N^M = - \int_N^M E \cdot dl \quad (13)$$

Tomando las distancias  $r_1$  y  $r_2$ , espacio de los electrodos de M y N hacia A y B.

$$\Delta U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (14)$$

### 2.2.3. Determinación de la Resistividad Aparente

La ecuación (14) se puede reescribir con los valores A, B, M, N, entonces sería:

$$\Delta U_N^M = \Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (5)$$

Luego, se obtiene la ecuación resistividad reducida, reemplazando K, se tiene:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (16)$$

El valor de K, sería:

$$K = \frac{2\pi}{\left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]} \quad (17)$$

Según (Pekerís, 1940), indica que la ecuación (16), funciona bien cuando los estratos del subsuelo son homogéneos, sin embargo ello varia cuando subsuelo es heterogéneo.

### 2.2.3. Determinación de la Resistividad Real

Para determinar las resistividades reales del subsuelo, apartir de un dispositivo, se debe obtener una respuesta análoga de las resistividades aparentes “teóricas” y “experimentales”.

Partiendo del vector ( $\vec{g}$ ), se tiene

$$\vec{g} = \vec{y} - \vec{f} = (y_1 - f_1, y_2 - f_2, \dots, y_m - f_m) \quad (18)$$

Dónde:

$$\vec{y} = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m)$$

$$\vec{f} = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m)$$

$$\vec{q} = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_m)$$

$$\vec{y}: \rho_{\text{aparente experimental}}$$

$$\vec{f}: \rho_{\text{aparente calculada}}$$

$$\vec{q}: \rho_{\text{real}}$$

La siguiente ecuación, representa la formulación del método de mínimos cuadrados para Electrical Resistivity Tomography-ERT.

$$E = \overline{g^T} \vec{g} = \sum_{i=1}^m g_i^2 \quad (19)$$

Aplicando formulación: Gauss-Newton, logramos disminuir el error.

$$J^T J \Delta \vec{q}_i = J^T \vec{g} \quad (20)$$

Dónde:

Vector de cambios ( $\Delta q$ )

Matriz Jacobiana (J)

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad \text{Matriz Jacobiana (21)}$$

La ecuación (21), calcula el cambio de "i" y "j". Y la ecuación (22), se aplica para disminuir el RMS.

$$\vec{q}_{k+1} = \vec{q}_k + \Delta \vec{q}_k \quad (22)$$

Para evitar que la determinante de la matriz  $J^T J$  sea 0, se aplica la transformación de Marquardt, según Lines and Treitel, 1984.

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (23)$$

Siendo:

Matriz identidad (I)

Factor de amortiguamiento ( $\lambda$ )

Para Transformar la ecuación de Gauss – Newton, se utiliza el procedimiento (smoothness) de Ellis and Oldenburg, 1994, la cual consiste en adicionar un término. Este se muestra en la ecuación:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (24)$$

Siendo: Las Matrices en dirección "x", "y", "z".

$$(F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z, y C_x, C_y y C_z)$$

La inversión de Wolke and Schwetlick, 1988, está dado por:

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta \vec{q}_k = J^T R_d \vec{g} - \lambda F_R \vec{q}_k \quad (25)$$

Se utilizan estas matrices  $R_d$  y  $R_m$ , en  $F_R = \alpha_x C_x^T R_m C_x + \alpha_y C_y^T R_m C_y + \alpha_z C_z^T R_m C_z$ , con el fin de ponderar la formulaciones utilizadas en el proceso de inversión.

## 2.2.4. Dispositivos

Los tipos de dispositivos más usuales son:

### WENNER

El espaciado entre sus electrodos es simétrico y tienen la misma distancia.

A continuación se muestra que siendo N=25, con una distancia de a=3m.

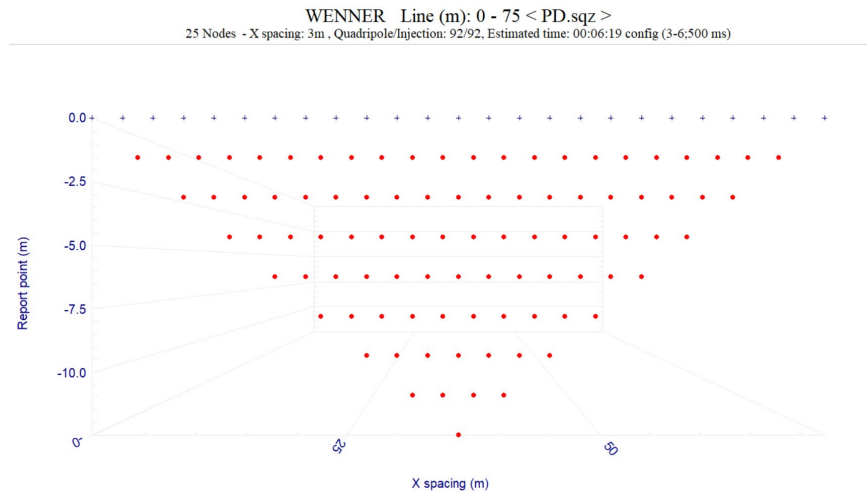


Figura 2.2: Mediciones dispositivo tipo Wenner (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (26)$$

El valor de  $K = 2\pi a$ . Y el espacio entre los electrodos es (a).

### WENNER-SCHLUMBERGER

Este dispositivo consiste en la unión de los métodos wenner y Schlumberger.

Donde la distancia entre los electrodos de corriente es mucho mayor, comparado con los electrodos potenciales. A continuación se muestra que

siendo N=25, con una distancia de a=3m y un n=11.

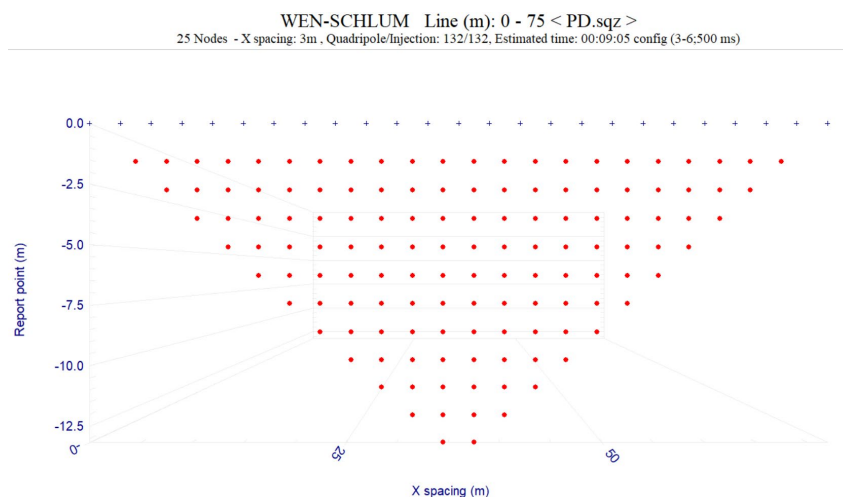


Figura 2.3: Dispositivo Wenner- Schlumberger (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)

$$\rho_a = \pi n(n + 1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (27)$$

El valor de  $K = \pi n(n + 1)a$ .

### **DIPOLO-DIPOLO**

La configuración principal para este dispositivo es la inyección de corriente por A/B, hacia un extremo de la línea de Tomografía eléctrica, siendo los demás electrodos potenciales. A continuación se muestra que siendo  $N=25$ , con una distancia de  $a=3m$  y un  $n=22$ .

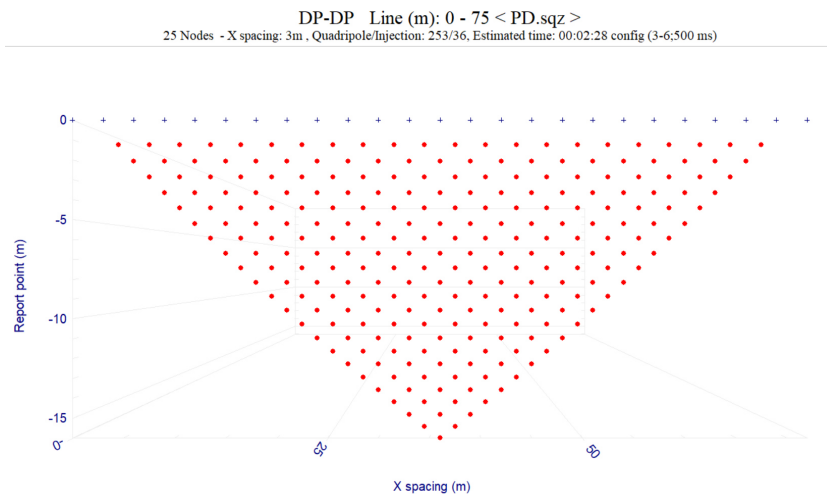


Figura 2.4: Dispositivo Dipolo-Dipolo (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)

$$\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (28)$$

El valor de  $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$ .

### **POLO-DIPOLO**

La configuración principal para este arreglo es la inyección de corriente por un electrodo muy alejado, de los demás. Siendo los demás electrodos de corriente y de potenciales. A continuación se muestra que siendo  $N=25$ , con una distancia de  $a=3m$  y un  $n=23$ .



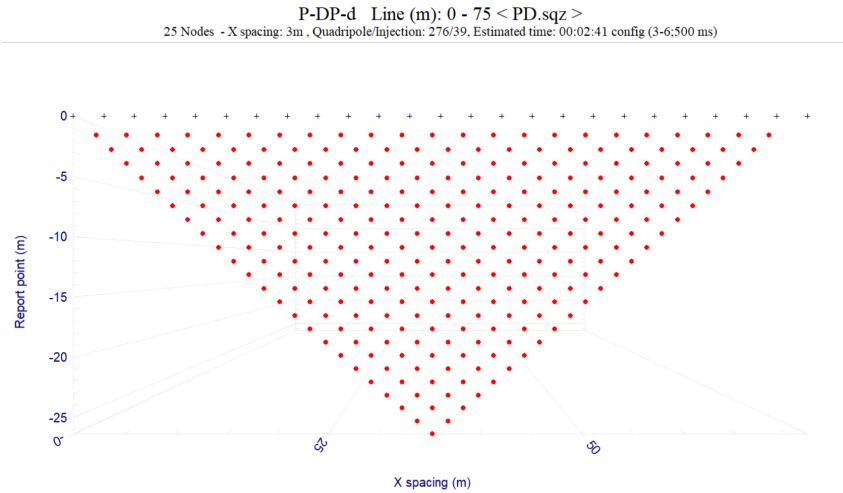


Figura 2.5: Dispositivo Polo-Dipolo (Directo) (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)

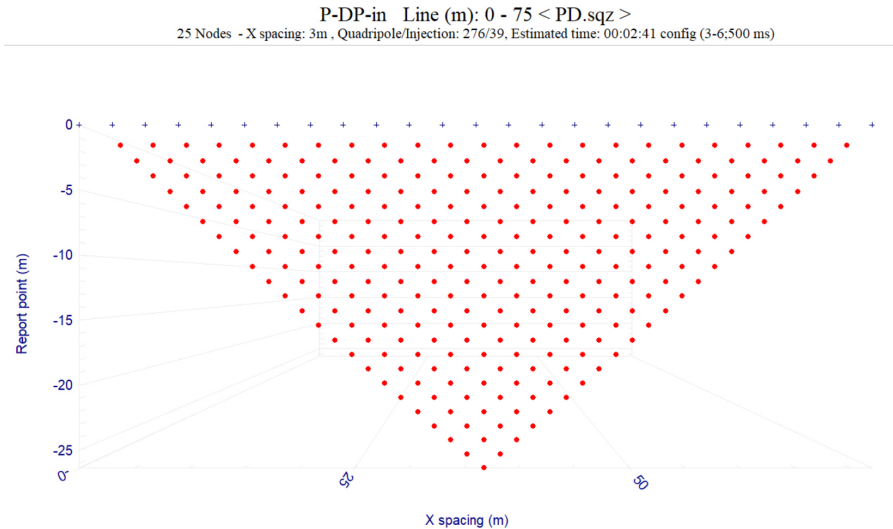


Figura 2.6: Dispositivo Polo-Dipolo (Inverso) (Fuente: software ELECTRE Pro v02, Designed by IRIS Instruments)

$$\rho_a = 2\pi n(n + 1)a \frac{\Delta V}{I} \quad (29)$$

El valor de  $K = 2\pi n(n + 1)a$ .

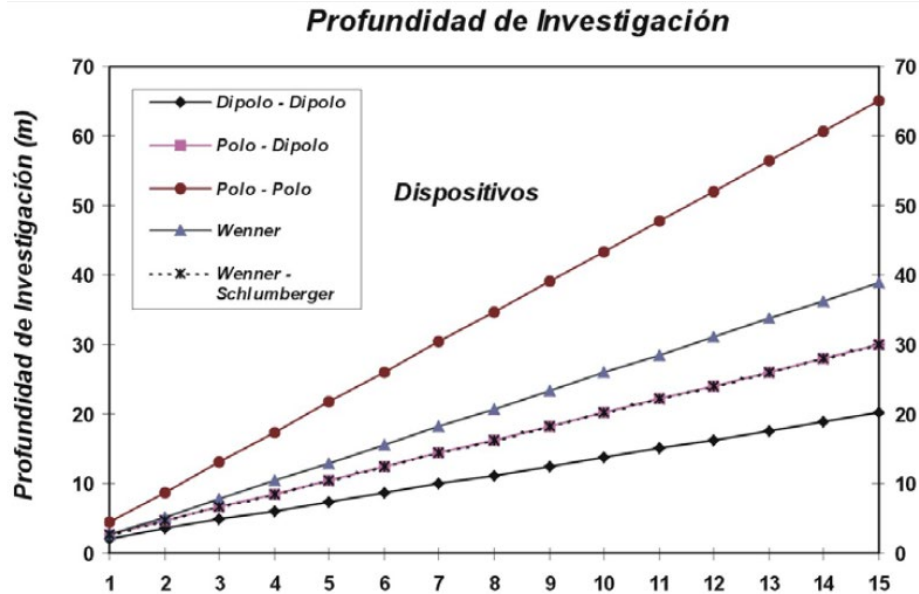
En la presente tesis se han utilizado los dispositivos Wenner-Schlumberger, Polo-Dipolo Directo y Polo-Dipolo Inverso.

#### 2.2.4. Superioridad y Deficiencias entre Dispositivos

Las principales diferencias entre los distintos dispositivos se deben tenerse cuidado con: la sensibilidad, profundidad y la correspondencia señal-ruido.

## Profundidad de Investigación

Según Edwards 1977, en el grafico inferior muestra, la profundidad estimada entre los arreglos analizados. Estas profundidades son vigentes para un suelo homogéneo.



**Figura 2.7:** Según Edwards 1977, muestra la profundidad media entre los distintos tipos de arreglos.

## Sensibilidad

Según, McGillivray and Oldenburg, 1990. La sensibilidad de la resistividad en un perfil geoelectrico varía con el valor del potencial.

## Señal /Ruido

La correspondencia señal /ruido está asociada al factor geométrico de cada dispositivo. A mayor valor del factor geométrico, menor será el potencial.

## ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD DEL ARREGLO:

### **DIPOLO-DIPOLO:**

Este arreglo, es sensible a las variaciones horizontales, pero no en la vertical. Por lo que este método se podría usar para explorar variaciones en la vertical, ejemplo: cavidades y diques.

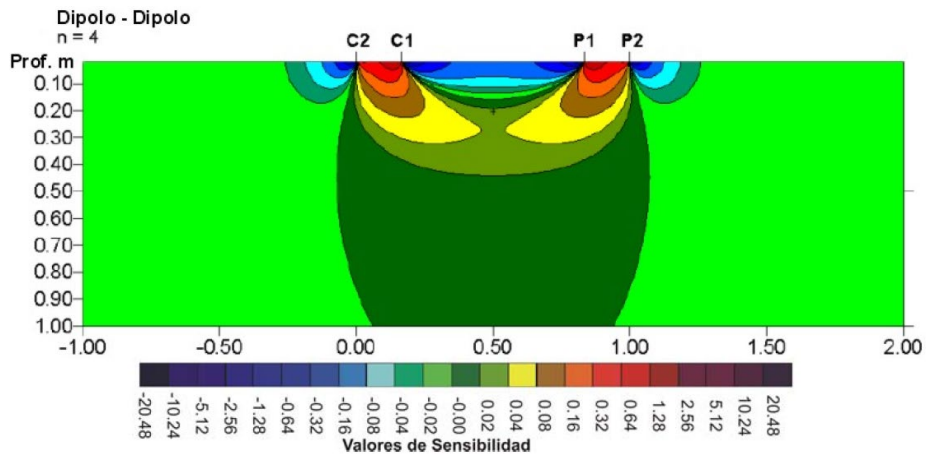


Figura 2.8: Vista de la sensibilidad, arreglo Dipolo-Dipolo.

### WENNER-SCHLUMBERGER

Según Pazdirek y Blaha 1996, el arreglo Wenner y Schlumberger, es una combinación de métodos. Este arreglo tiene una sensibilidad media a los cambios en las estructuras verticales y horizontales. La sensibilidad es mayor entre P1/P2 que entre C1/C2.

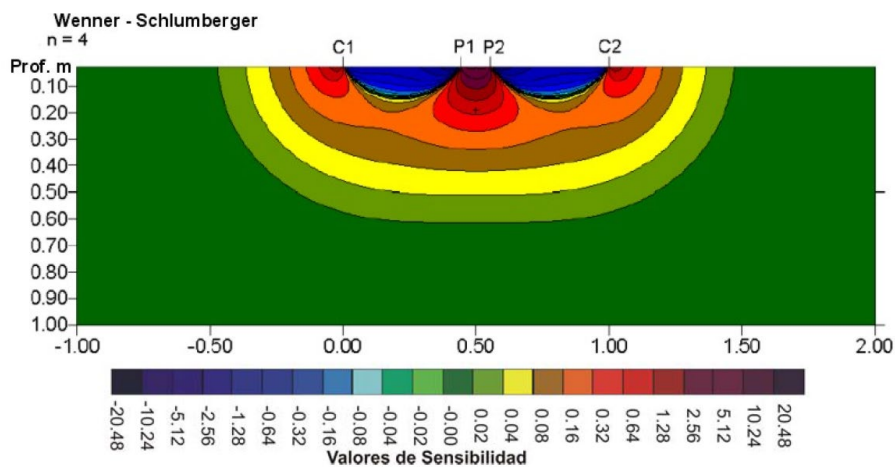


Figura 2.9: Vista de la sensibilidad, arreglo Wenner-Schlumberger.

### WENNER:

Según (Griffiths, et al., 1990), en su trabajo experimental demostró que es arreglo detecta los cambios verticales (E.H.), pero es deficiente en los cambios horizontales (E.V.).

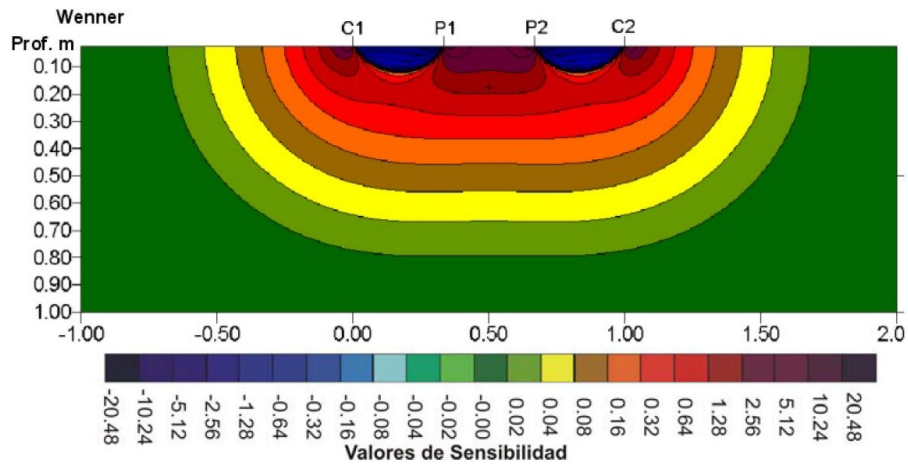


Figura 2.10: Vista de la sensibilidad, arreglo Wenner.

### POLO-POLO

El método consiste en la separación muy alejada de un electrodo potencial y de corriente, ello presenta un gran ruido telúrico, este ruido afecta las señales de los datos. Según Li y Oldenburg 1992. Este arreglo nos permite hacer una modelado 3D.

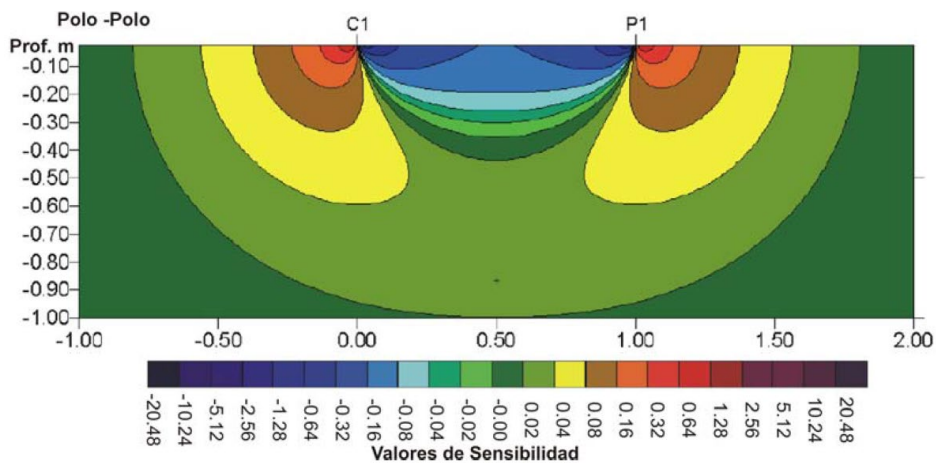


Figura 2.11: Vista de la sensibilidad, arreglo Polo-Polo

### POLO – DIPOLO

La adquisición de los datos de este arreglo presenta mejor resolución que el arreglo Dipolo-Dipolo y que Polo-Polo (menor ruido telúrico). Este arreglo, elimina el resultado de la asimetría mediante una adquicion directa e inversa.

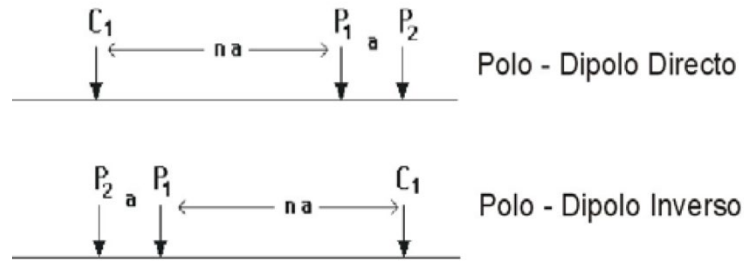


Figura 2.12: Arreglos Polo-Dipolo (Directo) y Polo-Dipolo (Inverso).

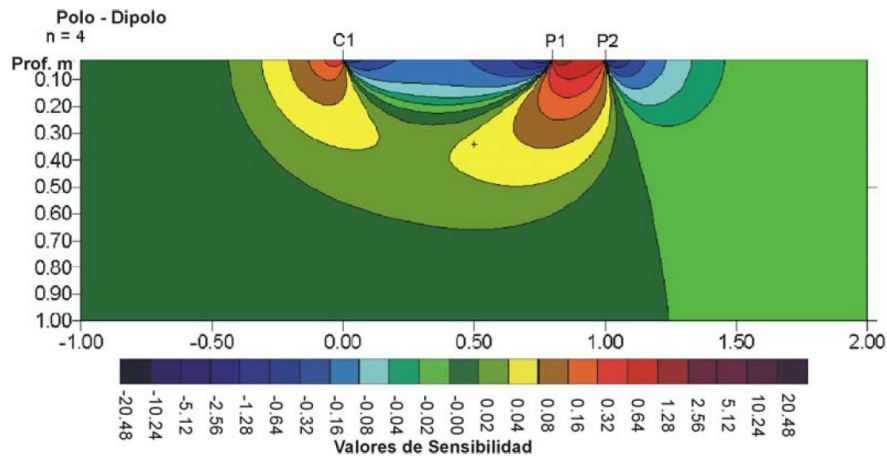


Figura 2.13: Vista de la sensibilidad, Polo-Dipolo.

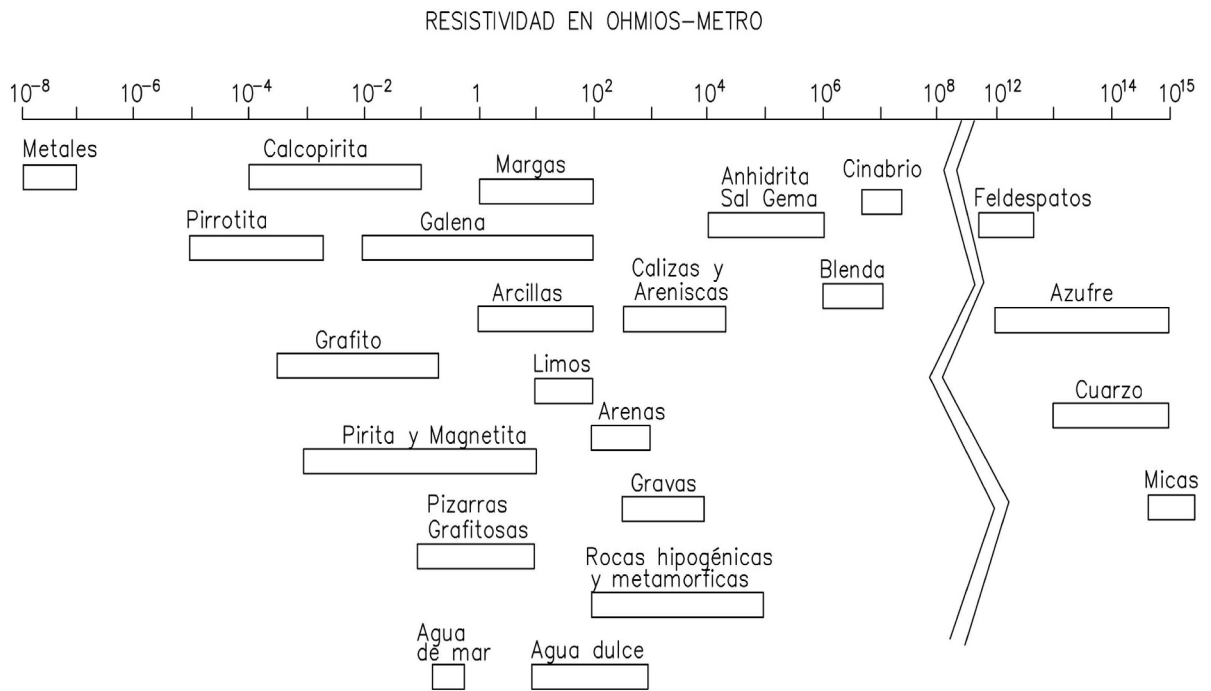
### 2.2.5. Algunos factores

Según Ward, 1990, muestra algunos factores que afectan a la resistividad del suelo, tenemos: La saturación, poros, salinidad, temperatura, cambios geológicos, arcilla, variedades de rocas, etc.

La asociación entre la saturación y la resistividad, permiten encontrar la presencia de agua. La salinidad, en estado sólido es muy resistiva y en estado líquido presenta una baja resistividad.

Según su formulación empírica para acuíferos libre, Archie, 1942, asocia la resistividad, porosidad o saturación del suelo.

Según Orellana, 1972, muestra algunos valores de resistividad de distintos materiales. Aunque estos valores son referenciales.



**Figura 2.14:** Valores de resistividades de suelos y roca (Orellana, 1972).

### 2.3 Fundamentos teóricos de las Técnicas Electromagnéticas

Las técnicas electromagnéticas, son medidas a partir de las ecuaciones de Maxwell, estas que asocian el campo eléctrico y magnético.

#### 2.3.1. Formulaciones de Maxwell

Según Orellana, 1972, describe la forma diferencial de las manifestaciones electromagnéticas de sus funciones vectoriales ( $\mathbf{t}$ ), ecuaciones 1 y 4, en el dominio del tiempo.

Para entender las manifestaciones en el dominio de tiempo, implicamos las propiedades del medio, el campo eléctrico y magnético y esto lo asociamos con Maxwell (f). Y a ello se le aplicó la transformada de Fourier, según Ward y Hohmann, 1988. Obtenemos lo siguiente:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \hat{\mathbf{x}} \mathbf{H} = 0 \quad (30)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \hat{\mathbf{y}} \mathbf{E} = 0 \quad (31)$$

Harrington, 1961, definió a ( $\hat{\mathbf{x}} = i\mu\omega$ , impedancia) y ( $\hat{\mathbf{y}} = \sigma + i\epsilon\omega$ , admitancia).

#### 2.3.2. Fórmulas de la Onda Electromagnética

Ward y Hohmann, 1988, aplicó el rotacional a la ecuación 1 y 2.

$$\nabla x(\nabla x E) + \nabla x \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0 \quad (32)$$

$$\nabla x(\nabla x H) - \nabla x \left( \frac{\partial D}{\partial t} \right) = \nabla x J \quad (33)$$

Variables  $\varepsilon, \mu, \sigma$ , que no dependen del tiempo.

$$D = \varepsilon E \quad (34)$$

$$B = \mu H \quad (35)$$

$$J = \sigma E \quad (36)$$

Aplicando la 1era y 2da derivada a las formulas 3 y 4, se reducen a:

$$\nabla x(\nabla x E) + \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (37)$$

$$\nabla x(\nabla x H) + \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (38)$$

Las siguientes fórmulas se dedujeron de 37 y 38, para  $E$  y  $H$ , en el dominio del tiempo,

$$\nabla^2 E - \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (39)$$

$$\nabla^2 H - \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (40)$$

Para obtener la formulación de Helmholtz, se usa la transformada de Fourier (t) en la formulación 39 y 40, se obtiene:

$$\nabla^2 E + (\varepsilon \mu \omega^2 - i \omega \mu \sigma) E = 0 \quad (41)$$

$$\nabla^2 H + (\varepsilon \mu \omega^2 - i \omega \mu \sigma) H = 0 \quad (42)$$

Cuando se tiene una frecuencia muy pequeña, entonces se tiene un tipo cuasi estacionario, partiendo de las formulaciones 39 y 40, se obtiene:

$$\nabla^2 E - \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (43)$$

$$\nabla^2 H - \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (44)$$

Para el dominio de la frecuencia, tenemos:

$$\nabla^2 E - i \omega \mu \sigma E = 0 \quad (45)$$

$$\nabla^2 H - i \omega \mu \sigma H = 0 \quad (46)$$

Las formulaciones anteriores en el dominio del tiempo y frecuencia.

### 2.3.3. Condición de frontera

Para, Ward y Hohmann, 1988, se tiene la condición de frontera en:

- Campo magnético normal  $B_n$ , del medio 1 al 2, es constante.

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (47)$$

- Desplazamiento dieléctrico normal  $D_n$ , es constante, por la densidad de carga eléctrica  $\sigma_n$ :

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma_n \quad (48)$$

- Campo eléctrico tangencial  $E_t$ , es constante:

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (49)$$

- Campo magnético tangencial  $H_t$  es constante:

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (50)$$

- Densidad de corriente normal  $J_n$  es constante:

$$J_{n1} = J_{n2} \quad (51)$$

### 2.3.4. Resultado de las Fórmulas de las Ondas

Considerando el primer resultado de una onda plana variable en el tiempo. Se obtiene:

$$E(t) = E_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \varphi)} \quad (52)$$

$$H(t) = H_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \varphi)} \quad (53)$$

Siendo:

$$\gamma = \alpha - \beta i;$$

$E_0$ : Amplitud, onda E.

$H_0$ : Amplitud, onda H.

$\beta$ : Factor de fase

$\alpha$ : Factor de atenuación

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (54)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (55)$$

Los factores de fase y atenuación  $(\alpha, \beta)$ , se reducen en:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (56)$$

Reemplazando,  $\gamma$  en la formulación 56, y luego en las formulas 52 y 53, lo que resulta en:



$$E = E_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \quad (57)$$

$$H = H_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \quad (58)$$

Al estudiar las formulaciones anteriores, concluimos que cuando aumenta la profundidad  $\delta$ , el factor de atenuación  $\alpha$ , disminuye en la misma proporción, por lo que quedaría:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = (2/\mu\sigma\omega)^{1/2} = 503.8(1/f\sigma)^{1/2} \quad (59)$$

$$Z_d = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \quad (60)$$

Siendo:

$\sigma$ : Conductividad (S/m),

$f$ : Frecuencia (Hz)

$t$ : Tiempo (s)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ : Permeabilidad Magnética

### 2.3.5. M.E. en el dominio del Tiempo y Frecuencia

Hay dos tipos de técnicas para separar los campos primario y secundario, según se trabaje con el tiempo o con la frecuencia.

- **TDEM (Dominio del Tiempo EM)** Se emite un campo primario y se corta, para generar un campo secundario, en este campo se analiza como disminuye el voltaje con el tiempo.
- **FDEM (Dominio de la Frecuencia EM)** Se analiza las componentes primarias y secundarias, que se encuentran en fase y en cuadratura. Al aumentar o disminuir la frecuencia, obtenemos una profundidad de investigación variable de las ondas.

Ambas técnicas, se desarrollan en los ítems 2.4 y 2.5.

## **2.4 Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT**

### **2.4.1. Introducción del TDEM**

Este método se aplicó con éxito apartir de los años 80. Este método no utiliza electrodos, solo es a través de un campo magnético variable. Consiste en medir el decaimiento del voltaje con el tiempo del campo magnético secundario.

Del decaimiento obtenemos información de la resistividad del subsuelo, luego podemos interpretar esos valores e indicar ciertas anomalías geológicas.

La profundidad de investigación de este método podría ser muy superficial y viceversa. Este método es aplicable a problemas de ingeniería con mucho éxito.

La limitación del método radica en: Sistemas y Líneas Eléctricas, Formaciones geológicas de alta resistividad, Tormentas Eléctricas y Magnéticas, etc.

#### **Objetivo del método**

El objetivo principalmente radica en la sensibilidad de detectar valores de conductividad, a través de este parámetro físico podemos identificar la composición del agua en  $\mu S/cm$ . El método nos permite analizar lo siguiente:

- Presencia de agua subterránea, (recarga hídricas profundas).
- Profundidad del sustrato rocoso.
- Localización de fracturas y fallas para el modelado geológico correlacionado a túneles/minería, proyectos de infraestructura profunda, estudio de deslizamientos, etc.

### **2.4.2. Sondaje Electromagnético en el dominio del tiempo TDEM**

La técnica nos da una información del subsuelo teniendo como parámetro principal la conductividad, para ello se requiere un trasmisor y un receptor, esto nos permite formar un bucle, que a la vez está asociado a la profundidad de investigación.

En las siguientes imágenes se muestra: Flujo de corriente transitoria en el suelo (Figura 2.15 a y b) y Configuración de campo TDEM (Figura 2.16).

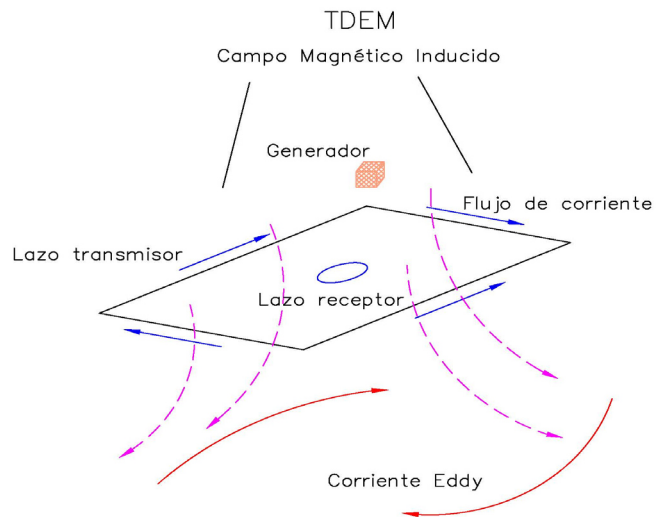


Figura 2.15a: Diagrama de flujos de corrientes

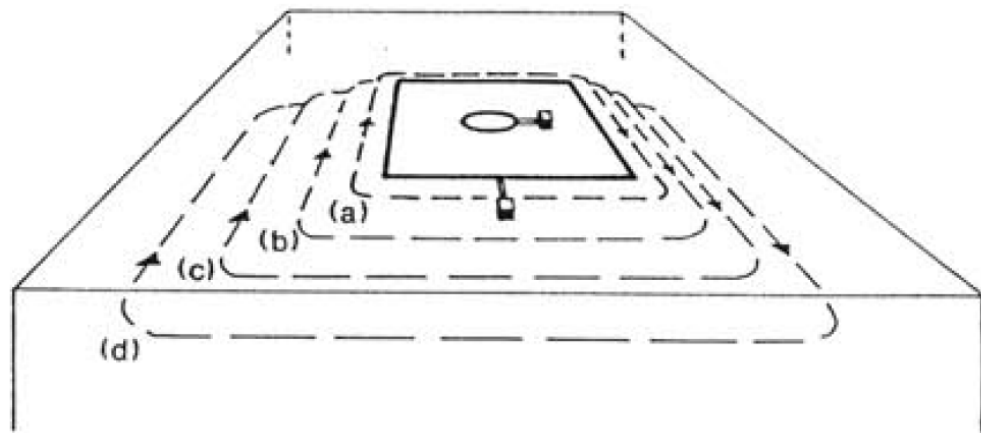


Figura 2.15b: Flujo de corriente transitoria en el suelo. (a) Justo después de que el transmisor se apague. (b) - (d) En tiempos progresivamente posteriores.

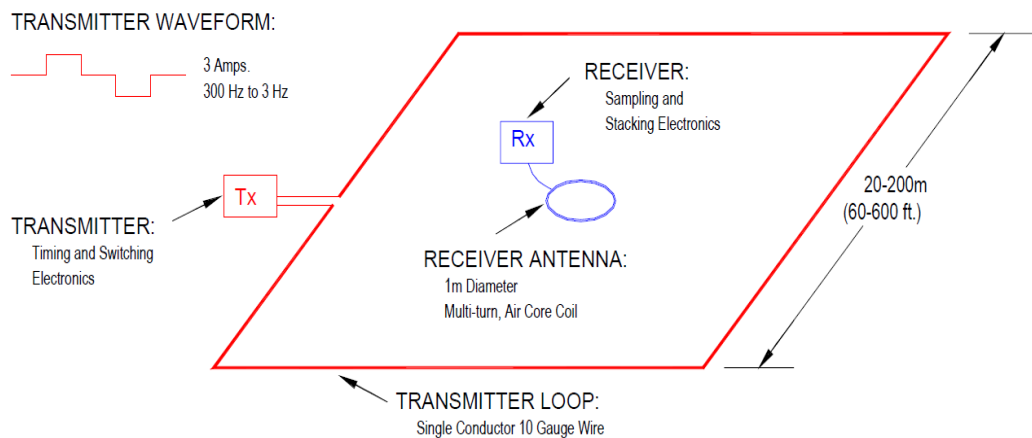


Figura 2.16: Configuración de campo TDEM - Typical Central Loop Configuration

El funcionamiento del SEDT, sería de la siguiente manera:

1. Se crea un campo magnético primario al pasar la corriente ininterrumpida por el bucle.

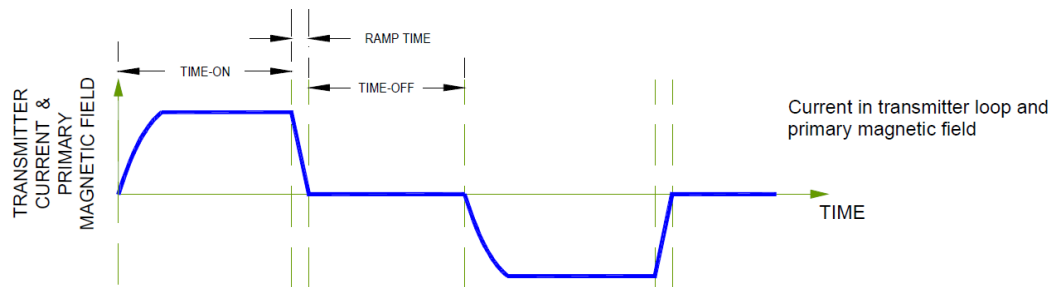


Figura 2.17: Campo primario (McNeill, 1990).

2. Cuando se produce un corte de corriente (campo primario) de forma rápida, se genera una inducción, que se transmite por el suelo de forma superficial y a profundidad.

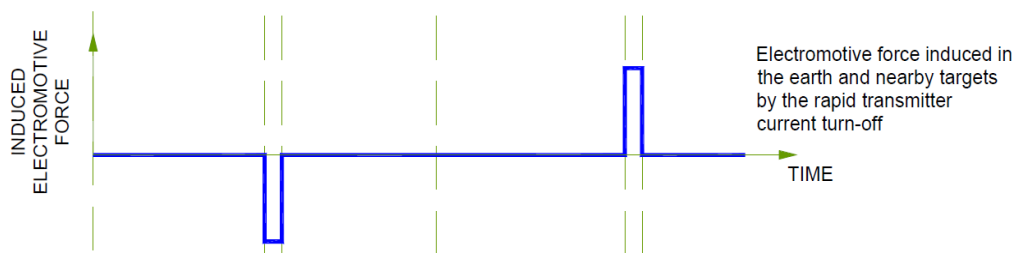


Figura 2.18: Inducción de corrientes eléctricas (McNeill, 1990).

3. De lo anterior, la inducción de corrientes circula en forma de espiral y en profundidad, esta inducción desciende con el tiempo, generando un campo secundario.

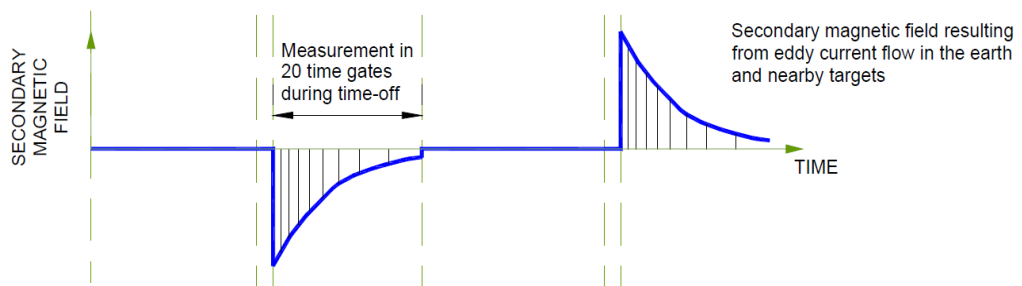


Figura 2.19: Campo secundario (McNeill, 1990).

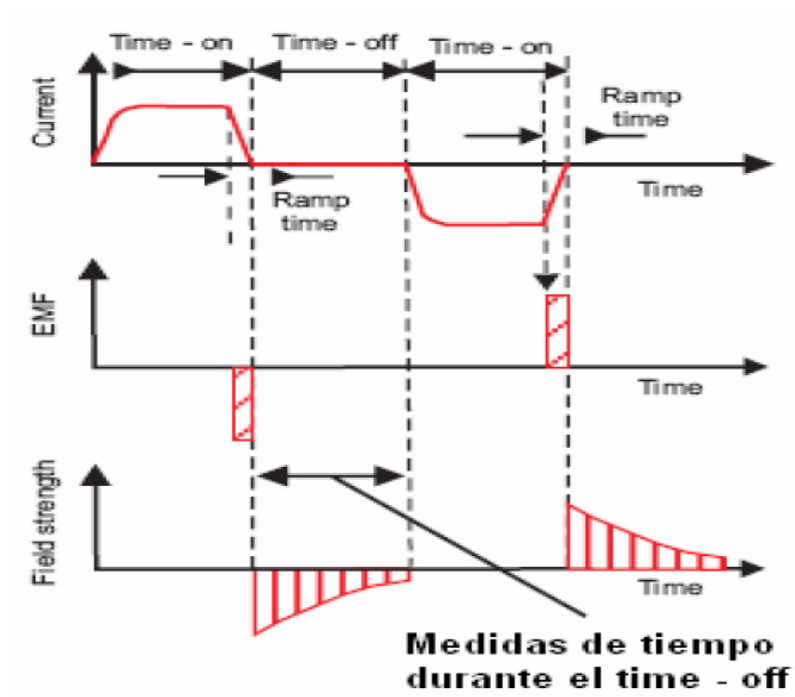


Figura 2.20: Esquema de corriente, EMF y campo secundario, en el tiempo (Navarro Luna, 2006)

Del punto 3, se obtiene el campo secundario, y este emite un voltaje que disminuye con el tiempo, si es rapido la descarga, presenta una resistividad superficial y viceversa.

Resumen de la propagación de las corrientes inducidas:

1. Luego de la anulación de corriente del campo primario.

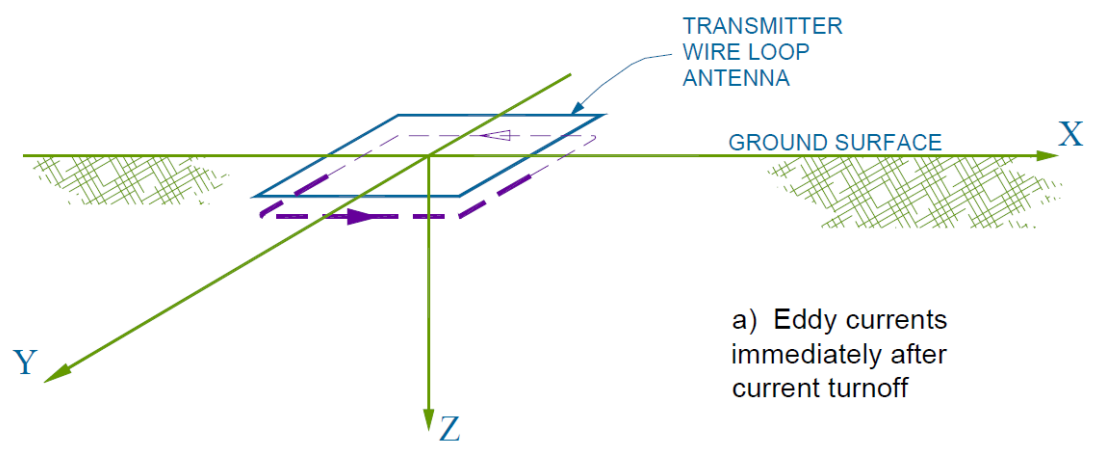


Figura 2.21: TDEM Eddy Current Flow - early time (McNeill, 1990).

2. Al pasar un cierto tiempo.

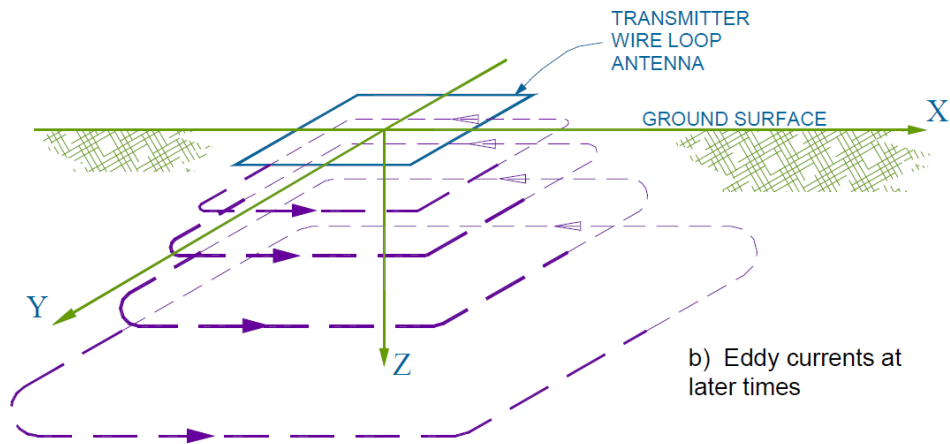


Figura 2.22: TDEM Eddy Current Flow - late time (McNeill, 1990).

3. La Figura muestra, para distintos tiempos la variación de la Inducción corriente vs la profundidad.

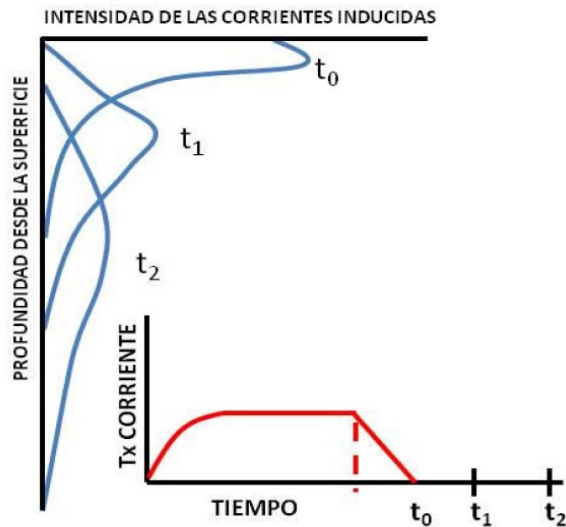


Figura 2.23: Inducción corriente vs la profundidad, con tiempos variables (Navarro Luna, 2006).

### 2.4.3. El principio Método TDEM

Usamos la ecuación de Faraday, debido que al no ser constante el campo eléctrico, este genera una inducción electromagnética (Por lo que, e: campo eléctrico y b: campo magnético).

$$\nabla \times e = - \frac{\partial b}{\partial t} \quad (61)$$

El momento es proporcional al campo primario, a la vez que el campo primario, no provee datos del suelo (Por lo que: I corriente, n: # vueltas,  $A_{loop}$ : área de bucle).

$$M = InA_{loop} \quad (62)$$

La disminución del campo secundario genera una fuerza electromotriz (Por lo que, K: constante del trasmisor, A= área del bucle de lectura y N: # vueltas).

$$E = K \cdot A \cdot N \quad (63)$$

Las corrientes eléctricas se propagan hacia los costados y en profundidad, formando un ángulo de 30°. La profundidad en un tiempo determinado ( $\mu$ : permeabilidad y  $\sigma$ : conductividad):

$$Z_d = \left(\frac{2t}{\mu\sigma}\right)^{1/2} \quad (64)$$

De su Tesis “Pedro C, 2013”, deduce que la profundidad es proporcional a la resistividad. Así mismo, depende del momento y del ruido.

$$Z_{last} = \left(\frac{2}{25\pi^3}\right)^{1/10} \left(\frac{M}{\sigma V_{noise}}\right)^{1/5} \quad (65)$$

Según, Christensen, 1995, indica que el ruido en el registro podría eliminarlo, esto sucede debido al tenue voltaje vs tiempo prolongado, este problema podría superarse, aumentando el Stack (mejora, el ruido-síñal).

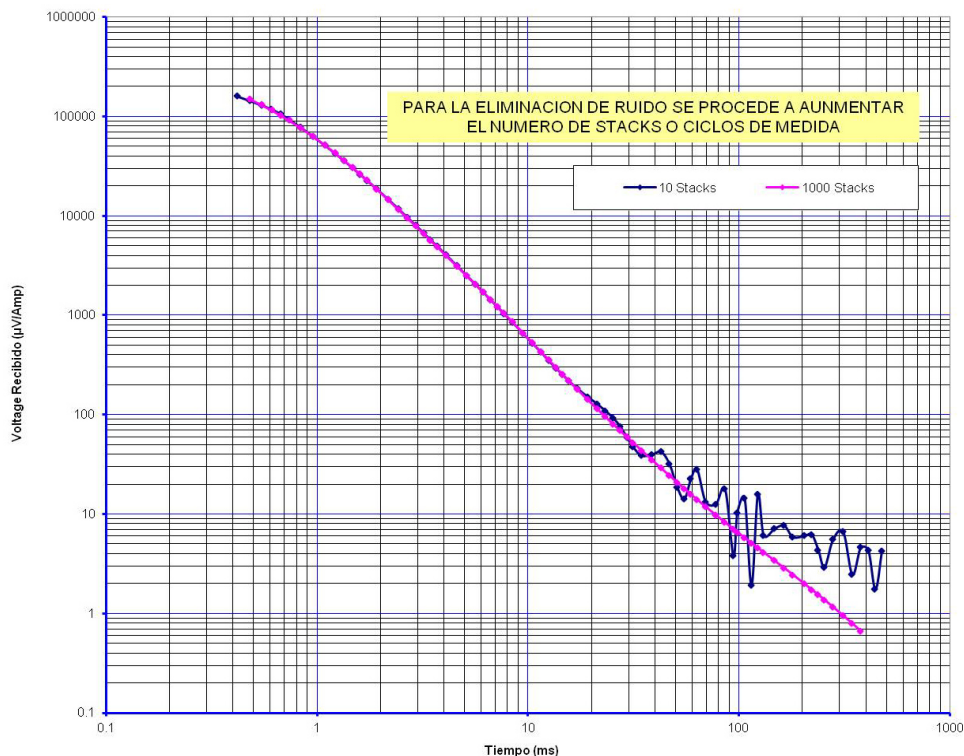


Figura 2.24: Se muestra el aumento de 10 Stack vs 1000 stacking mejorando notablemente la curva (Pedro C., 2013).

De lo anterior Christensen, 1995, deduce que profundidad es inversamente proporcional a la conductividad.

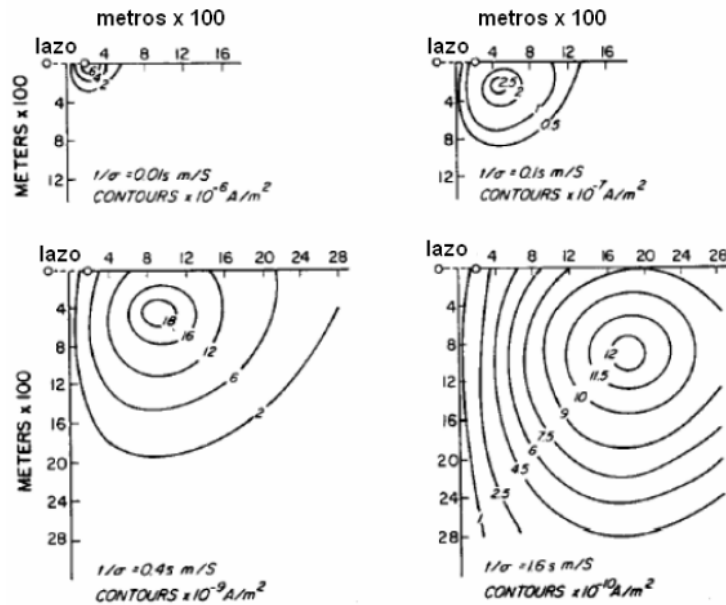


Figura 2.25: Se muestra que la profundidad es I.P. a la conductividad

Al inicio de las medidas, estas concentran las corriente en estratos someros (Resultado Skin), posteriormente estas corrientes alcanzan altas profundidades con el tiempo. En la práctica, para suelos resistivos la profundidad, es doble del bucle. Y Suelos conductores la profundidad es proporcional al bucle.

#### 2.4.4. Resistividad aparente en TDEM

De la Información del Campo Secundario, se obtiene el voltaje vs el tiempo de descarga. A la vez este voltaje puede ser: temprana, intermedia y tardía (De la ecuación,  $M = I_{Trasmisor} \times \text{Área}$ , K: constante, t = tiempo,  $\sigma$ : conductividad, V: Voltaje).

$$V(t) = \frac{K_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}} \quad (66)$$

De lo anterior se desprende que SEDT, es más sensible a las bajas resistividades ( $\sigma=1/\rho$ ):

$$\rho_a(t) = \frac{k_2 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}} \quad (67)$$

En la gráfica observamos  $\rho_{aparet.}$  vs time, y su perfil unidimensional.



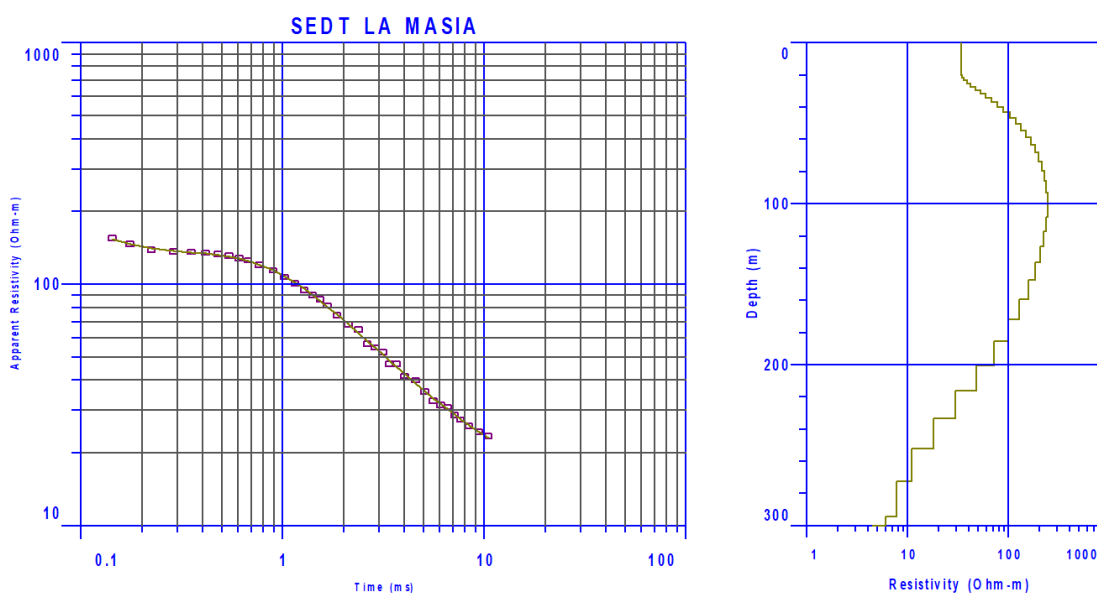


Figura 2.26: Resistividad de materiales asociadas a arcilla, margas menores a 10 Ohm.m (SED T, Técnicas Geofísicas SL.)

De la gráfica anterior se deduce que las bajas resistividades menores a 10 ohm.m, pertenecen a suelos conductores y viceversa a suelos de moderada a alta resistividad.

#### 2.4.5. Configuraciones - TDEM

El método SEDT puede emplear múltiples configuraciones del bucle emisor (Tx) y receptor (Rx) (figuras 2.27).

##### **BUCLE COINCIDENTE (COINCIDENT LOOP)**

Dispositivo compuesto por dos bucles (uno emisor (Tx) y otro receptor (Rx) 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. La curva tiende a ser afectado con ruido.

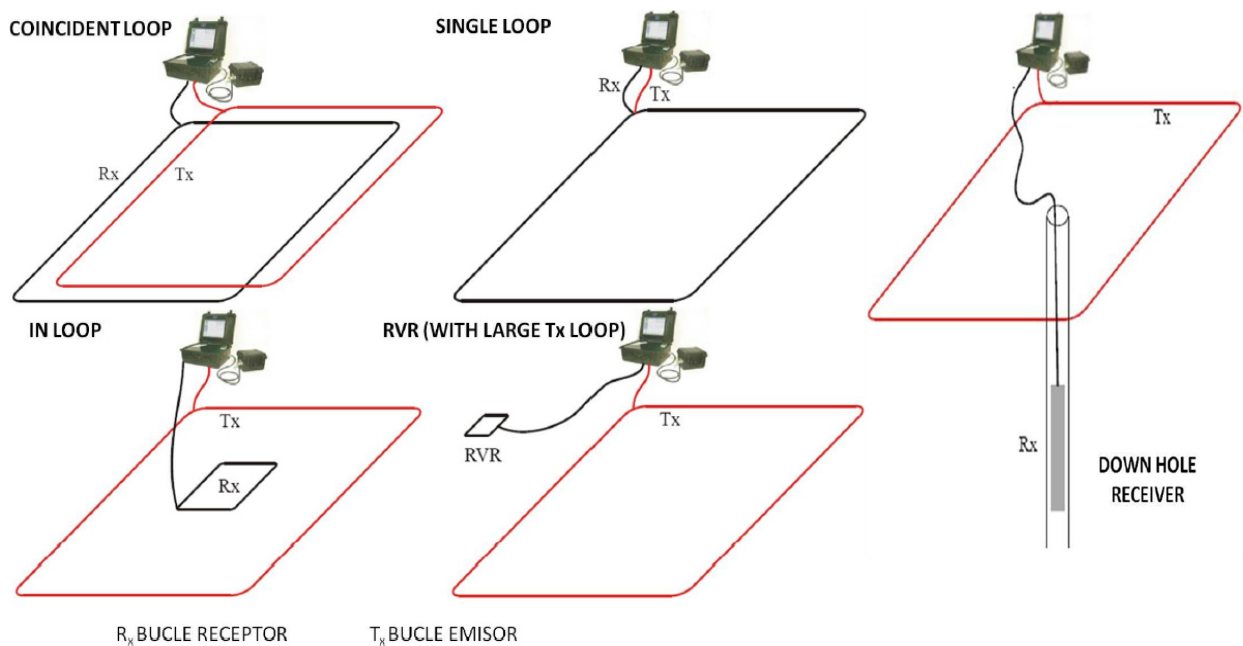


Figura 2.27. Configuraciones del sistema SEDT y DOWN-HOLE (Manual de operaciones del Equipo TerraTem)

### IN LOOP

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

### RVR (Con bucle emisor Tx 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 (Tx) rodeando el sondeo haciendo descender un receptor (Rx) por el mismo a profundidades crecientes. El dispositivo presenta una elevada sensibilidad permitiendo determinar pequeñas variaciones de conductividad con la profundidad.

## 2.5 Dominio de la Frecuencia EM

### 2.5.1. Introducción

Estas técnicas son bastantes rápidos y tiene diferentes aplicaciones, así mismo se pueden realizar desde aviones o barcos. Estos pueden ser:

- Por un campo natural o artificial.

➤ El espacio entre el campo emisor y el receptor, pueden ser cerca o lejano. En esta investigación nos centraremos, al campo artificial y cercano (FDEM), para ello se requiere de un operario, para que emita el campo con el trasmisor, al ser, así podemos variar parámetros como la profundidad y frecuencia entre otros.

### **Objetivo FDEM**

El objetivo principal del estudio es obtener los datos de resistividad del suelo en las secciones, y estos se podrán analizar con los cambios importes de los mismos.

### **2.5.2. Funcionamiento del Método**

Para este método (FDEM), se requiere dos antenas, una transmisora y otra receptora, y a la vez que sean móviles.

Atraves del trasmisor se emite un campo primario  $H_p$ , formando un ángulo con las partes magnética y eléctrica, así mismo es normal a la difusión de la onda.

Cuando este campo magnético primario, atraviesa un material con resistividades muy bajas, este genera una fuerza electromotriz y estas un campo secundario  $H_s$ .

El campo resultante del campo magnético primario y secundario, darán un desfase de la amplitud y fase, con respecto al primario. Este desfase contiene datos de la resistividad y las dimensiones del material.

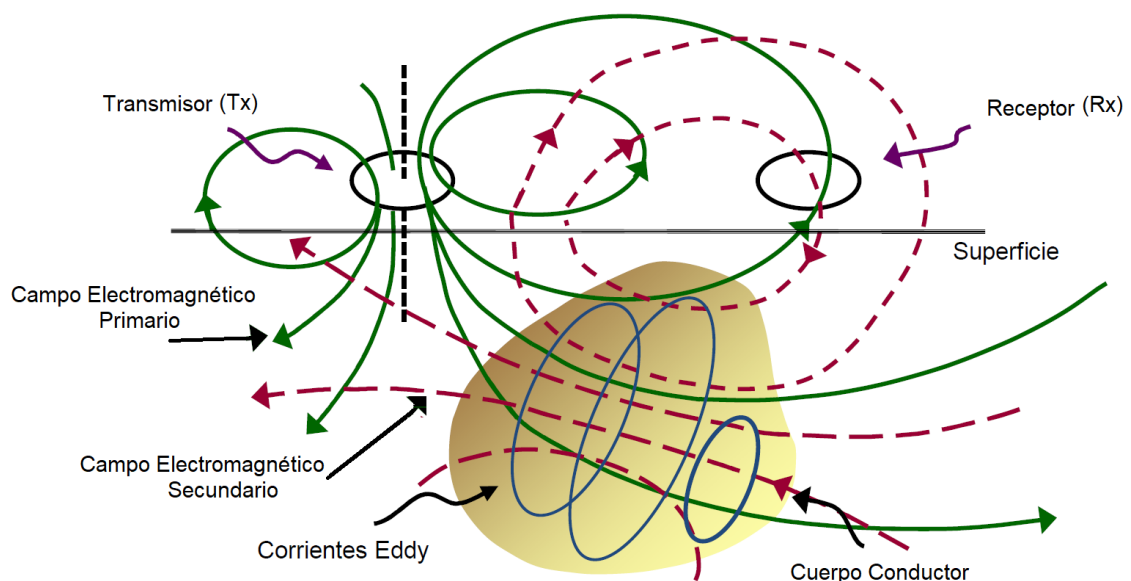


Figura 2.28: Proceso de detección del Cuerpo Conductor (Reynolds, 2011).

### 2.5.3. Fundamento eléctrico

#### Polarización

Para el análisis de este método se considera al suelo como un circuito equivalente RLC (Resistencia, Inductancia y Capacitor). El voltaje alterno aplicado tiene la forma de una onda senoidal con una frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$ , una amplitud máxima  $E_0$  que varía en el tiempo como:

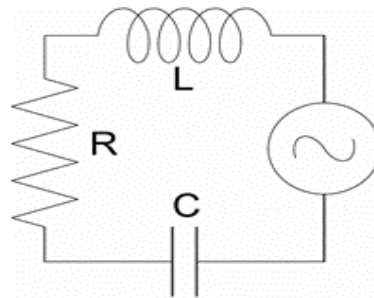


Figura 2.29: Circuito eléctrico básico que contiene capacitancia (C), inductancia (L) y resistencia (R), los tres componentes eléctricos que describen el comportamiento equivalente del suelo (Reynolds, 2011)

La amplitud (E) de una tensión alterna está dada por:

$$E = E_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (68)$$

La corriente (I) dentro del circuito equivalente (ver Figura 2.29) se describe por:

$$I = E_0 \{ [\omega L - (1/\omega C)]^2 + R^2 \}^{-1/2} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (69)$$

Donde  $\varphi = \arctg [\omega L - (1/\omega C)]/R$ , L:Inductancia, C:Capacitancia, R:Resistencia.

(I) tiene entonces un atraso de fase  $\varphi$  con respecto al voltaje aplicado.

El campo magnético primario P tiene la forma  $P = P_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$  (Figura A), o  $P = P_0 \cdot \text{cos}(\omega t)$ .

El voltaje inducido en un conductor perfecto, como resultado del campo magnético primario incidente, se atrasa  $90^\circ$ .

El voltaje es proporcional a la razón del campo primario y secundario, según las leyes de Faraday de la Inducción Electromagnética. Entonces el voltaje inducido será cero cuando el campo magnético sea máximo o mínimo (Figura B).

Las corrientes Eddy ( $e_s$ ) inducidas toman un cierto tiempo para generarse en un conductor. Este tiempo se manifiesta como un atraso  $\alpha$ , que dependerá de

las propiedades eléctricas del conductor. Será un gran atraso para buenos conductores y pequeño para malos (Figura C).

Una vez generado el campo secundario, interactúa con el primario para formar el campo magnético resultante, el cual tendrá un atraso total  $\phi$  respecto del primario (Figura D).

La relación entre los campos primario P, secundario S y la resultante R, así como las componentes real (en-fase)  $R\cos\phi$  y la imaginaria (fuera de fase o cuadratura)  $R\sin\phi$  puede ser representada en forma vectorial. Se les llama real e imaginaria cuando el ángulo de fase es  $0^\circ$  ó  $90^\circ$  respectivamente. Esta representación no es la relación espacial de las direcciones de los campos y la rotación en sentido anti-horario significa atraso en el tiempo.

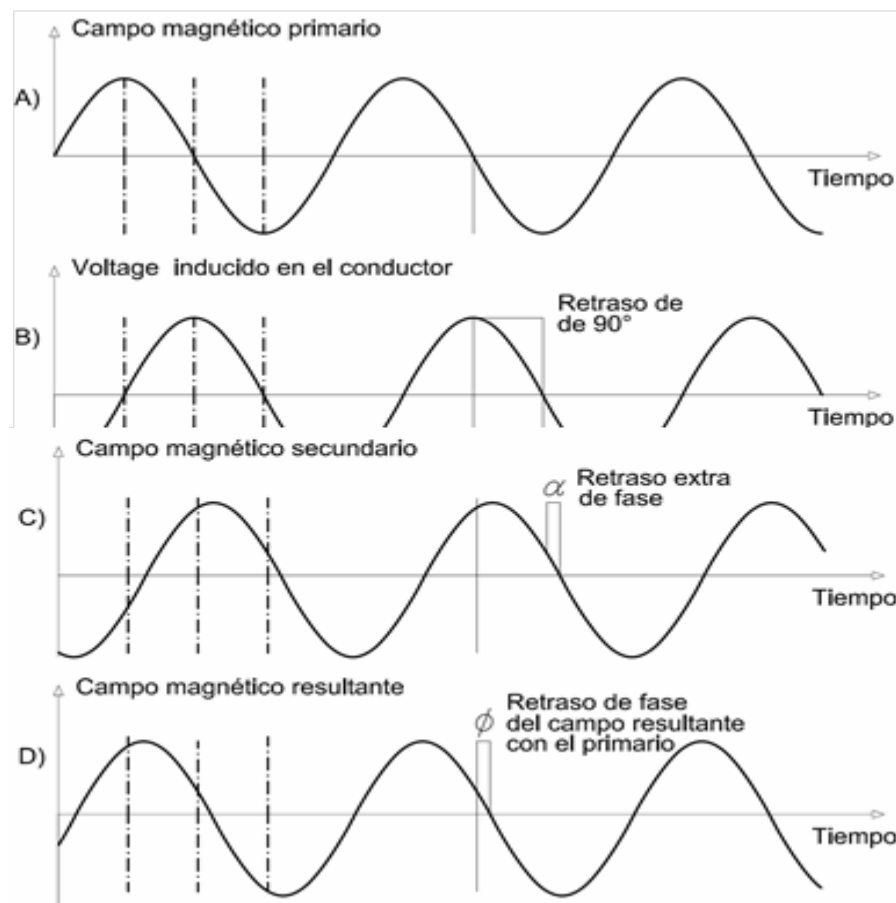


Figura 2.30: Relaciones entre los voltajes inducidos y los retardos de fase asociados entre los campos magnéticos primarios, secundarios y resultantes (Beck, 1981).

Vemos que el voltaje inducido por las corrientes Eddy ( $e_s$ ) se atrasa  $90^\circ$  respecto del primario, y el campo magnético secundario S se atrasa además un

ángulo  $\alpha$ , es decir que S se atrasa  $90^\circ + \alpha$  respecto de P y R tiene un atraso  $\phi$  respecto de P.

El campo secundario S a su vez puede ser descompuesto en sus componentes horizontal  $S_x = S \sin(\alpha)$  (real) y vertical  $S_y = S \cos(\alpha) = R \cos \phi$  (imaginaria), las que pueden determinarse según el equipo de medición utilizado. La relación entre las intensidades de estas componentes tiene que ver con la tangente del ángulo de fase  $\alpha$ . Pero esta relación varía con la posición del punto de observación respecto del conductor en el subsuelo y con la frecuencia del campo primario.

En el receptor, se realizó la medición de las partes de la tensión inducida, generándose dos tensiones referenciales cuyas fases difieren en  $90^\circ$  para compararlas con la tensión desconocida. Esto se logra con circuitos adecuados denominados compensadores, que en síntesis permiten medir la amplitud y fase del campo resultante, así como las intensidades de los campos real e imaginario.

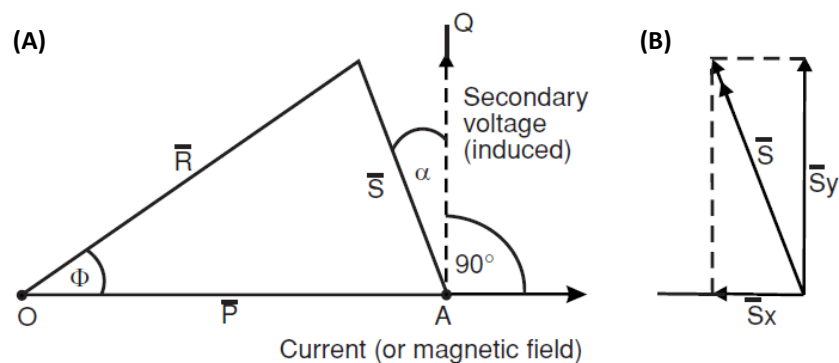


Figura 2.31: (A) Diagrama vectorial que define las magnitudes y las relaciones de fase de los campos primario y secundario. (B) Las componentes vectoriales del campo secundario en términos de la tensión secundaria ( $S_y$ ) y el campo magnético actual o primario ( $S_x$ ) (Reynolds, 2011).

### Polarización Elíptica

Los vectores P y S difieren en fase un ángulo  $(\pi/2 + \alpha)$  y espacialmente un ángulo  $\beta$ , y su combinación produce un campo magnético polarizado elípticamente. Las operaciones matemáticas utilizando ondas senoidales son las siguientes:

El campo primario  $P(t)$  viene dado por:

$$P(t) = P = P_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (70)$$

El campo secundario  $S(t)$  está dado por:

$$S(t) = S = S_0 \cdot \text{sen}[\omega t - (\pi/2 + \alpha)] = S_0 \cdot \text{cos}(\omega t - \alpha) \quad (71)$$

Donde  $P_0$  y  $S_0$  son funciones de la geometría del transmisor, el conductor y el receptor.

La resultante  $R$  siempre existe, varía en magnitud y está rotando en el espacio. La punta de este vector describe una elipse conocida como elipse de polarización y su eje mayor estará inclinado un ángulo  $\theta$  con la horizontal. Un método EM aprovecha este parámetro y es conocido como el método de inclinación.

Cuando el campo secundario sea debido a un buen conductor,  $\alpha \rightarrow \pi/2$ , y la diferencia de fase será prácticamente de  $180^\circ$ . Para el caso de un conductor muy pobre,  $\alpha \rightarrow 0$ , y el secundario estará desfasado solo  $90^\circ$ . Entonces la presencia de un conductor hará que  $S$  esté desfasado entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$  respecto de  $P$ .

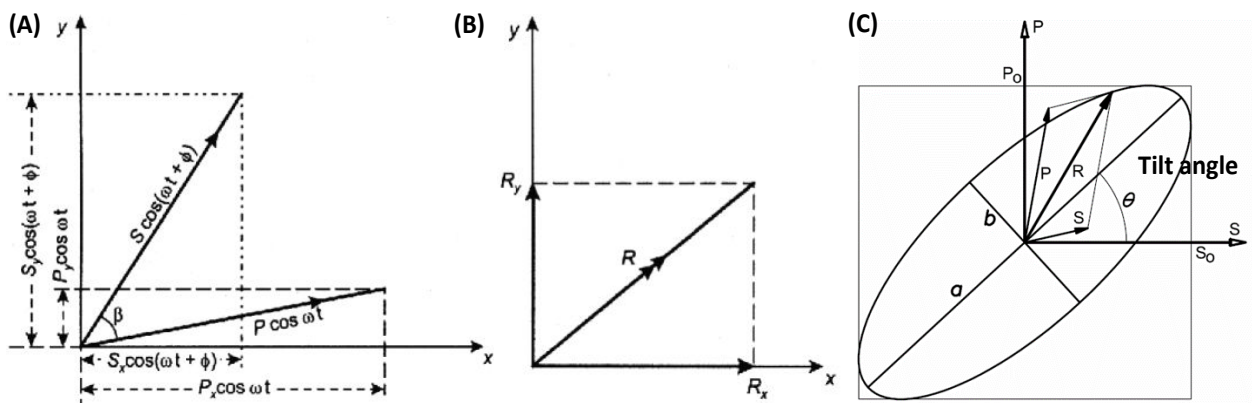


Figura 2.32: (A) Campo secundario orientado en el espacio en un ángulo  $\beta$  al campo primario. (B) Las componentes horizontales y verticales  $R_x$  y  $R_y$  de la resultante de la suma de los campos primario y secundario. (C) La elipse de polarización inclinada en el ángulo de inclinación  $\theta$  a la horizontal (Reynolds, 2011).

Para eliminar  $(\omega t)$  desarrollamos  $S$  en función de  $P$  haciendo:

$$\begin{aligned} \text{cos}(\omega t - \alpha) &= \text{cos}(\omega t) \cdot \text{cos}(\alpha) + \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\alpha) = \sqrt{1 - (P/P_0)^2} \cdot \text{cos}(\alpha) + \\ &(P/P_0) \text{sen}(\alpha) = S/S_0 \end{aligned} \quad (72)$$

Elevando al cuadrado y reordenando queda:

$$\frac{P^2}{P_0^2} + \frac{S^2}{S_0^2} - \frac{2PS \text{sen}(\alpha)}{P_0 S_0} = \text{cos}^2 \alpha \quad (73)$$

$$\frac{P^2}{P_0^2 \text{cos}^2(\alpha)} + \frac{S^2}{S_0^2 \text{cos}^2(\alpha)} - \frac{2PS \text{sen}(\alpha)}{P_0 S_0 \text{cos}^2(\alpha)} = 1 \quad (74)$$

Que es la ecuación de una elipse de la forma  $Lz^2 - 2Mxz + Nx^2 = 1$ , cuyo eje mayor está inclinado un ángulo  $\theta$  con el eje horizontal en nuestro caso. Es decir,

$$tg(2\theta) = \frac{P_0 S_0 \text{sen}(\alpha)}{S_0^2 - P_0^2} \quad (75)$$

#### 2.5.4. Profundidad de penetración de radiación EM

Es de gran importancia en la investigación EM, la consideración de la profundidad de penetración de la radiación EM y la resolución en función de la profundidad.

En un medio resistivo isotrópico, las ondas electromagnéticas viajarían de forma prácticamente indefinida. Sin embargo, en el mundo real, donde las conductividades de la superficie son significativas, la profundidad de penetración suele ser muy limitada, dado que está asociado con frecuencia y la conductividad, en las cuales las ondas electromagnéticas deben propagarse. En las frecuencias usuales (<5 kHz) utilizadas en la exploración EM, los efectos de atenuación son prácticamente insignificantes, pero las pérdidas de señal se producen por difusión. La profundidad de penetración se conoce como profundidad de Skin, que se define (Sheriff, 2002) como la profundidad a la que la amplitud de una onda plana ha disminuido a  $1/e$  o 37% con respecto a su amplitud inicial  $A_0$ . La amplitud de la radiación EM en función de la profundidad (z) relativa a su amplitud original  $A_0$  viene dada por:

$$A_z = A_0 e^{-z/\delta} \quad (76)$$

La profundidad skin  $\delta$  (en metros) viene dada por:

$$\delta = (2/\omega\sigma\mu)^{1/2} = 503(f\sigma)^{-1/2} \quad (77)$$

Donde;  $\omega = 2\pi f$  (radianes /s), f: frecuencia,  $\sigma$ : conductividad, y  $\mu$ : permeabilidad magnética  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ . Una estimación realista de la profundidad a la que un conductor daría lugar a una anomalía electromagnética detectable es  $\approx \delta/5$ .

#### Parámetros medidos – FDEM

Medidas:

- Conductividad aparente
- Componente real (in phase) (till)
- Componente imaginaria, (Out of phase) (elipticidad)



- Amplitud y fase del campo secundario

### **Conductividad aparente**

#### **Relación entre el campo inductor, inducido y la conductividad aparente**

Relación entre el espacio de la espira transmisora-receptora y espesor Skin  $\delta$  (m), si  $N \ll 1$ , entonces estamos trabajando con baja inducción ( $\sigma_a$ : conductividad).

$$N = \frac{s}{\delta} = S\sqrt{(\mu_0\omega\sigma_a/2)} \quad (78)$$

De lo anterior, si  $N \ll 1$ , entonces habrá una razón directamente proporcional entre ( $H_S/H_P$ ) y ( $\sigma_a$ : conductividad), según (McNeill, 1980).

$$\frac{H_S}{H_P} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma_a s^2}{4} \quad (79)$$

$H_S$ , Valor del campo secundario

$H_P$ , Valor del campo primario

$\omega = 2\pi f$ , pulsación eléctrica

$\mu$ , Permeabilidad magnética en el espacio

$\sigma_a$ , Conductividad aparente ( $1/\Omega m$ ) (*Siemens/m = S/m*)

$s$ , Separación entre las bobinas (10, 20, 40 m, etc.)

La conductividad aparente del terreno es proporcional a la relación entre el campo secundario y el primario.

### **Componente real e imaginaria**

Angulo de inclinación (componente real) y Elipticidad  $E = b/a$  (componente imaginaria). La Figura 2.32C, muestra la elipse de polarización inclinada en el ángulo de inclinación  $\theta$  a la horizontal.

- **Componente real**, aporta datos sobre la geometría del cuerpo detectado y a grandes rasgos si se trata de un buen o mal conductor.
- **Componente imaginaria**, determinar el grado de conductividad del cuerpo en cuanto a la clasificación de bueno, muy bueno o malo, según su mayor o menor grado de conducción (cualitativamente).

## **Amplitud y fase del campo secundario**

Desfases de la tensión inducida, del campo secundario y del campo resultante. De la figura 2.30c, podemos decir que el material de baja resistividad, afecta al campo secundario, por lo que, existe un desfase entre el campo primario y secundario.

### **2.5.4. Forma de Ubicación de las antenas**

La ubicación entre las dos antenas transmisoras y receptoras es principalmente:

**1) Transmisor Inmóvil:** Como el nombre lo dice, aquí solo se moviliza la antena receptora. También le dicen inclinación y compensador.

**2) Transmisor y Receptor Movibles:** Aquí ambas antenas se movilizan con un espacio invariable, los más conocido son: Turam, Slingram y VLF.

**Un breve resumen de los métodos, según la ubicación de las antenas.**

#### **Inclinación**

Aquí el plano de la antena sintoniza con el campo, entonces la señal se anula, para hallar la inclinación de la antena, este debe estar sobre una base que nos permite ubicar los ejes ortogonales.

#### **Compensador**

Como el método anterior, no nos daba una precisión óptima, además el proceso se debía hacer de forma pausada, este método agrego un compensador, que consigue no hacer ruido, y por lo tanto equilibra las tensiones. Así es como se logra cuantificar el ángulo de inclinación y la elipticidad, en el receptor.

#### **Turam**

Es mejor que el método compensador, debido que no requiere cables. La profundidad de investigación es somera, pero ello podría mejorar al variar el espaciamiento entre las antenas de 10 a 20m. Estas antenas son horizontales, para registrar la información en la vertical, midiendo la razón entre la amplitud y fase (diferencia de los registros de las antenas).

## **Slingram**

Este método es el más conocido, entre las antenas que tienen un desplazamiento contiguo, con un espacio entre ellas de 30 a 100m. El registro con señales de amplitud hacen referencia que están entre un material de baja resistividad, así mismo el análisis de la profundidad y dimensiones, se realiza con curvas que son distribuidas por el fabricante. Estas trabajan como dipolo horizontal y vertical.

## **Very Low Frequency - VLF**

Esta metodología, es la única que usa transmisores potentes de radio (cuadro 1.1), así mismo, por esta antena (3kHz a 30kHz, frecuencias muy bajas) se trasmite corriente alterna, que fluye de arriba a abajo y en sentido contrario, ello genera un campo primario en forma de círculo horizontal, debido a las frecuencias muy altas.

En esta tesis utilizaremos la disposición de las bobinas del Método EM de Emisor y Receptor móvil, realizando el Método Very Low Frequency – VLF, que se explica en el ítem 2.5.5.

### **2.5.5. Very Low Frequency – VLF**

#### **2.5.5.1. Antecedentes del método**

El Método Very Low Frequency – VLF, 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).

Por otro lado tiene su base teórica en la prospección geofísica, principalmente en el método electromagnético: VLF notando que utiliza frecuencias extremadamente bajas.

#### **Objetivo del método**

El método geofísico Very Low Frequency (VLF) es un método rápido de reconocimiento que se utiliza para localizar fracturas con posibilidad que contenga con agua y otros contrastes de conductividad en el subsuelo, localización de cavidades, estudios de contaminación y localización de cuerpos mineralizados.

### **2.5.5.2. Método de prospección con VLF**

Para la técnica de VLF se requiere de frecuencias muy bajas en el orden entre 3 - 30 KHz que pueden ser detectadas a miles de kilómetros, y que son utilizadas para la prospección geofísica de zonas fracturadas, agua subterránea, contaminantes y minerales (Jeng et al., 2004; Dutta et al., 2006; Drahor 2006; Ganerod et al., 2006; Zlotnicki et al., 2006; Kaya et al., 2007), determinando características eléctricas de los suelos y de rocas de baja profundidad (Hutchinson y Barta, 2002) donde existe un contraste en la conductividad eléctrica; y se ha utilizado ampliamente desde el decenio de 1960 y originalmente desde 1940, las poderosas estaciones de VLF transmiten señales que viajan alrededor del mundo a través de la ionosfera y la superficie terrestre, para comunicaciones marinas.

La existencia de fallas y fracturas en un medio hidrogeológico contribuye a mejorar la conductividad hidráulica y su porosidad, y actúan a su vez como estructuras de control del movimiento del agua subterránea (Sharma y Baranwal, 2005; Adepelumi et al., 2006). Esto a su vez ocasiona perturbaciones en las señales medidas con instrumentos VLF.

La señal que emana de las antenas alrededor del mundo y que pueden ser captada en campo por medio de instrumentos VLF y que según la teoría básica electromagnética a largas distancias de la fuente la longitud de onda se aproxima a una onda plana (Zlotnickia et al., 2006), y es una combinación de un campo primario ( $H_p$ ) que al desplazarse en fase frente a un cuerpo conductor este se convierte entonces en la fuente de un campo secundario (Kaya et al., 2007). Es decir, las corrientes en el conductor son generadas cuando las ondas de radio (campo electromagnético) pasan a través de un conductor enterrado (por ejemplo una fractura), creando un campo electromagnético secundario (Figura 2.33).

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

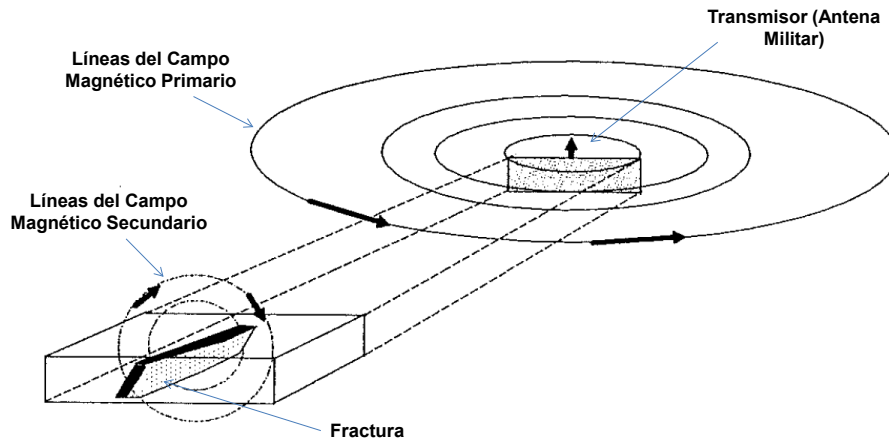


Figura 2.33: Diagrama esquemático del principio VLF (ABEM WADI, Interpretation Guide).

La amplitud, de la componente en fase y Out of phase, respecto al campo primario ( $H_p$ ), sería la componente en real o en fase y la componente imaginario o cuadratura, respectivamente (Eze et al., 2004).

Antenas radio trasmisoras en diferentes países para utilizarlo con el Very Low Frequency:

Location	Designation	Frequency (kHz)	Power (kW)
Bordeaux, France	FUO	15.1	500
Rugby, Great Britain	GBR	16.0	750
Helgeland, Norway	JXN	16.4	350
Gorki, USSR	ROR	17.0	315
Moscow, USSR	UMS	17.1	1000
Yosamai, Japan	NDT	17.4	500
Oxford, Great Britain	GBZ	19.6	550
Annapolis, USA	NSS	21.4	400
Northwest Cape, Australia	NWC	22.3	1000
Hauderfehn, V. Germany	DMB	23.4	
Laulualei, Hawaii, USA	NPM	23.4	600
Buenos Aires, Argentina	LPZ	23.6	
Cutler, Maine, USA	NAA	24.0	1000
Seattle, USA	NLK	24.8	125
Aguada, Puerto Rico	NAU	28.5	100

Cuadro 1.1: Países que pueden encontrarse transmisores (ABEM WADI, Interpretation Guide).

La antena transmisora emite ondas electromagnéticas generando campos eléctricos y magnéticos (sus componentes E y H, se muestra en la figura 2.34), así mismo se encuentra en un rango de frecuencias muy bajas de 3 a 30khz. En la siguiente figura, se muestra el campo eléctrico y magnético.

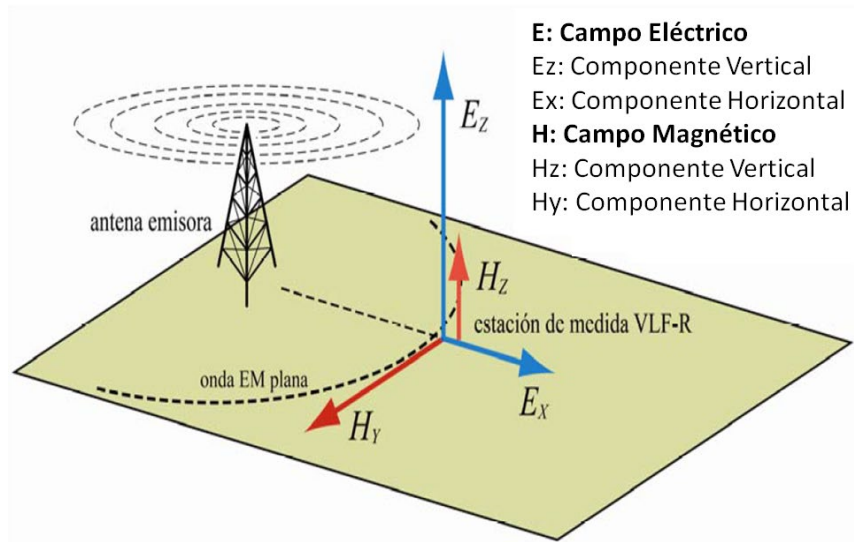


Figura 2.34: Ubicación de ejes, E y H, antena transmisora - Very Low Frequency (Pedro Martínez, 2006).

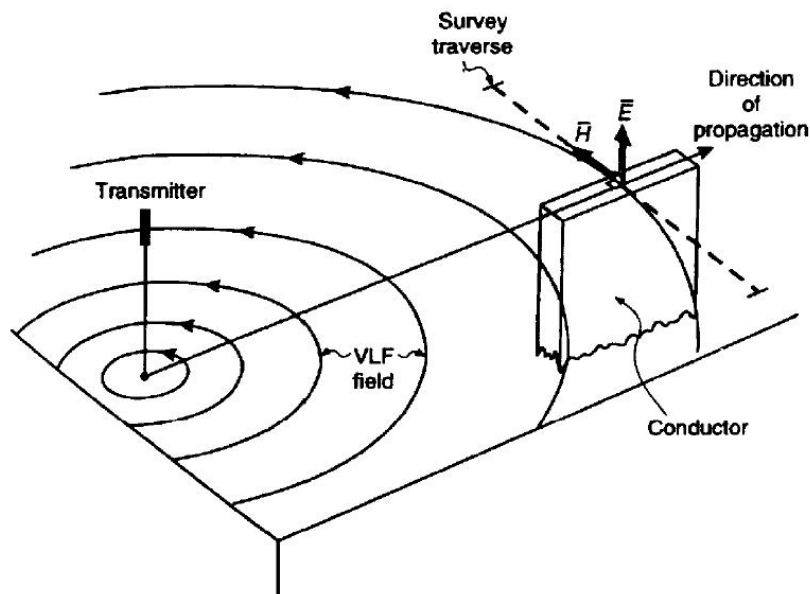


Figura 2.35: Esquema de funcionamiento del sistema VLF (Ogilvy y Lee, 1991).

Cuando un material de resistividad muy baja, está excitado mediante un campo primario, este transfiere una corriente inducida, obteniendo el campo secundario. Esta diferencia de campos genera un desfase, es por ello que la resultante de  $H_p$  y  $H_s$ , proyectan una elipse prolongada en sentido del campo primario (polarizado elípticamente).

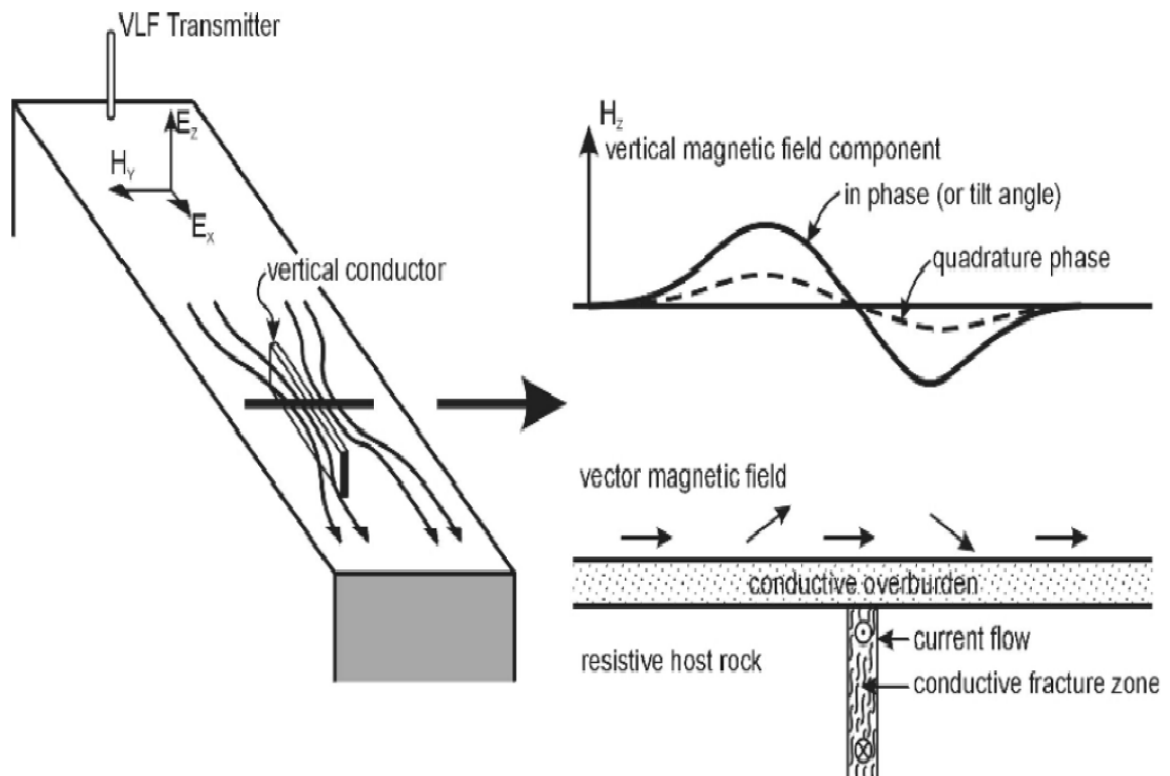


Figura 2.36: Izda. Componentes del campo EM de una emisora remota de VLF y corrientes eléctricas en la superficie. Derecha. Componentes del campo eléctrico a lo largo del perfil que cruza perpendicularmente la fractura (Ogilvy y Lee, 1991).

De lo anterior podemos concluir que los factores importantes son la elipticidad y polarización Elíptica (Inclinación).

### 2.5.5.3. Tipos básicos de interpretación de datos VLF

El instrumento encuentra en función del porcentaje la correspondencia entre las componentes reales e imaginaria, este desfase en el registro asocia el material geológico por la baja resistividad (ver figuras 2.39 y 2.40).

En primer lugar, los datos brutos recogidos en el campo pueden interpretarse sin más reducción de datos. Al trazar los componentes "real" e "imaginario" del campo magnético frente a la distancia a lo largo de un perfil transversal, se pueden revelar zonas de alta conductividad eléctrica.

En varios casos, estas curvas pueden ser muy difíciles de interpretar, por lo que se pueden utilizar técnicas de filtrado para mejorar los datos y facilitar la identificación de los cruces de ángulo de inclinación.

Las partes "real" e "imaginaria" son las presentadas en las gráficas (utilizando el software Ramag v2.2) y su interpretación puede especificar los

diferentes tipos de datos VLF que se pueden adquirir. La parte "real" siempre mostrará un pico positivo sobre un conductor, mientras que la parte "imaginaria" puede mostrar un pico positivo o negativo, dependiendo de las condiciones de la capa de sobrecarga. A continuación se indican algunos tipos de datos VLF asociados con zonas de falla / fractura (Figura 2.37 y 2.38) (ABEM WADI, Guía de Interpretación).

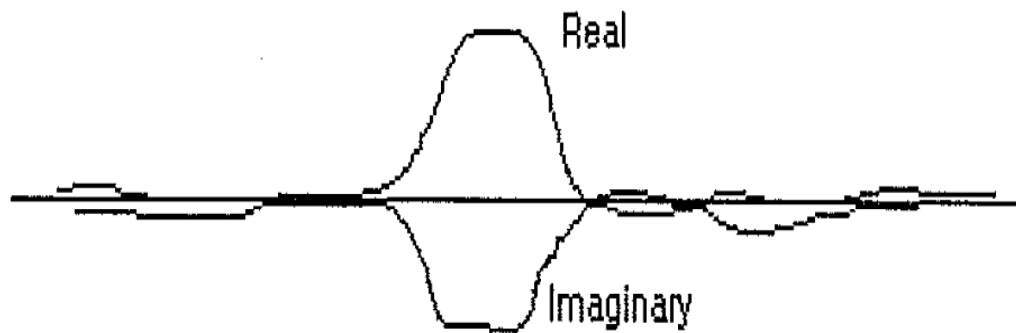


Figura 2.37: La zona falla / fracturada, se identifica en la parte "real" como una curva anómala. En la parte "imaginaria" no se detecta anomalía (valores cercanos a 0). Esto se observa en zonas conductoras, caracterizadas por un material con alta resistividad. Esta gráfica es típica para representar una zona de falla / fractura con una estructura llena de agua dulce (Manual de Abem Wadi).

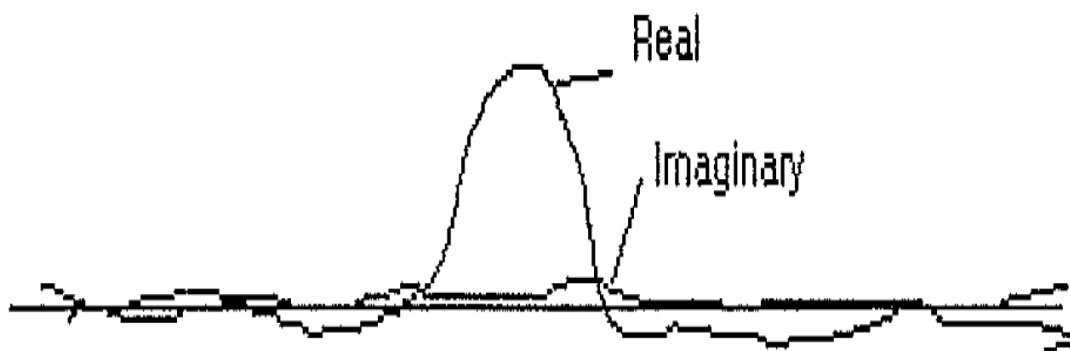


Figura 2.38: La zona falla / fracturada se identifica en la parte "real" como una curva anómala. En la parte "imaginaria" hay una anomalía simétrica detectada en los valores negativos. Esto se debe a la presencia de buenas zonas conductoras. Esta gráfica es típica para representar una zona de falla / fractura con una estructura llena de agua salina (Manual de Abem Wadi).



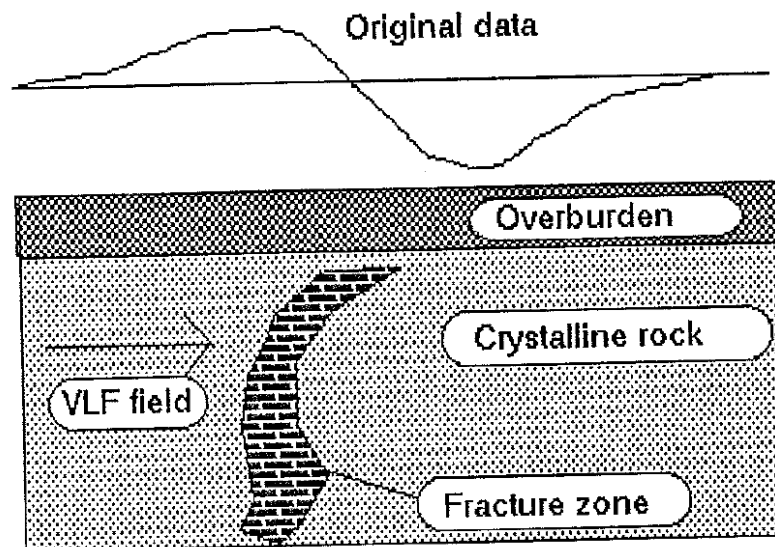


Figura 2.39: Anomalía típica en VLF – Data original (Abem Wadi manual).

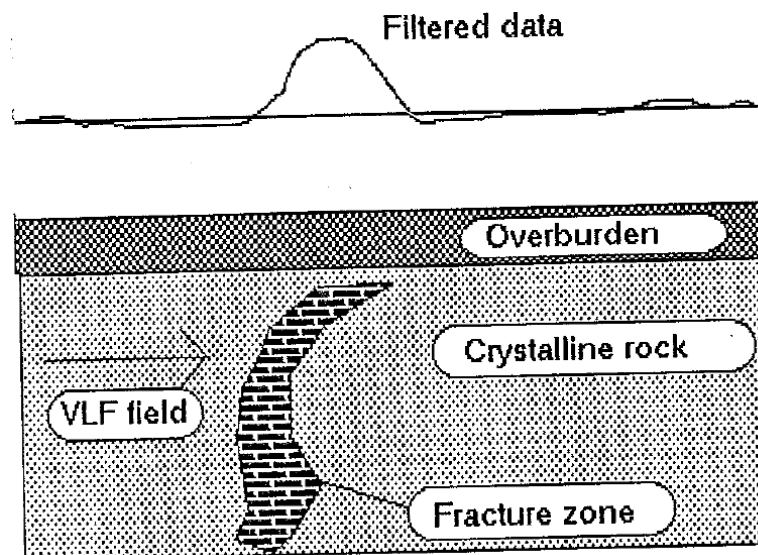


Figura 2.40: Anomalía típica en VLF – Data filtrada (Abem Wadi manual).

#### 2.5.5.4. 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 anti simétrico, 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:

$$I_{(0)} = K(-0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3) \quad (80)$$

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 de densidad de corriente se puede usar de forma independiente para hallar la componente imaginaria y real, de los materiales de baja resistividad a una profundidad determinada. 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.

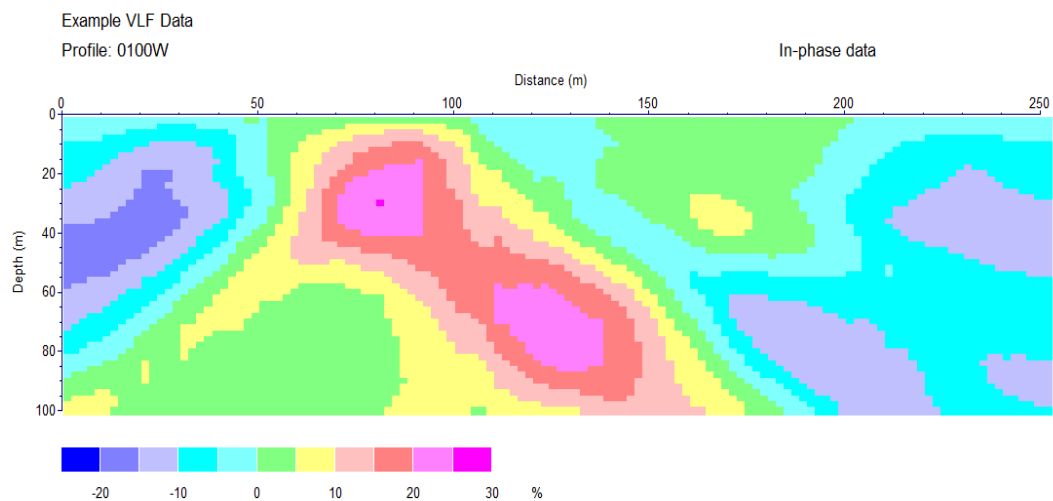


Figura 2.41: Perfil Very Low Frequency.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN

#### 3.1 Técnicas para resolver el problema:

##### a) Revisión de información disponible

Este ítem inicia revisando toda la información disponible y/o antecedentes de la zona de estudio, informaciones secundaria, estudios directos, otros.

##### b) Medición de Campo

De acuerdo a la fase previa de la revisión de información, antecedentes de la zona de estudio se plantea la ejecución de líneas de tomografía eléctrica, Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT y Transmisores Remotos Very Low Frequency Method (VLF), según sea el caso se aplica el método que contribuiría mejor para prospección de acuíferos dependiendo mucho del material geológico a investigar. En las figuras siguientes se muestra: Figura 1.2, Ubicación de las líneas geofísicas (Tomografía Eléctrica y SEDT) para un T.M. Alcalá de la provincia de Cádiz, Figura 1.3, Ubicación de las líneas geofísicas (SEDT) en el Término Municipal de San Jorge y la Figura 1.4, Ubicación de las líneas geofísicas (VLF) en el Término Municipal de Casas del Puerto de Villatoro.

##### c) Levantamiento de Datos Geofísicos

Para el levantamiento de datos geofísicos depende mucho de los parámetros de adquisición y/o observación de la data en campo según sea el método a aplicar. Para el aseguramiento de la calidad (QC) de la Tomografía Eléctrica, se considera un  $Q=0$ . Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT: Evitar ruidos en la curva de resistividad aparente, aumentar número de staking y de los Transmisores Remotos Very Low Frequency Method VLF: asegurar de captar la señal electromagnética y/o utilizar el radio transmisor, para ello colocara con el equipo VLF en forma perpendicular al campo magnético primario.

##### d) Equipos Geofísicos

En el ítem 3.2.1 se muestra el equipo y los accesorios necesarios para la ejecución del ensayo de tomografía eléctrica.

En el ítem 3.3.1 se muestra el equipo y los accesorios necesarios para la ejecución del Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT.

En el ítem 3.4.1 se muestra el equipo y los accesorios necesarios para la ejecución del Método Electromagnético en el Dominio de Frecuencias (Very Low Frequency – VLF).

e) Tratamientos de Datos.

En el ítem 3.2.2 se muestran dispositivos, profundidad de investigación, procesado de datos, interpretación, ventajas y limitación del método de Tomografía Eléctrica.

En el ítem 3.3.2 se muestra el levantamiento de datos según bucle a usar, procesado de datos, interpretación, ventajas y limitación del TEM.

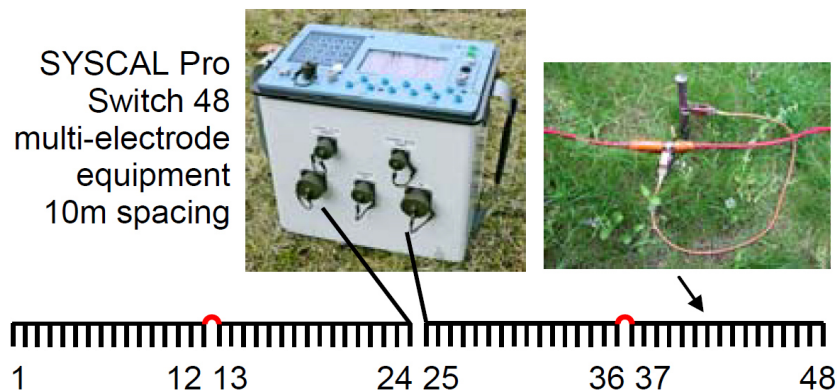
En el ítem 3.4.2 se muestra el levantamiento de datos, profundidad de investigación, procesado de datos, interpretación, ventajas y limitación del Método Very Low Frequency.

### 3.2 Métodos Eléctricos

#### 3.2.1. Instrumento Geofísico

El instrumentó requeriré de lo siguiente:

- **Estacas:** barras de acero o cobre.
- **Potencial:** cables con intervalos de conexión.
- **Uniones:** sirven para conectar la estaca con el cable potencial.
- **Laptop:** con programa de adquisición de datos “Electre\_Pro”, para la configuración del arreglo.
- **Receptor:** esta es la unidad es la que nos permite realizar la adquisición.
- **Fuente:** Sistema de Energización.



**Figura 3.1:** Receptor que conecta los Cables Potenciales y de Corriente “Syscal Pro”.



**Figura 3.2:** Detalle del resistímetro modelo SYSCAL PRO y la batería.



**Figura 3.3:** Conexión entre el electrodo y el cable multiconductor.

### PRINCIPALES CUALIDADES DEL RECEPTOR



**Figura 3.4:** Equipo Syscal Pro

#### Especificaciones Generales

Corriente de salida: 2.5 A

Voltaje de salida de 800v a 1500v

Potencia de salida 250 W

N° Canales de 2 a 10

Voltage precision 0.2 % - 1  $\mu$ V

SP corrección automática

Polarización Inducida medida 20 automáticamente

Fuente: baterías internas y externas

Dimensiones: 31 x 23 x 36 cm

Peso: 13 kg

### **3.2.2. Procedimiento de campo**

#### **3.2.2.1. Programa de la investigación**

Temas a definir con los antecedentes:

- Acotar el motivo requerido.
- Cuantificar los ensayos y Georreferenciación
- Alcance del ensayo a prospectar
- Arreglo, cantidad y espaciamiento.
- Procedimientos del control de calidad.

#### **3.2.2.2. Arreglo y levantamiento de la información**

El inicio de las actividades comienza con: Medida de línea a realizar, Clavado de estacas y conexión al cable, Ubicación del inicio, final y cotas de la línea, así como topografía del proyecto.

El software Electre\_Pro, permite realizar todas las configuraciones para la adquisición de la línea, Terminada la configuración, se transfieren al Syscal\_Pro, este procedimiento automatiza las lecturas.

Durante la adquisición, observamos en el Syscal\_Pro, las resistencias de contacto, debe ser menor a 5kohm en todas las conexiones y verificando el potencial de 2mv.

Luego del levantamiento de datos, se transfiere a la laptop mediante el software PROSYS II, para su tratamiento de la información, análisis e interpretación, con el uso del software RES2DINV.

### **3.2.2.3. Profundidad de investigación**

La estimación de cada punto de resistividad en la vertical es incierta, porque, varía según, el emplazamiento de la estaca y resistividad del material. Edwards, 1977, reporta para capas homogéneas, valores de profundidad. El producto del software res2dinv, luego de tratamiento de datos, nos da un perfil con resistividades reales y su emplazamiento en la vertical.

### **3.2.2.4. Tratamiento adecuado del levantamiento de la información**

Del tratamiento de datos, obtenemos un perfil de resistividad real, logrando la inversión de la resistividad aparente.

Según, Olayinka, 2000, reporta dos modelos de inversión, dado que cada modelo, soluciona deficiencias específicas.

#### **1. Método de Inversión de Bloque**

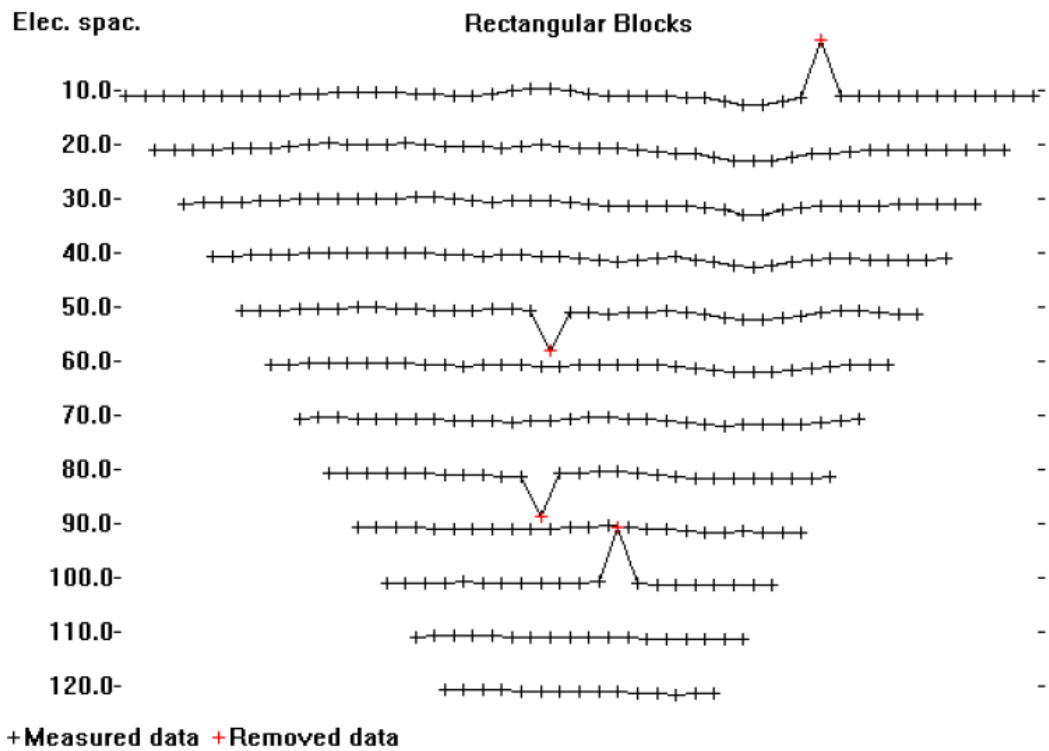
Este método es muy eficiente, para identificar diferencias de resistividad, así mismo, esto permite dimensionar bien los materiales. Pero no es bueno con el paso de fluidos y requiere de un modelo anterior.

#### **2. Método de Inversión con Restricción de Suavidad**

Este método es muy eficiente según deGroot-Hedin, 1990, para identificar pequeñas diferencias de resistividad, así como, el paso de fluidos limpios o contaminados, pero no requiere de un modelo anterior, sustentado por los mínimos cuadrados de Gauss-Newton, pero tiene un elevado costo operativo. Es por ello que, Loke y Barker, 1996a, desarrollan los mínimos cuadrados de cuasi-Newton, que es mucho más rápido, y suaviza los valores de resistividad.

Para la tesis se analizó la información con el programa res2dinv. Se muestra los principales pasos de su proceso de inversión.

1. El software muestra el levantamiento de la información, permitiendo descartar los valores muy desiguales y/o cambios de los puntos entre niveles de la sección.

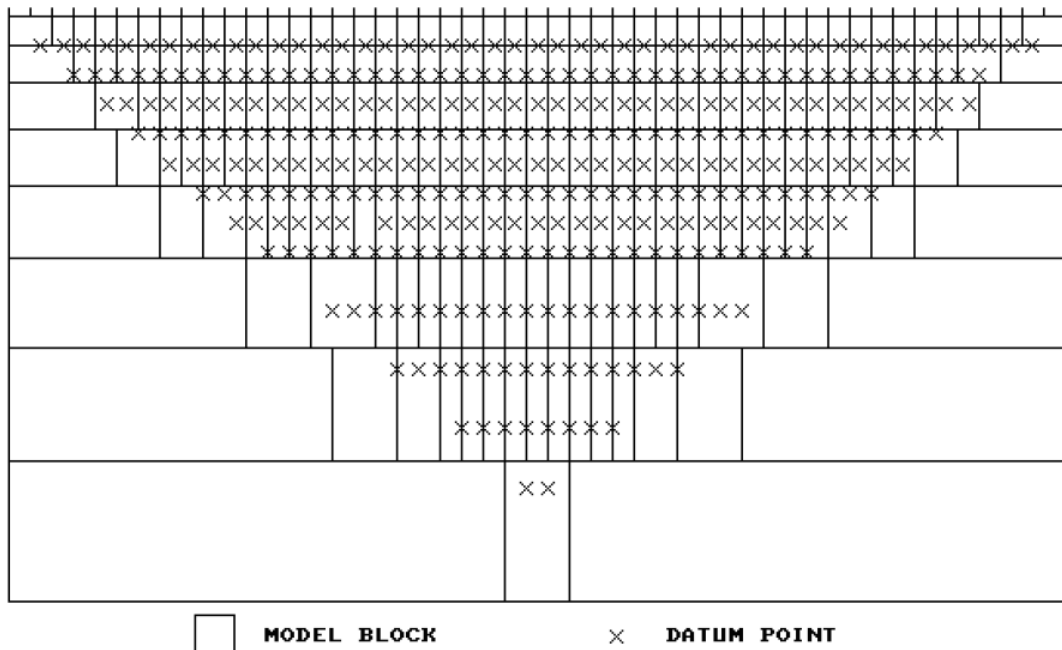


**Figura 3.5:** Eliminación de valores anómalos de la sección (Geoelectrical Imaging 2-D & 3D Geotomo Software).

2. Cambiar los valores del programa, para realizar las corridas o dejarlo en modo automático, esto por lo general va bien.
  
3. El software sintetiza el subsuelo en cuadrados, así mismo procesa los cuadrados con diferencias finitas, la cantidad de cuadrados es menor al registro original, también las dimensiones es mayor con la profundidad.



### ARRANGEMENT OF MODEL BLOCKS AND APPARENT RESISTIVITY DATUM POINTS



**Figura 3.6:** Sintetiza el subsuelo en cuadrados, atreves de análisis numérico (Goelectrical Imaging 2-D & 3D Geotomo Software).

#### 4. Comienzo del modelo:

- El software crea una muestra apartir de los datos de campo.
- Luego de ello se genera una muestra con resistividad aparente, que proviene de la muestra de resistividad real.
- Entonces se coteja la muestra calculada y el de campo.
- Se empieza calculando las aproximaciones a la solución de un problema entre la muestra real y la calculada, logrando que esta disimilitud sea la menor posible (RMS-N°5 Corridas).
- Finalmente el software muestra las tres secciones del proceso, mediada, calculada y la real.

#### 3.2.2.5. Análisis e Interpretación

Los valores de baja resistividad, está asociado a fluidos como el agua, por debajo de la superficie. Estos valores, se pueden interpretar: con la Figura 2.14, características de los suelos y/o rocas y de acuerdo al problema del proyecto.

### **3.2.2.6. Superioridad - Deficiencias**

La Principal Superioridad es:

- Debido que el instrumento de media es muy actualizado, nos permite tener un avance en campo bastante considerable, obteniendo perfiles bidimensionales con mucha nitidez en profundidad y lateral.
  1. Identifica bien los flujos y su geometría.
  2. Identificación de las estructuras geológicas
  3. Identificación de las anomalías sus componentes.
- Un pre procesamiento, podemos analizar in situ.
- Deficiencia - Profundidad superior a 400 m.
- Deficiencia – Trabajo con fenómenos meteorológicos adversos
- Deficiencia – Suelos Muy Resistivos y/o Conductores.

### 3.3 Sondaje Electromagnético en el Dominio de Tiempo SEDT

#### 3.3.1. Instrumento Geofísico

El instrumentó requeriré de lo siguiente:

- **Cables:** en carretes de 100 m a 1000 m de longitud, se conectara cada cable uno detrás de otro formando un cuadrado, para finalmente unirlo al equipo.
- **Unidad central (TERRATEM-10A):** esta es la unidad es la que nos permite realizar la adquisición y lo almacena en su interior.
- **Fuente:** Sistema de Energización.
- **TERRATX-50 External Terratem Transmitter:** esta es la unidad, que nos permite amplificar al campo primario.
- **Batería:** Para alimentar el TERRA TX50, se requiere de 8 baterías en serie para el funcionamiento de todo el sistema con 96v (figura 3.7).



Figura 3.7: Conexión del Equipo TerraTx-50 de Monex GeoScope con sus 8 baterías y su batería de alimentación del equipo.

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO PARA TDEM



Figura 3.8: Equipo Terratem de Monex GeoScope

### Especificaciones Generales

	<b>terraTEM</b>	<b>Options</b>
Transmitter Output	10 Amps. (max.)	<b>Enhanced Transmitter</b>
Receivers	1 Channel	<b>3 Channels (simultaneous)</b>
High Resolution Sampling Rates	500 kHz	-
User Selectable Multiple Time Gates	-	<b>Option</b>
Data Visualisation and Processing in field	Standard Software	<b>Enhanced Software</b>
Storage Device – 1 GB Flash Disk	Standard	-
GPS Receiver – 12 channel	-	<b>Option</b>
Communications – Port for Data Transfer	USB and RS-232 Standard	-
External Synchronisation	-	<b>Option</b>
Continuous Recording (with external GPS Interface)	-	<b>Option</b>
Extra Stacking Options and Gain Functions	10 Selectable Gain Settings from 1 to 8,000	<b>Auto Gain</b>
Vectem 3 Interface Module (down-hole)	-	<b>Option</b>
Interface Options (third party devices)	-	<b>Option</b>
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.		

## EXTERNAL TERRATEM TRANSMITTER



Figura 3.9: Equipo TerraTx-50 de Monex GeoScope

### Especificaciones Técnicas

<b>Output Voltage</b>	24, 36, 72 and 96 Volts DC-selectable	<b>Data Visualisation and Processing in field</b>	Standard Software
<b>Output Current</b>	1 - 50 Amps	<b>Display</b>	Including Battery Voltage, Loop Current, Warnings of Overheating and Short-circuit.
<b>Waveform</b>	Bipolar. 50% Duty Cycle. On time equals Off Time	<b>Cooling</b>	Convection by Heat-sink
<b>Turn-off Time</b>	Depending on Loop Inductance and Current. Only 35 uses on a 100 m loop and 40 A.	<b>Operating Temperature</b>	-20 to +50 degrees C.
<b>Repetition Rate</b>	Controlled by terraTEM to be the same as terraTEM	<b>Operational safety protection</b>	Overvoltage and Short-circuit protection
<b>Synchronisation</b>	Cable or GPS Timing	<b>Dimensions</b>	45 x 32 x 15 cm.
		<b>Weight</b>	10 kg.

### 3.3.2. Procedimiento de campo

#### 3.3.2.1. Programa de Investigación

Temas a definir con los antecedentes:

- Acotar el motivo requerido.
- Cuantificar los sondajes y Georreferenciación
- Alcance del sondaje a prospectar
- Arreglo de bucles, cantidad y espaciamiento.
- Procedimientos del control de calidad.

#### 3.3.2.2. Adquisición y levantamiento de la información

Para realizar este estudio se decidió realizar bucles de 200x200 m. con un área de bobina de 20,000 m<sup>2</sup>, utilizando el arreglo denominado “**SINGLE LOOP**”, es decir el receptor, también es transmisor.

Por otro también se realizó el arreglo denominado “**COINCIDENTE LOOP**”, con un bucle exterior de 200x200 m con un área de bobina de 40,000 m<sup>2</sup> referente a la transmisora de la señal y con un bucle interior de 196x196 m. con un área de bobina de 38,416 m<sup>2</sup> referente a la receptora de la señal.

Con estos arreglos se realizaron 06 sondeos TEM, en las cuales se configuro:

- Ensayo del contacto eléctrico del receptor y emisor.
- Medida de la corriente emitida.
- Separación del ruido aumentando el Stack del instrumento.
- Investigación de la repetición de medidas, profundidad y acumulación de pruebas.

Los sondeos fueran representativos de las condiciones generales del sitio. El tiempo de medición se fijó con una duración entre 40 a 52 ventanas, con la serie de tiempo denominada Early Time del equipo "TerraTEM". Las mediciones se realizaron con ganancias de 1, 4, 16, 32, y 64, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era alto, esto con el fin de aumentar la calidad en la estadística de los datos.

#### 3.3.2.3. Tratamiento adecuado del levantamiento de la información

Se realizó lo siguiente:

- Bajada de la información
- Corrección de la curva de voltaje vs tiempo.
- Transformación de (voltaje a resistividad) vs tiempo.
- Corremos el programa para generar un modelo con estratos
- Afinamos el modelo-Occam
- Obtenemos el perfil unidimensional
- Ejecución de secciones, planos en planta de la resistividad.

El tratamiento de datos se realizó en gabinete. Para la colocación de las áreas en el programa, se usó un GPS en campo, mientras que la elevación fue tomada de las cartas topográficas “Cartografía y datos geográficos” del IGN-España.

Para el procesamiento se realizó lo siguiente:

- Instrumento Geofísico - Terratem – Tx50
- Software TEM Plot Terra TEM: para el proceso primario de los datos y/o conversión de formatos de los mismos.
- Programa IX1D v3, By Interpex Limited, Golden Colorado-USA: Sondeos y Perfiles.
- Electre pro v02, Designed by IRIS Instruments
- Surfer v9, Surface Mapping System. Golden Colorado, Software: mapas en planta.
- Voxler V4, Golden Colorado, Software: para utilizarlo como base de datos e interpolarlo para obtener pseudoimágenes en 3D.

El resultado final de un sondeo TEM es una curva de voltaje versus del tiempo, la descarga de esta curva nos da la información de la resistividad del suelo.

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 procesamiento conjunto basado en algoritmos específicos (Spiker Algorithm. Smith et al., 1994)

obteniendo secciones 2D de la conductividad aparente del medio. Este tratamiento permite correlacionar diferentes sondaje-TDEM obteniéndose una sección geoelectrica. Las variaciones laterales de resistividad (resolución lateral) dependerán de la distancia entre puntos de observación.

La concentración de las ondas electromagnéticas en forma de lazos, en profundidad, hace de esta técnica, que sea especialmente recomendada para el estudio de acuíferos contaminados industrialmente. El procesado y representación de los datos en forma de pseudosecciones, mapas y volúmenes, identificando las anomalías.

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

#### **Tratamientos de datos:**

Comenzamos con los valores de resistividad aparente, con él, hacemos corridas, atreves de estratos pequeños a los a largo del sondeo y de acuerdo a los cambios bruscos de la curva, planteamos unos estratos definidos para perfil unidimensional. Finalmente a este perfil le aplicamos una regresión obteniendo capas, para luego hacer perfiles en dos dimensiones apartir de los sondeos.

#### **Modelos Suavizados**

Para obtener un perfil unidimensional, aplicamos una inversión Occam, este genera un suavizado al perfil, así mismo realiza un acomodamiento de los datos, este se logra con muchas corridas.

#### **Modelo Unidimensional**

Para la obtención de un modelo unidimensional es necesario realizar un tratamiento de datos. El cual consiste en hacer corridas y posteriormente se lleva a cabo un proceso llamado Inversión Unidimensional (Modelos 1D), que consiste en obtener una curva de resistividad contra profundidad. La curva de resistividad calculada es contrastada con la



información nativa de campo, luego se produce un acomodamiento con un total de corridas.

#### **3.3.2.4. Análisis e Interpretación**

La inversión del sondaje electromagnético-TEM, es un tanto complicado debido a sus cálculos, sin embargo con ello se logran obtener diferentes capas de resistividad, variando los diferentes parámetros del software.

Para la interpretación se requiere de la figura 2.14, como base, luego una revisión profunda de sus características de los suelos y/o rocas, así mismo ello se debe contrastar con ensayos directos, para la determinación de los fluidos dulces o salinos.

#### **3.3.2.5. Superioridad y Deficiencias**

**La principal superioridad es:**

- Muy sensible a materiales de baja resistividad.
- Información definida en el periférico y profundidad.
- Barridos de muchos sondeos en una jornada de trabajo, solo necesita cables AWG, fácilmente de tender y recoger.

**La principal deficiencia es:**

- La corriente tiende que quedarse en suelos conductores.
- Los primeros metros no se ve por la rampa.
- Áreas con líneas de transmisión eléctrica.

### 3.4 Very Low Frequency – VLF

#### 3.4.1. Equipo requerido - Electromagnetic VLF Method

Para la ejecución del Very Low Frequency Method VLF se requiere de:

- **Cuaderno:** realizar apuntes de las líneas VLF ejecutas, indicando ciertas anomalías.
- **Equipo Eléctromagnético de Medidas Abem Wadi:** esta es la unidad es la que nos permite realizar la adquisición y lo almacena en su interior.
- **Fuente:** Sistema de Energización.

Manual de operación ABEM, (2001).

#### PRINCIPALES CUALIDADES DEL RECEPTOR



Figura 3.10: Instrumento VLF diseñado por la empresa 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
- Inclinator calibration

### Inclinometer

Range  $-10^{\circ}$  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

$-20^{\circ}$  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	(51/4" 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

### 3.4.2. Procedimiento de Campo

#### 3.4.2.1. Programa de Investigación

Temas a definir con los antecedentes:

- Delimitación de la unidad de análisis.
- Variables involucradas.
- Selección del método geofísico VLF.
- Localización del área de estudio.
- Medición por medio del método geofísico VLF.
- Levantamiento geológico.
- Posicionamiento de puntos con GPS pos proceso.
- Instrumentación utilizada.
- Anotaciones de anomalías en campo en metros.
- Descripción de análisis y procesamiento e interpretación de resultados.

### 3.4.2.2. Adquisición de los datos

El equipo VLF está formado por una unidad receptora en la banda VLF portátil. Los trabajos de campo comienzan con un conocimiento de las características de los suelos y/o roca, y según ello se busca orientar las estructuras, 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 pre visualizar los resultados de los puntos de medida y del perfil de investigación en campo pudiendo controlar la correcta ejecución de las mediciones.

### 3.4.2.3. Profundidad de investigación

La profundidad de penetración varía con la baja resistividad del suelo, pero comúnmente esta no sobrepasa los 100 m (Oskooit y Pedersen, 2005). Los instrumentos VLF son muy ligeros y portátiles, y pueden ser utilizados para estudiar grandes zonas con bastante rapidez (Liu et al., 2006). La profundidad de penetración  $P$ , ( $\rho$ : resistividad y  $f$ : frecuencia) se define como:

$$P = 500\sqrt{(\rho/f)} \quad (81)$$

$P$  representa la profundidad estimada.

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.

#### 3.4.2.4. Análisis e Interpretación

Mediante este software Ramag (ABEM de Suecia) se presentó toda la información a lo largo de los perfiles medidos, así mismo, también se filtró la información y se crearon ficheros de datos.

El fichero general de datos consistió de la componente real e imaginaria del campo electromagnético a intervalos de 10m, hasta una profundidad máxima de 100m (Profundidad máxima del software).

Por otro lado el análisis y procesamiento de datos VLF se han estudiado durante muchos años por numerosos investigadores en relación con la modificación de la información y su modelado.

Para la interpretación se procesaron los datos utilizando técnicas adecuadas con procedimientos de filtrado.

Los filtrados de (Karous-Hjelt), son ampliamente utilizados en el procesado de los datos de VLF-EM (Karous y Hjelt, 1983) obteniendo datos de mejor calidad. Para ello se usó, el programa Ramag (ABEM), este realiza el filtrado de (Karous y Hjelt, 1983) datos de VLF, comúnmente de los componentes ortogonales del campo magnético real (en fase) y el imaginario (la cuadratura). Donde la función objetivo se presenta a continuación, la cual puede ser utilizada para la inversión de datos.

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{R_i^0 - R_i^c}{abs(R_i^0) + C_R} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left( \frac{I_i^0 - I_i^c}{abs(I_i^0) + C_I} \right)^2 \right] \quad (82)$$

Donde  $R_i^o$  y  $R_i^c$  son las anomalías reales observadas y calculadas;  $I_i^o$  y  $I_i^c$ : son los imaginarios percibidos - calculados, respectivamente.

El subíndice “N” representa los puntos observados.  $C_R$  y  $C_I$  Son constantes, diferencias entre el máximo y el mínimo de cada respuesta individual. **El objetivo de la inversión es obtener una distribución en el subsuelo de la conductividad eléctrica**, que genera una respuesta ajustable a los datos de campo dentro de los límites de error. Los datos de entrada son los componentes del tipo real e imaginario, y se ha utilizado una suavidad con el método de mínimos cuadrados.

#### 3.4.2.5. Superioridad y Deficiencia del método

**La principal superioridad es:**

- El Instrumento tiene, bajo consumo energético y es extremadamente amigable con el medio ambiente, es rentable, y proporciona mediciones rápidas, en particular en lugares donde otros métodos geofísicos son inadecuados. Debido a su ligereza, el fácil funcionamiento del instrumento y bajos costos de operación, este método es altamente productivo y adecuado para un rápido estudio preliminar de estructuras geológicas en terrenos o zonas cubiertas, así como en terrenos accidentados (Jeng et al., 2004).
- Un pre procesamiento, podemos analizar in situ.

**La principal deficiencia es:**

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

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



## CAPITULO IV

### 4. RESULTADO DE LA INVESTIGACION POR CADA SITIO

#### 4.1 Prospección Hidrogeológica - T.M. Alcalá de los Gazules, Provincia de Cádiz.

##### 4.1.1 Introducción

El presente estudio de prospección hidrogeológico-geofísica hace referencia a la investigación de una finca situada en el T.M Alcalá, provincia de Cádiz, para realizar un estudio y determinar las posibilidades hidrogeológicas de los materiales que componen la zona donde se ubican la parcela 17 del polígono 10 y con un área 153.14 hectáreas en el T.M. Alcalá (Cádiz). Figura 4.1.1.



Figura 4.1.1: Situación General

La investigación realizada tiene como objetivo determinar la constitución litológica de los materiales del subsuelo y evaluar las posibilidades de captación de aguas subterráneas.

Los objetivos previstos en este estudio han sido los siguientes:

- Definir las características geológicas e hidrogeológicas del área investigada.
- Determinar la litología de las formaciones del subsuelo.

- Recomendar la situación, el tipo de obra, profundidad y la tecnología de perforación acorde con los terrenos a atravesar.

Las acciones para esta zona de estudio fueron:

- Reconocimiento geológico e hidrogeológico de campo (Ítem 4.1.3.1 Hidrogeología).
- Prospección geofísica por el método de TE (Tomografía Eléctrica).
- Investigación con TEM.
- Análisis, tratamientos, contraste y composición del reporte.

#### 4.1.2 Emplazamiento de Interés

El proyecto está emplazado en el T.M. de Alcalá de los Gazules, provincia de Cádiz, comunidad de Andalucía - España, tal como se puede apreciar en la figura 4.1.1: situación general. La exploración geofísica se situó con las siguientes coordenadas.

Cuadro 1.2: Coordenadas WGS 84 – Ensayo Geofísico Tomografía Eléctrica

Tomografía Eléctrica	Ubicación	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
LTE - 01	INICIO	253564.00	4046902.00	273.00
	FIN	254010.57	4046809.68	290.00

Cuadro 1.3: Coordenadas WGS 84 – Ensayos Geofísicos TDEM

Ensayo - TDEM	Ubicación-área	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
TDEM – 01	centro	253767.26	4046788.07	310.00
TDEM – 02	centro	253949.41	4046787.21	305.00

Cuadro 1.4: Relación del Ensayo de Tomografía Eléctrica

Línea	Longitud (m)	Profundidad (m)	Registro	Dispositivo
LTE – 01	480.0	190.0	Resistividad	Polo – Dipolo



Cuadro 1.5: Relación de Ensayos Geofísicos – TDEM

Ensayo	Lado	Área Bobina Receptor (m2)	Área Bobina Transmisor (m2)	Profundidad (m)	Registro	Arreglo
TDEM – 01	40.0	1600.0	1600.0	40.0	Resistividad - Conductividad	Single Loop
TDEM – 02	40.0	1600.0	1600.0	40.0	Resistividad - Conductividad	Single Loop

#### 4.1.3 Geología

Las características de los suelos y/o rocas del proyecto, están formados por dolomitas del triásico. En profundidad, los materiales se asocian también al Triásico y están formados por arcillas y yesos (Hoja del Magna N° 1063 Algar). La descripción detallada de la geología puede consultarse en el Ítem 4.1.3.1 Hidrogeología.

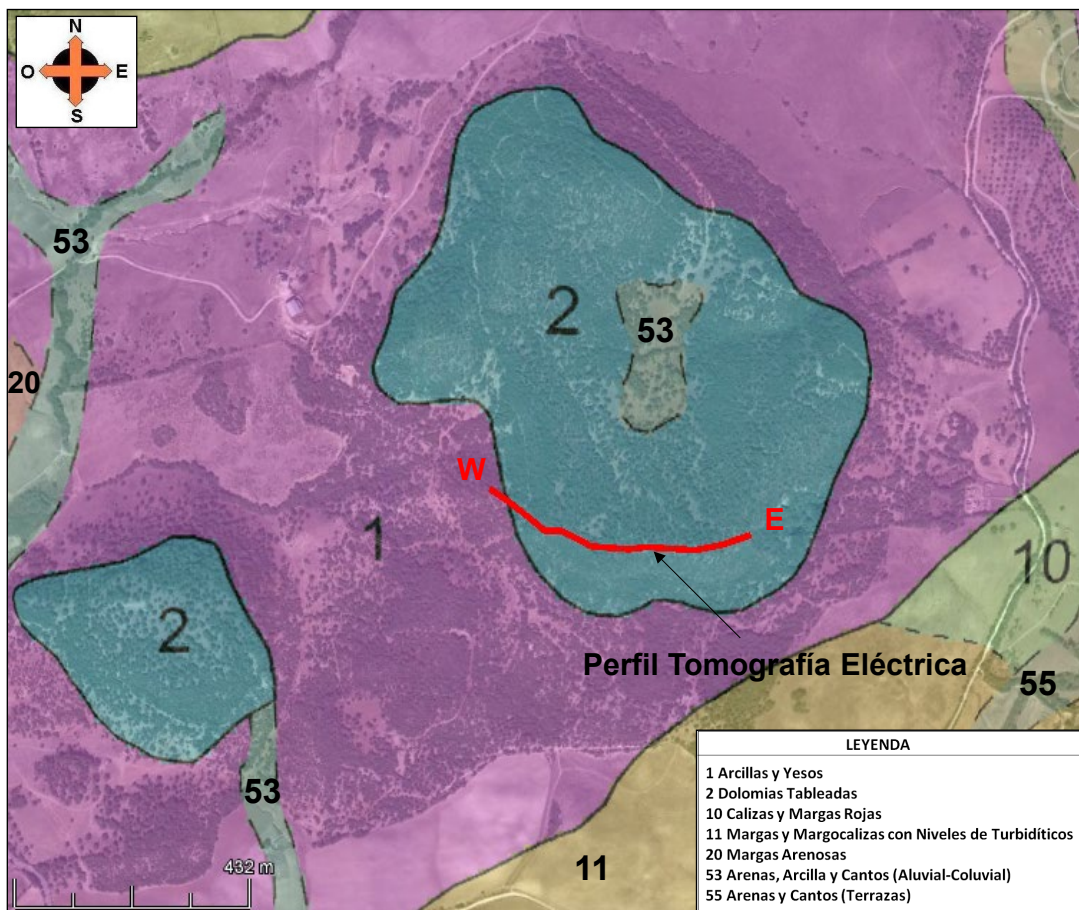


Figura 4.1.2: Hoja Magna 1063, Algar (IGME)

#### 4.1.3.1. Información Hidrogeológica

En el proyecto, a nivel hidrogeológico, existe diferencia en dos unidades relativas al triásico.

**La formación de Dolomitas del Triásico:** Son de naturaleza permeable por fisuración y karstificación y por tanto de verdadero interés en este estudio.

Por el contrario, la unidad de **arcillas y yesos** constituida fundamentalmente por arcillas versicolores, son de naturaleza impermeable o baja permeabilidad. La presencia de yesos y bloques de otra naturaleza pudieran dar una mayor permeabilidad pero el resultado sería de encontrar aguas salobres.

#### **RECURSOS DISPONIBLES DEL PROYECTO**

Durante las visitas de campo se ha realizado una relación del recurso hídrico del proyecto, en la que se ha recopilado una información muy válida para el conocimiento hidrogeológico del lugar. Dicha información se recoge de forma resumida en el cuadro adjunto.

**Cuadro 1.6:** Inventario de puntos de agua.

Nº	Puntos	Tipo Captación	Coordenadas UTM			Prof. (m)	Observaciones
			X	Y	Z		
1	S-1	Sondeo	252 747	4 046 175	144	120	Sondeo rotoperCUSión. Negativo, cegado a los 2 m. Foto 16.
2	S-2	Sondeo	253 299	4 046 496	208	50	Sondeo rotoperCUSión. Tubería PVC Ø 180 mm. Instalado con Np a los 15,15 m de Prof. (≈ 193 msnm). Foto 17.
3	S-3	Sondeo	253 323	4 046 492	208	25	Sondeo rotoperCUSión. Negativo y tapado. Foto 18.
4	S-4	Sondeo	253 478	4 046 726	256	50	Sondeo rotoperCUSión. Negativo, cegado a los 27 m. Foto 19.
5	S-5	Sondeo	253 488	4 046 709	256	50	Sondeo rotoperCUSión. Negativo, cegado a los ? m. Foto 20.
6	S-6	Sondeo	253 533	4 046 806	250	80	Sondeo rotoperCUSión. Negativo, cegado a 1 m. Foto 21.
7	S-7	Sondeo	253 493	4 046 837	248	70	Sondeo rotoperCUSión. Negativo y tapado. Foto 22.
8	S-8	Sondeo	253 479	4 046 962	243	80	Sondeo rotoperCUSión. Negativo y tapado. Foto 23.
9	S-9	Sondeo	253 577	4 046 735	244	50	Sondeo rotoperCUSión. Negativo y tapado. Foto 24
10	S-10	Sondeo	253 939	4 046 634	237	100	Sondeo rotoperCUSión. Negativo, cegado a los? m. Sondeo de Clavijo. Foto 25.

11	S-11	Sondeo	254 173	4 046 790	223	---	Sondeo percusión. Negativo, cegado a los? m. Sondeo de Galloso. Foto 26.
12	S-12	Sondeo	252 958	4 046 724	224	70	Sondeo rotopercusión. Tubería PVC Ø 180 mm. Instalado con Np estimado a los 60 m de prof. (≈ 164 msnm). Sondeo Cerro el Palmitoso. Foto 27.
13	S-13	Sondeo	253 816	4 047 157	267	60	Sondeo rotopercusión. Tubería PVC Ø 180 mm. Instalado con Np estimado a los 50 m de prof. (≈ 217 msnm). Sondeo de La Mesa Grande. Foto 28.
14	P-1	Pozo	253 530	4 046 162	153	< 10	Pozo con arqueta cuadrada dentro finca. Se desconoce si tiene agua. Foto 29.
15	P-2	Pozo	254 008	4 046 086	149	< 10	Pozo anillas de hormigón. Se desconoce si tiene agua. En finca al sur de la estudiada. Foto 30.
16	M-1	Manantial	254 324	4 047 162	202		Manantial con estampitas de santos. Foto 31.
17	M-2	Manantial	254 199	4 047 839	212		Fluye en arroyo a la salida de La Mesa Grande.
18	S-14	Sondeo			290	123	Sondeo rotopercusión. Negativo y tapado
19	S-15	Sondeo			290	120	Sondeo rotopercusión. Negativo y tapado
20	S-16	Sondeo	253 235	4 046 837	200	39	Sondeo rotopercusión. Negativo y tapado
21	S-17	Sondeo	253 184	4 046 907	205	50	Sondeo rotopercusión. Tubería PVC. Ø180 mm. Np ≈ 3,80 m.
22	S-18	Sondeo	253 685	4 046 818	311	123	Sondeo rotopercusión. Negativo
23	S-19	Sondeo	253 726	4 046 800	310	123	Sondeo rotopercusión. Negativo
24	S-20	Sondeo	253 319	4 047 114	207	39	Sondeo rotopercusión. Negativo
25	S-21	Sondeo	253 383	4 047 023	213	50	Sondeo rotopercusión. Negativo

En total se han reconocido hasta 25 puntos, de los cuales 21 se corresponden con sondeos (denominados del S-1 al S-13 y del S-14 al S-21), 2 de ellos se trata de pozos de brocal o abiertos (denominados P-1 y P-2) y otros 2 se trata de manantiales (denominados M-1 y M-2).

Los sondeos se perforaron por el sistema de rotopercusión con circulación directa, a excepción del N° 11 (S-11), el denominado sondeo Galloso, que se realizó, antes de la adquisición por parte de Mario Gallardo de la finca, por el

sistema de percusión. La profundidad de las captaciones y del nivel piezométrico fue facilitada por Mario Gallardo, puesto que en la gran mayoría, al resultar investigaciones negativas, las captaciones se encuentran cegadas, tapadas o instaladas y no se han podido medir.

Solo se han reconocido 3 sondeos positivos que actualmente se encuentran instalados. Uno de ellos, el n° 2 (S-2) que abastece para su almacenaje 2 depósitos de 30 m<sup>3</sup> cada uno, es el único con agua que Mario Gallardo tiene en su finca, si bien su caudal es escaso y resulta insuficiente para sus mínimas necesidades. Los otros dos abastecen a fincas colindantes y son los situados en el "Cerro el Palmitoso" y en "La Mesa Grande". Los 3 sondeos se perforaron a rotopercusión y se entubaron con tubería de PVC Ø 180 mm. Recientemente Mario ha perforado el sondeo n° 21 (S-17) con agua, pero aún sin aforar.

Los niveles piezométrico de los 3 sondeos mencionados en el párrafo anterior se han calculado sobre las siguientes cotas: S-2 (finca Mario Gallardo) sobre la cota 193 msnm, el S-12 (Cerro el Palmitoso) sobre la cota 164 msnm y el S-13 (La Mesa Grande) sobre la cota 217 msnm. Esto nos lleva a la conclusión que se trata de acuíferos independientes y que no existe conexión hidráulica entre unos y otros.

Los pozos (P-1 y P-2) se encuentra cerrados y no se ha podido tener acceso a su interior, si bien, según la información del propietario y observado la ubicación de los mismos y en los materiales que han sido perforados, se trata captaciones de poca profundidad los cuales suelen tener agua en invierno pero en las épocas de estiaje se suelen secar.

Respecto a los manantiales (M-1 y M-2), actualmente con agua, drenan a las cotas aproximadas de 202 y 212 msnm respectivamente. Teniendo en cuenta que las cotas, tanto de los manantiales como de los sondeos (boca y nivel piezométrico), son aproximadas, podemos llegar a la conclusión que el punto n° 17 (M-2) del inventario de puntos de agua sería el punto de drenaje natural del acuífero constituido por el cuerpo dolomítico que constituye la denominada "La Mesa Grande". El agua en el punto n° 17 (M-2) aparece de forma difusa en un arroyo por lo que se desconoce la cota exacta de salida, estimada en entre la 212 y la 215 msnm, es decir, cota que se corresponde aproximadamente (teniendo en cuenta que son cotas

estimativas) con la del nivel piezométrico del punto n° 13 (S-13) del inventario de puntos de agua, con una cota estimada de 217 msnm. A continuación se presentan las columnas litológicas facilitadas por Mario Gallardo de la mayoría de las captaciones recogidas en el inventario de puntos de agua y que son las siguientes:

**Cuadro 1.7:** Columnas Litológicas (Inventarios de Puntos de Aguas)

Sondeo	Profundidad (m)	Descripción
S-1	0-120	Arcillas versicolores con yesos. Trías
S-2	0-15	Dolomitas grises y negras. Trías. (de 11 a 15 metros se pierde el detritus y el martillo sale mojado)
	15-50	No sale detritus. Aparentemente material blando, probablemente se trate de arcillas del trías.
S-3	0-11	Dolomitas grises y negras. Trías. (de 11 a 13 metros se pierde el detritus y el martillo sale seco)
	11-25	No sale detritus. Aparentemente material blando, probablemente se trate de arcillas del trías.
S-4	0-20	Dolomitas grises y negras. Trías.
	20-50	Arcillas versicolores con yesos. Trías
S-5	0-20	Dolomitas grises y negras. Trías.
	20-50	Arcillas versicolores con yesos. Trías
S-6	0-80	Arcillas versicolores con abundantes yesos. Trías
S-7	0-70	Arcillas versicolores con yesos. Trías
S-8	0-80	Arcillas versicolores con abundantes yesos. Trías
S-9	0-50	Arcillas versicolores con yesos. Trías
S-10	0-9	Dolomitas grises y negras en bloques. Trías.
	9-100	Arcillas versicolores con yesos. Trías.
S-11 (Percusión)	0- ?	Se desconoce. Sondeo negativo. Probablemente arcillas del trías.
S-12	0-70	Dolomitas grises y negras. Trías.
S-13	0-60	Dolomitas grises y negras. Trías.
S-18	0 - 80 a 85 (?)	Dolomitas grises y negras. Trías.
	80 a 85 (?) -123	Arcillas. Trías.
S-19	0 - 80 a 85 (?)	Dolomitas grises y negras. Trías.
	80 a 85 (?) -123	Arcillas. Trías.
S-20	0-39	Arcillas. Trías.
S-21	0-50 m	Arcillas. Trías.

Los sondeos S-1, S-6, S-7, S-8, S-9, y probablemente el S-11, se perforaron sobre arcillas versicolores, con mayor o menor presencia de yesos, del trías, de naturaleza impermeable o baja permeabilidad (la presencia de cierta cantidad de agua resultaría ser salada). El sondeo S-10 se perforó sobre unos bloques dolomíticos (posible coluvial) sin agua e inmediatamente se metió en las arcillas versicolores del trías, resultando ser también negativo. Los sondeos S-2, S-3, S-4 y S-5 se perforaron sobre Dolomitas grises y

negras del triás, introduciéndose posteriormente en las arcillas versicolores del triás, apareciendo solo un poco de agua en el sondeo S-2, tratándose de materiales permeables por fisuración pero sin encontrarse saturadas en agua, de lo que se desprenden serían cuerpos permeables colgados. Los únicos sondeos positivos encontrados son el S-12 y el S-13, perforados en Dolomitas grises y negras (se desconoce si llegaron al nivel de base subyacente) saturadas en agua.

De la descripción de la ubicación vertical de unidades del suelo y/o roca, realizados hasta el momento se desprende que los únicos materiales acuíferos en el entorno de la finca son las Dolomitas grises y negras del triás. Si bien, no todos los afloramientos dolomíticos se encuentran saturados en agua sino que algunos de ellos, los de menor entidad, se encuentran colgados y sin apenas agua, como los encontrados dentro de los límites de la finca de Mario Gallardo.

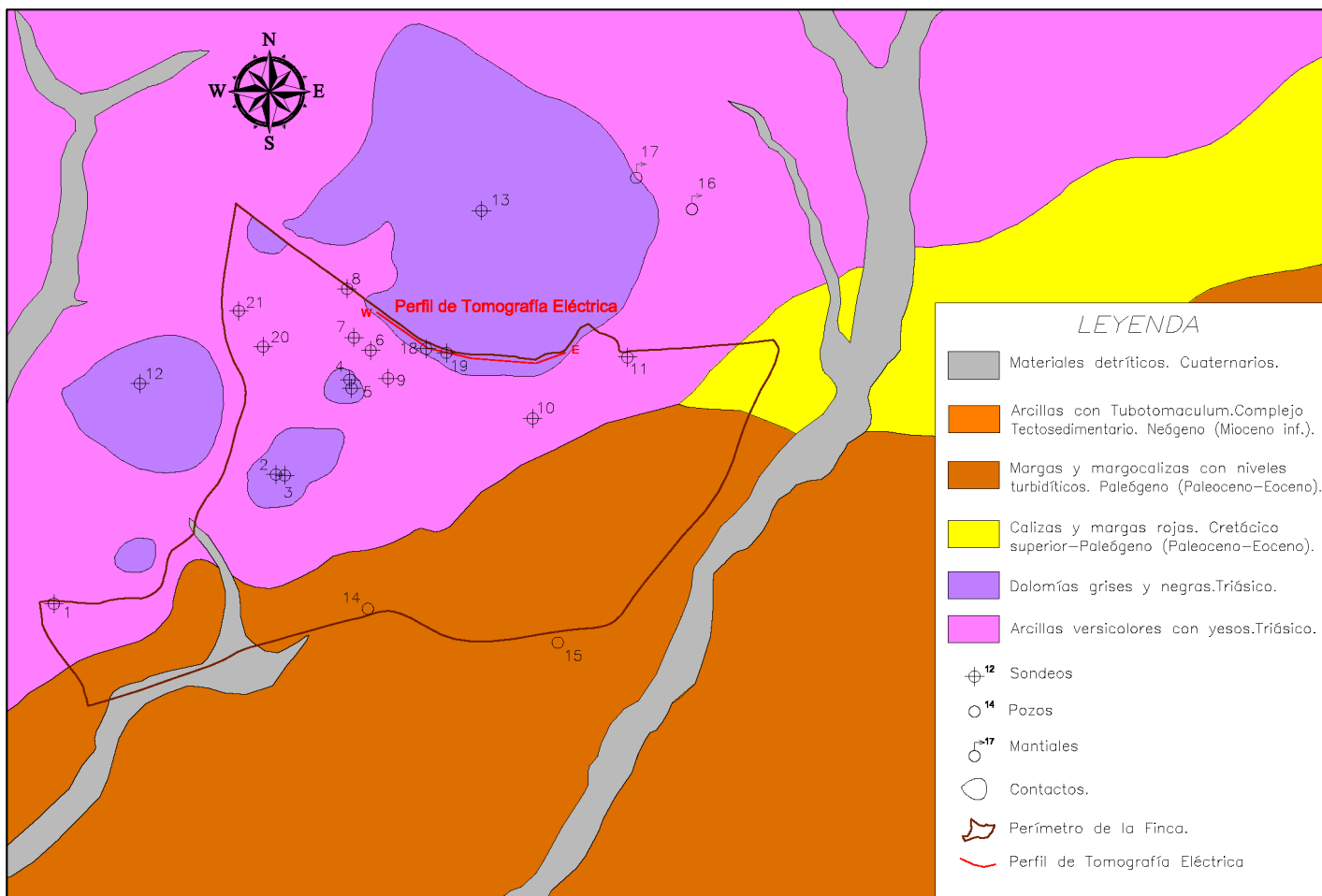


Figura 4.1.3: Planta Hidrogeológica.



#### 4.1.4 Procedimientos de Trabajo de Campo

La actividad empezó con una búsqueda a través de imágenes por satélite, mapas que indican diferentes rocas o formaciones geológicas y sus edades e información hidrogeológica de pozos cercanos, antes de la prospección geofísica.

La exploración geofísica consistió en Tomografía Eléctrica y Sondeos electromagnético en domino del tiempo (SEDT), ello se aplicó con el fin de lograr información en la vertical y estudiar las características de los suelos y/o rocas.

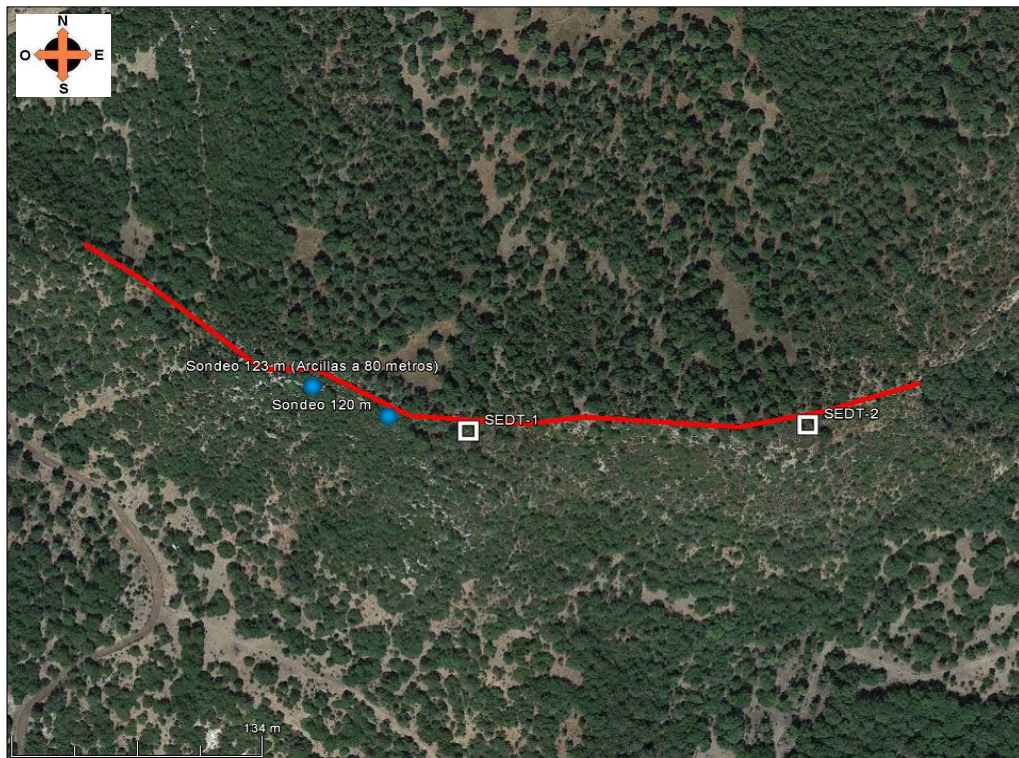


Figura 4.1.4: Situación del Perfil de Tomografía, SEDT-1 y SEDT-2

Se ha realizado un perfil de Tomografía eléctrica de 480m, distancia de estacas cada 30m y dispositivo de medición Polo-dipolo directo e inverso.

Los SEDT se han medido con las áreas disponibles por topografía y vegetación. Para obtener una mejor curva se aumentó el número de Stack.



Figura 4.1.5: Toma de datos de campo TE y SEDT.

#### **4.1.5 Procesamiento e Interpretación de Datos**

##### **TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**

En la Figura 4.1.6, se representa el resultado de la inversión del Perfil geoelectrico con los sondeos 18 y 19, empleando el algoritmo robust constrain del programa RES2DINV.

En campo se realizó los dispositivos Wenner-Schlumberger, Polo-Dipolo Directo, Polo-Dipolo Inverso. En gabinete el procesamiento e Interpretación de datos se discrimino empleando el algoritmo robust constrain y verificando las anomalías en los tres dispositivos, para finalmente mostrar en la parte inferior el perfil medido con el dispositivo Polo - Dipolo, en el que se ha incluido la columna simplificada del sondeo mecánico donde se indica el paso de Dolomitas alteradas, arcillas y yesos que se considera el sustrato.

##### **TDEM**

Como se explicó anteriormente ítem 3.3.2.3., principalmente consiste en resistividad aparente, Inversión Unidimensional y obtenemos capas con la curva de resistividad vs profundidad.

La configuración del TDEM, que se utilizó para este proyecto fue el SINGLE LOOP, Osea un solo instrumento envía y recibe, corriente.

Donde el bucle fue de 40x40 m, por la escasa área de la zona de estudio, con un área de bobina de 1600 m<sup>2</sup> (Ver figura 4.1.4).



Luego del levantamiento de los datos de campo, se descarga la información del TERRATEM, a la pc para posterior procesado y/o análisis de datos siguiendo lo indicado en el Ítem 2.5.3.3 Procesado de los Datos.

Debido que el bucle fue limitado por el área de estudio solo pudo obtener las resistividades y/o conductividades de la primera Unidad Geoeléctrica, la cual está conformada por Dolomitas, alcanzando una profundidad desde la superficie hasta los 50 metros.

#### 4.1.6 Resultado de la Investigación

##### 4.1.6.1. Tomografía Eléctrica

El perfil de tomografía eléctrica (Figura 4.1.6) discurre con dirección W – E y atraviesa los sondeos 18 y 19 ya realizados con resultados negativos. El resultado del procesado e interpretación de la Tomografía Eléctrica obtenida se presenta a continuación:

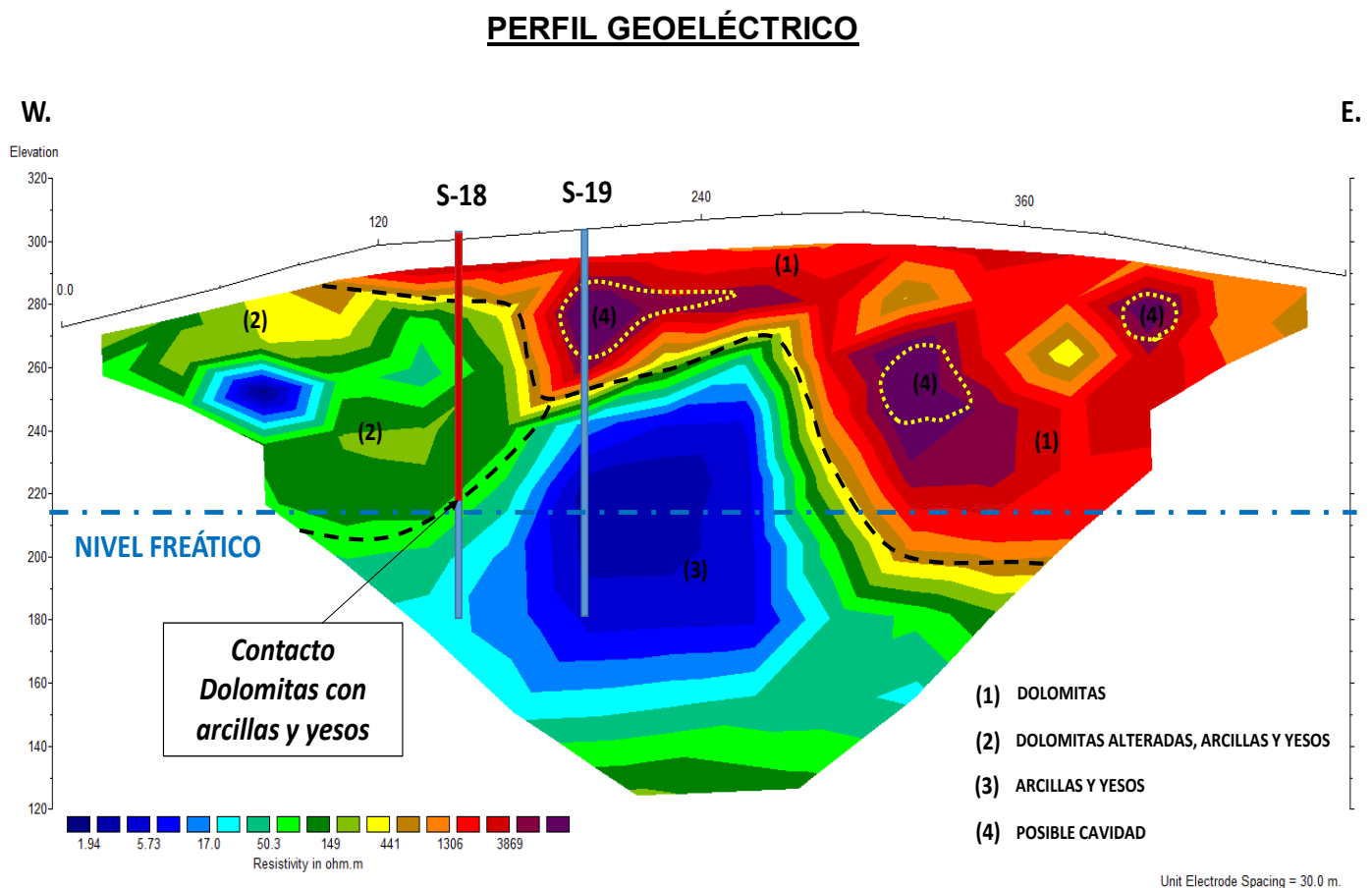


Figura 4.1.6: Sección Tomografía Eléctrica

En la sección obtenida, se han diferenciado cuatro unidades geoeléctricas:

- **Unidad Geoeléctrica 1: Dolomitas.** Se inicia en superficie hasta una profundidad entre 40 y 100 metros. A partir del metro 270 del perfil y hacia el Este, se produce un cambio lateral donde aumenta la potencia de esta unidad.
- **Unidad Geoeléctrica 2: Dolomitas alteradas, arcillas y yesos.** La zona oeste está formada por Dolomitas alteradas, arcillas y yesos que se caracterizan por una menor resistividad. Se encuentra desde superficie hasta 80 metros de profundidad.
- **Unidad Geoeléctrica 3: Arcillas y yesos.** Esta unidad se detecta a continuación de las anteriores unidades. Son materiales de muy baja resistividad solo asociables a arcillas y yesos del Triásico.
- **Unidad Geoeléctrica 4: Posibles cavidades.** En el interior de la unidad geoeléctrica 1 aparecen zonas de muy alta resistividad que pueden ser asociadas con zonas de huecos/cavidades. Esta alta resistividad se debe al carácter dieléctrico del aire.

#### **4.1.6.2. Ensayo TEM**

Como se mencionó el ítem 4.1.4, con este ensayo TEM, se pretende conocer en la vertical, las características de los suelos y/o rocas.

En ese sentido, se llevaron a cabo dos TEM. Sin embargo, debido a la falta de espacio para la realización de bucles de mayor área, no se han alcanzado profundidades mayores a 40 metros. Los resultados de los SEDT han indicado únicamente la existencia de Dolomitas hasta 40 metros de profundidad, lo cual no permiten conocer el contacto Dolomitas - arcillas y yesos.

#### 4.1.7 Conclusión & Recomendación

De lo anterior y al aplicar los ensayos, antes mencionados, podemos decir:

- Los estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos han logrado determinar la información en la vertical y estudiar las características de los suelos y/o rocas.
  - ❖ Unidad Geoeléctrica 1: Dolomitas. Se inicia en superficie hasta una profundidad entre 40 y 100 metros. A partir del metro 270 del perfil y hacia el Este, se produce un cambio lateral donde aumenta la potencia de esta unidad. Se considera una unidad permeable por fisuración y karstificación, presenta interés hidrogeológico cuando se encuentra por debajo del nivel freático, que se estima en 212 msnm.
  - ❖ Unidad Geoeléctrica 2: Dolomitas alteradas, arcillas y yesos. La zona oeste está formada por Dolomitas alteradas, arcillas y yesos que se caracterizan por una menor resistividad. Se encuentra desde superficie hasta 80 metros de profundidad. Se considera una unidad de baja permeabilidad y por lo tanto, de bajo interés hidrogeológico. Además, se encuentra por encima del nivel freático estimado.
  - ❖ Unidad Geoeléctrica 3: Arcillas y yesos. Esta unidad se detecta a continuación de las anteriores unidades. Son materiales de muy baja resistividad solo asociables a arcillas y yesos del Triásico. Se considera una unidad impermeable y por lo tanto, no aportaría fluido dulce al pozo.
- De lo anterior, se recomienda un sondeo de reconocimiento de acuerdo con las siguientes especificaciones técnicas:
  - ❖ Profundidad: 120 m, orientativa. La profundidad final se determinará durante el desarrollo de la perforación.
  - ❖ Situación: metro 380 de la Tomografía Eléctrica.
  - ❖ Al final de las obras de perforación determinar el caudal y evaluar su viabilidad.



Figura 4.1.7: Situación de la zona recomendada para emplazar el sondeo

### PERFIL GEOELÉCTRICO

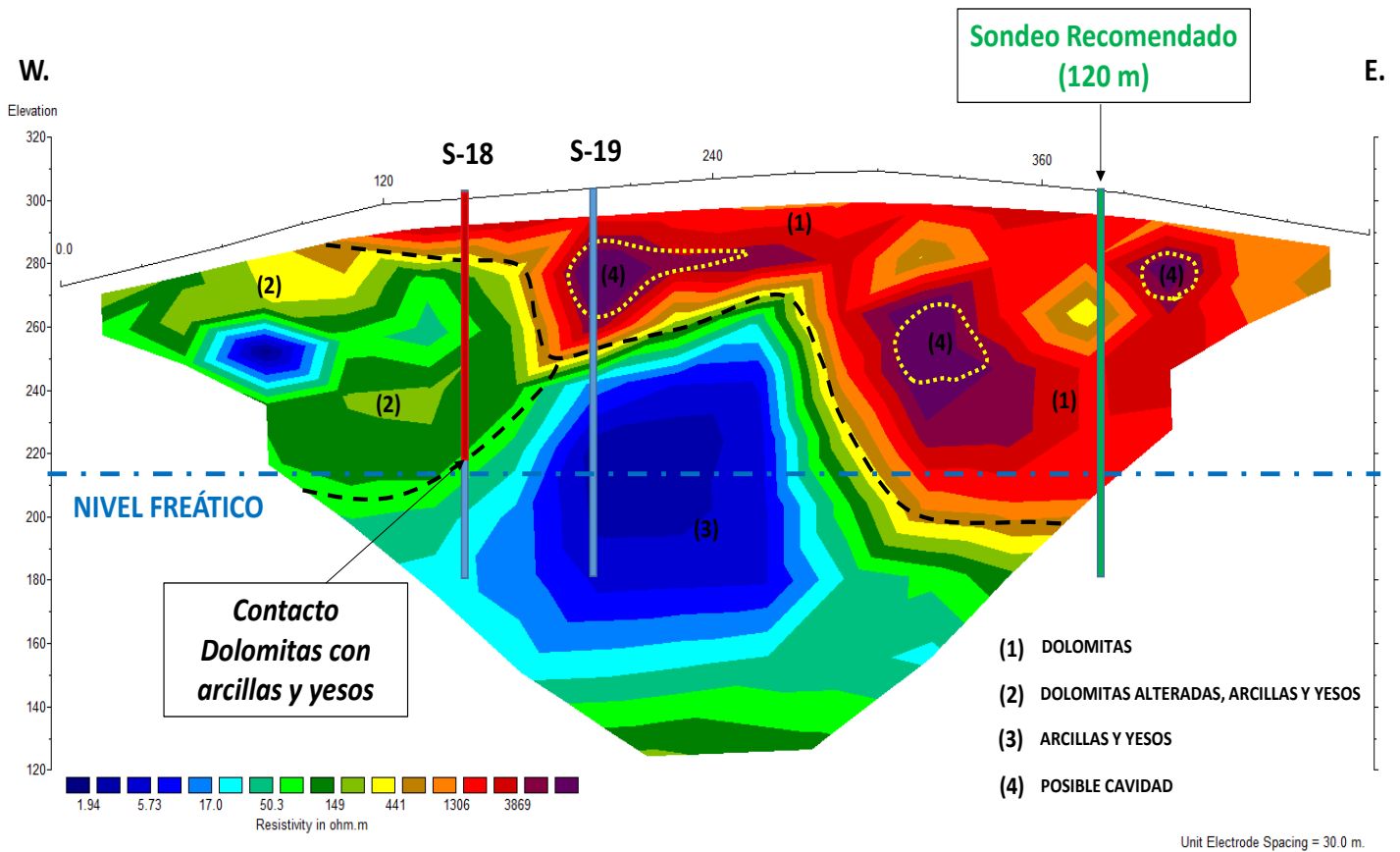


Figura 4.1.8: Sondeo recomendado sobre perfil de Tomografía Eléctrica.



## 4.2 Prospección Geofísica en una Finca Pertenciente al Término Municipal de San Jorge (Castellón)

### 4.2.1 Introducción

El presente estudio de prospección hidrogeológico-geofísica hace referencia a la investigación de una finca situada en el T.M de San Jorge en la provincia de Castellón, para realizar un estudio y determinar las posibilidades hidrogeológicas de los materiales que componen la zona donde se ubican las parcelas (120-126-138) del polígonos 2 y con un área 3.1567 hectáreas en el término municipal de San Jorge (Castellón). Figura 4.2.1.

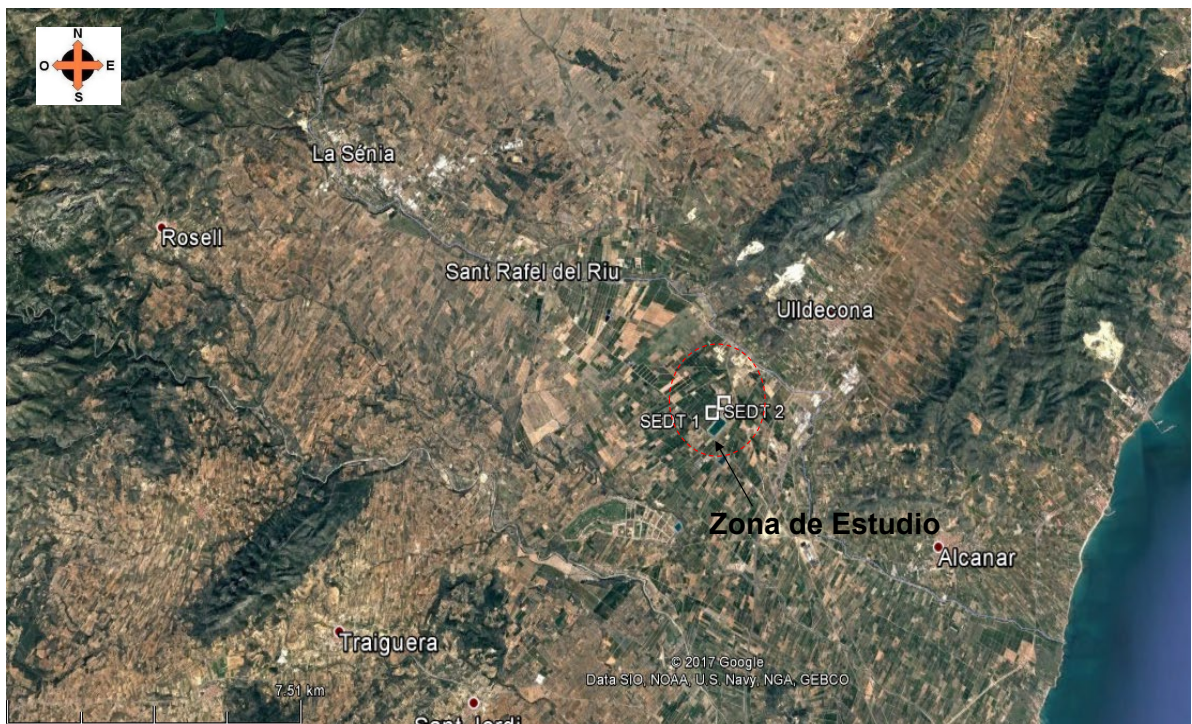


Figura 4.2.1: Situación General del área investigada

La investigación realizada tiene como objetivo determinar la constitución litológica de los materiales del subsuelo y evaluar las posibilidades de captación de aguas subterráneas.

#### 4.2.2 Emplazamiento de Interés

El terreno está emplazado en el T.M. San Jorge, provincia de Castellón, Comunidad Valenciana - España, tal como se puede apreciar en la figura 4.2.1: situación general. La exploración geofísica se situó con las siguientes coordenadas.

Cuadro 1.8: Coordenadas WGS 84 – Ensayos Geofísicos TDEM

Ensayo - TDEM	Ubicación-Área	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
TDEM – 01	Centro	280350.00	4494655.00	175.00
TDEM – 02	Centro	280679.00	4494900.00	175.00

Cuadro 1.9: Relación de Ensayos Geofísicos - TDEM

Ensayo	Lado	Área Bobina Receptor (m2)	Área Bobina Transmisor (m2)	Profundidad (m)	Registro	Arreglo
TDEM – 01	200.0	40.000	40.000	400.0	Resistividad - Conductividad	Single Loop
TDEM – 01	196.0	38.416	40.000	600.0	Resistividad - Conductividad	Coincidente-Loop
TDEM – 02	200.0	40.000	40.000	400.0	Resistividad - Conductividad	Single Loop
TDEM – 02	196.0	38.416	40.000	600.0	Resistividad - Conductividad	Coincidente-Loop

#### 4.2.3 Geología

Las características de los suelos y/o rocas del proyecto, están formados por Conglomerados, gravas, arenas y arcillas. En profundidad, los materiales se asocian al terciario y Jurásico formados por Conglomerados, arenas, arcillas, Dolomitas y calizas dolomitizadas principalmente (Hoja del Magna nº 546 Ulldecona).

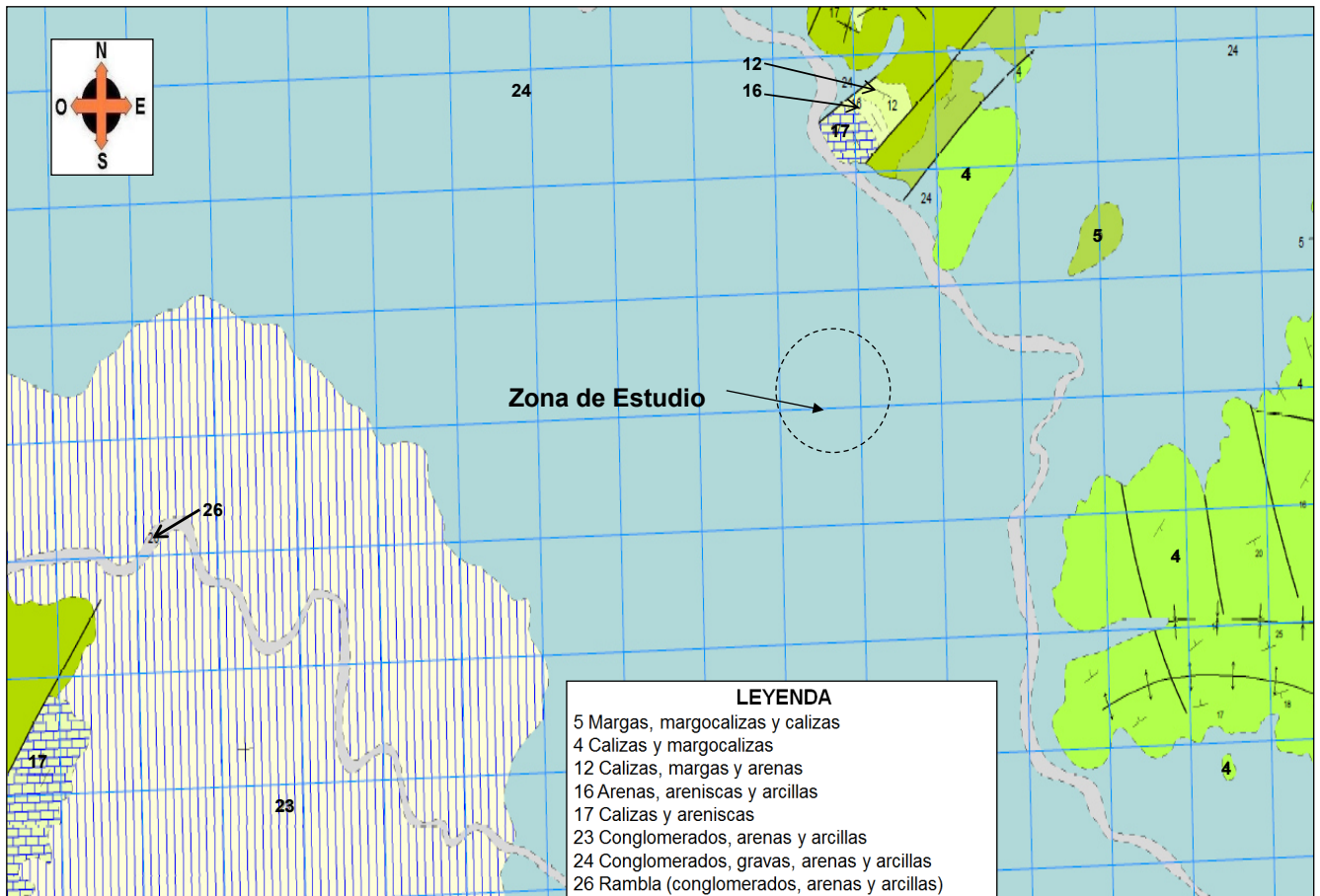


Figura 4.2.2: Mapa Geológico N° 546 “Ulldecona”

# LEYENDA

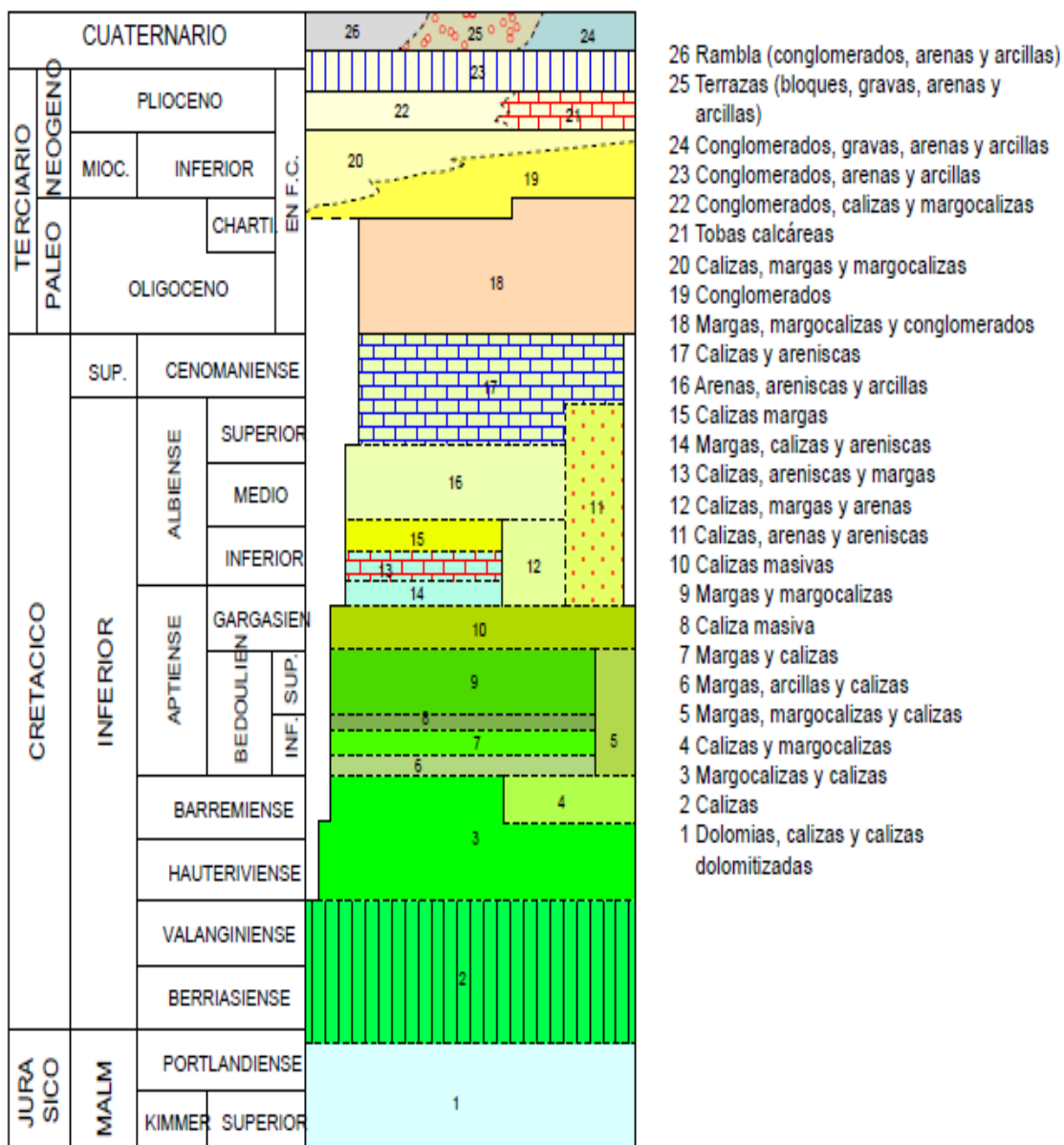


Figura 4.2.3: Leyenda Mapa Geológico N° 546 "Uldecona"



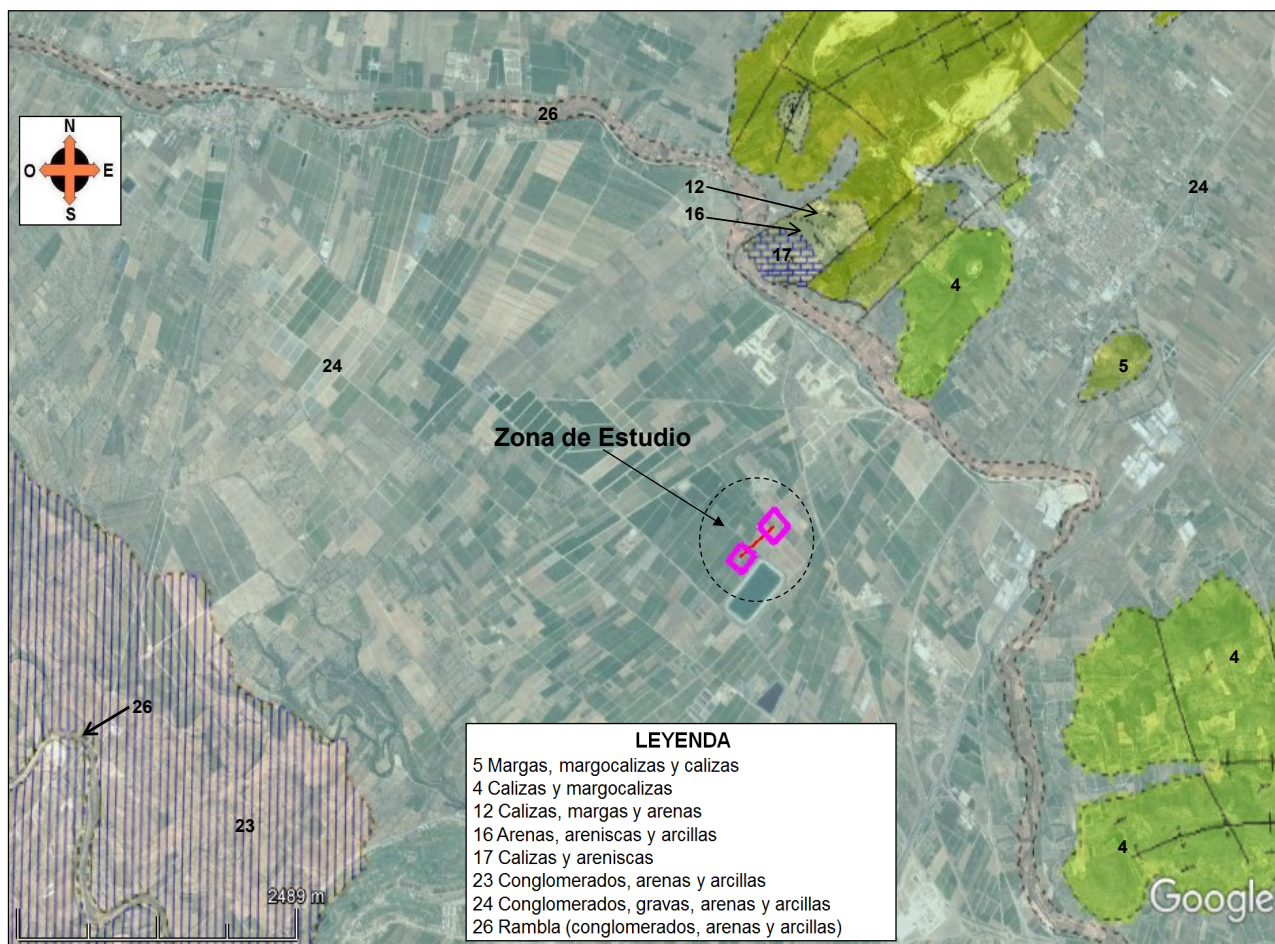


Figura 4.2.4: Mapa Geológico N° 546 "Ulldecona" - Google Earth.

Las acciones para esta zona de estudio fueron:

- Reconocimiento geológico e hidrogeológico.
- Investigación con TEM.
- Análisis, tratamientos, contraste y composición del reporte.

#### 4.2.4 Procedimientos de Trabajo de Campo

La actividad empezó con una búsqueda a través de imágenes por satélite, mapas que indican diferentes rocas o formaciones geológicas y sus edades e información hidrogeológica de pozos cercanos, antes de la prospección geofísica.

La exploración geofísica consistió en ensayos TEM, ello se aplicó con el fin de lograr información en la vertical y estudiar las características de los suelos y/o rocas.

La configuración del TDEM, que se utilizó para este proyecto fue el Single Loop y Coincidente-Loop, donde el bucle fue de 200m<sup>2</sup> y 196m<sup>2</sup>, con el objetivo de

obtener un perfil geoelectrico. Los SEDT se han medido con las áreas disponibles por topografía y vegetación. Para obtener una mejor curva se aumentó el número de Stack.

Vemos el emplazamiento del Perfil Electromagnético.



Figura 4.2.5: Situación Perfil Geoelectrico

#### 4.2.5 Procesamiento e Interpretación de Datos TDEM

Como se explicó anteriormente ítem 3.3.2.3., principalmente consiste en resistividad aparente, Inversión Unidimensional y obtenemos capas con la curva de resistividad vs profundidad.

La configuración del TDEM, que se utilizó para este proyecto fue el SINGLE LOOP, Osea un solo instrumento envía y recibe, corriente.

Donde el bucle fue de 200x200 m, por la escasa área de la zona de estudio, con un área de bobina de 20.000 m<sup>2</sup>. Por otro la otra configuración usada para alcanzar mayores profundidades y/o observar los cambios en la curva de resistividad en profundidad, fue el arreglo denominado "COINCIDENTE LOOP", con un bucle exterior de 200x200 m con un área de bobina de 20,000 m<sup>2</sup> referente a la transmisora de la señal y con un bucle interior de 196x196 m. con

un área de bobina de 38,416 m<sup>2</sup> referente a la receptora de la señal, la bobina receptora de señal se encuentra conformada por dos espiras.

En campo los equipos usados fue el TERRATEM, para la adquisición de datos, así mismo para complemento del TERRATEM de 10A, se usó el TERRA TX50, para alcanzar mayor potencia y profundidad de investigación.

Luego del levantamiento de los datos de campo, se descarga la información del TERRATEM, a la pc para posterior procesado y/o análisis de datos siguiendo lo indicado en el Ítem 2.5.3.3 Procesado de los Datos.

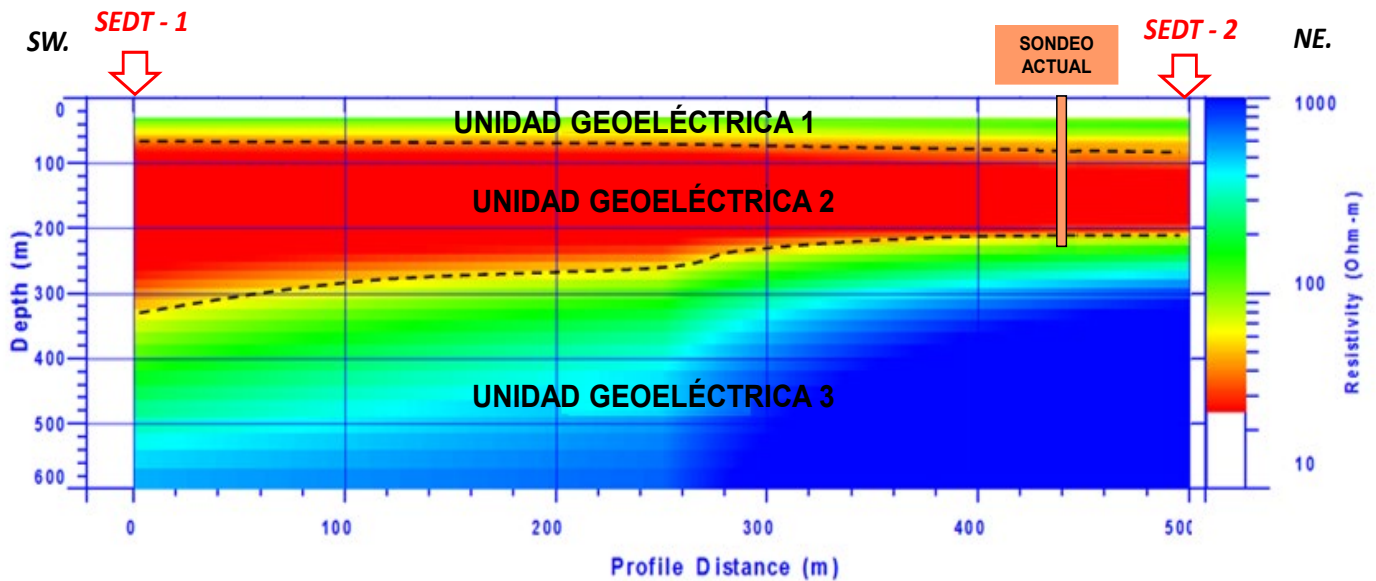
Debido a la amplitud del área de estudio se logró una mayor profundidad con la investigación geofísica logrando obtener las resistividades y/o conductividades de las tres primeras Unidades Geoeléctricas, alcanzando profundidades desde la superficie hasta los 600 metros.

#### **4.2.6 Resultado de la Investigación**

De la aplicación del ensayo TEM, obtuvimos la sección geoeléctrica correspondiente al perfil trazado donde se muestran las unidades detectadas y sus profundidades. A continuación se expone dicha sección geoeléctrica interpretada:



## PERFIL GEOELÉCTRICO



UNIDAD GEOELÉCTRICA 1: Conglomerados, gravas, arenas y arcillas

UNIDAD GEOELÉCTRICA 2: Arcillas y margas con niveles aislados de calizas y conglomerados.

UNIDAD GEOELÉCTRICA 3: Calizas y margocalizas.

Figura 4.2.6: Sección Geoeléctrica

En la sección obtenida, se han diferenciado tres unidades geoeléctricas:

- **Unidad Geoeléctrica 1:** Conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Se inicia en superficie hasta una profundidad de 50 metros.
- **Unidad Geoeléctrica 2:** Arcillas y margas con niveles aislados de calizas y conglomerados. Subyaciendo de la Unidad Geoeléctrica 1, tenemos desde los 200 – 300m, en la vertical. Su espesor disminuye hacia el SW.
- **Unidad Geoeléctrica 3:** Calizas y margocalizas. Esta unidad se encuentra a continuación de la anterior unidad. Al NE. de la zona de estudio esta unidad se encuentra más somera.

### 4.2.7 Conclusión & Recomendación

De lo anterior y al aplicar los ensayos, antes mencionados, podemos decir:

- Los estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos han logrado determinar la información en la vertical y estudiar las características de los suelos y/o rocas.

- ❖ **Unidad Geoeléctrica 1:** Conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Se inicia en superficie hasta una profundidad de 50 metros. Se considera una unidad de baja permeabilidad y por lo tanto, de bajo interés hidrogeológico.
  - ❖ **Unidad Geoeléctrica 2:** Arcillas y margas con niveles aislados de calizas y conglomerados. Subyaciendo de la Unidad Geoeléctrica 1, tenemos desde los 200 – 300m, en la vertical. Su espesor disminuye hacia el NE. Se considera una unidad impermeable y por lo tanto, sin interés hidrogeológico.
  - ❖ **Unidad Geoeléctrica 3:** Calizas y margocalizas. Esta unidad se encuentra a continuación de la anterior unidad. Al NE. de la zona de estudio esta unidad se encuentra más somera. Se considera una unidad permeable por Karstificación y por lo tanto, con importancia para extracción de agua subterránea.
- De lo anterior, se recomienda un sondeo de reconocimiento de acuerdo con las siguientes especificaciones técnicas:
    - ❖ Situación: SEDT-2. Se muestra en la imagen adjunta.
    - ❖ Profundidad de la obra: 300 metros, orientativa.
    - ❖ Al final de las obras de perforación calcular el caudal y evaluar su viabilidad.

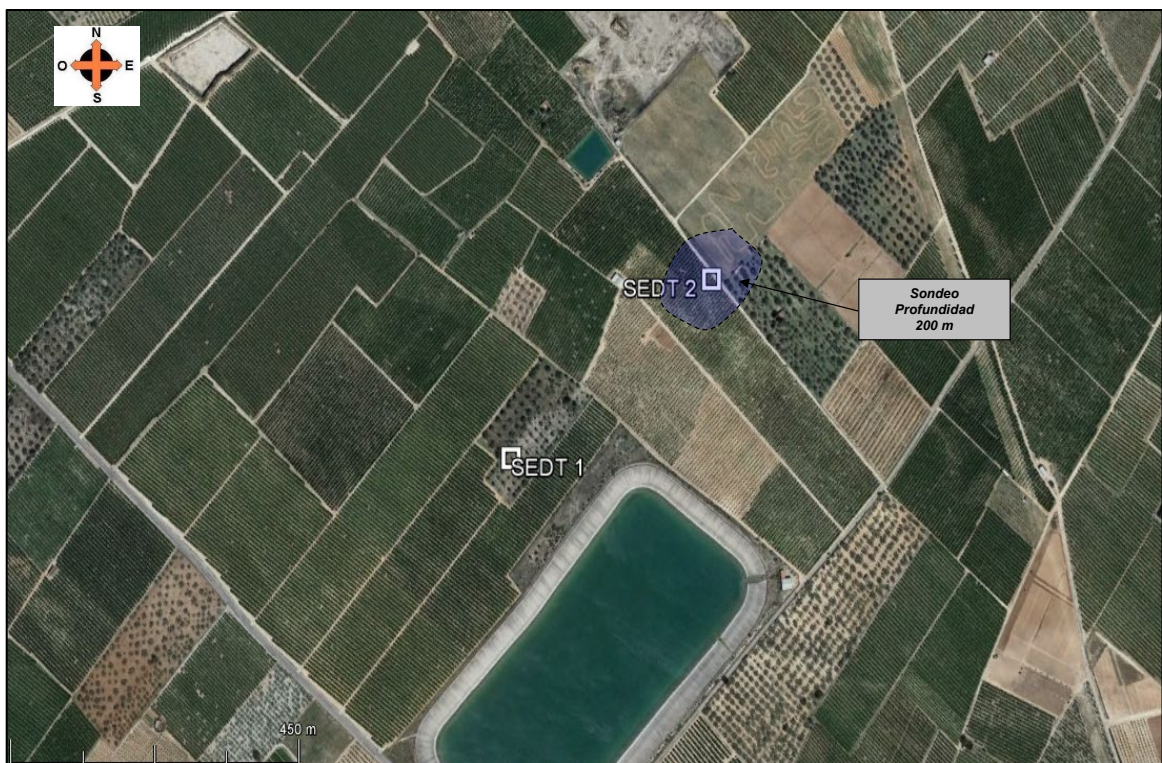


Figura 4.2.7: Situación de la zona recomendada para emplazar el sondeo.

## 4.3 Prospección Hidrogeológica – T. M. Casas del Puerto de Villatoro (Ávila)

### 4.3.1 Introducción

El proyecto responde al requerimiento del Ayto. De Casas del Puerto de Villatoro, para realizar un estudio y determinar las posibilidades hidrogeológicas de los materiales que componen la zona donde se ubican las parcelas (1-18-31) de los polígonos (3-4-6) y con un área 10.8443 hectáreas en el término municipal de Casas del Puerto de Villatoro (Ávila). Figura 4.3.1.



Figura 4.3.1: Situación General del área investigada

La finalidad de la prospección geofísica es estudiar las características geológicas de los suelos y/o rocas, de las parcelas investigadas, de manera que se pueda determinar la estructura y seleccionar las zonas más favorables para el emplazamiento de obras de captación.



### 4.3.2 Objetivos

El objetivo del estudio ha sido la realización de una investigación hidrogeológico-geofísica para determinar la litología y morfología de los materiales que conforman la zona, para ello se ha aplicado la técnica de Perfiles Electromagnéticos V.L.F. En detalle, se han tratado de alcanzar los siguientes aspectos:

- Caracterizar litológica e hidrogeológicamente las unidades geoelectricas existentes en la zona de estudio y detectadas con la prospección geofísica.
- Determinar las zonas más favorables para emplazar sondeos de captación de aguas subterráneas.
- Recomendar el tipo de obra de captación más adecuada a los materiales previstos atravesar.
- Para el área de estudio se consideró el conocimiento de los materiales del subsuelo de la zona de estudio a partir de datos cartográficos y estructurales (Cartografía Geológica Serie MAGNA) y experiencias de estudios en formaciones similares.

### 4.3.3 Emplazamiento de Interés

El terreno está emplazado en el T.M. Casas del Puerto de Villatoro (Prov. Ávila y C.A. Castilla y León – Spain), tal como se puede apreciar en la figura 4.3.1: situación general. La exploración geofísica se situó con las siguientes coordenadas.

Cuadro 1.10: Coordenadas WGS 84 – Ensayo Geofísico VLF

Perfil VLF	Ubicación	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
VLF - 01	INICIO	313119.17	4488010.76	1204.00
	FIN	313198.34	4487915.71	1210.00
VLF - 02	INICIO	313647.63	4488241.06	1221.00
	FIN	313683.00	4488443.35	1212.00
VLF - 03	INICIO	314801.66	4488141.32	1315.00
	FIN	314618.71	4488241.65	1306.00

Cuadro 1.11: Relación del Ensayo de VLF

Perfil	Longitud (m)	Profundidad (m)	Sección
VLf – 01	130.0	100.0	Densidad de corriente (%)
VLf – 02	270.0	100.0	Densidad de corriente (%)
VLf – 03	220.0	100.0	Densidad de corriente (%)

#### 4.3.4 Geología e Hidrogeología de la Zona

Geológicamente, la primera área de estudio se encuadra dentro del Terciario - Neógeno, constituidos por arcillas, limos y arenas (aluvial-coluvial), así mismo la segunda zona de estudio se encuentra constituida por diques de cuarzo y finalmente la tercera zona de estudio se encuentra constituida por un dique de diabasa (Alentejo - Plasencia) (Hojas N°529 Santa María del Berrocal y N°530 Vadillo de La Sierra).

Los emplazamientos con altos intereses hidrogeológicos, que presentan mayores posibilidades serán las formaciones constituida por un dique de diabasa (Alentejo - Plasencia) aflorante al SE del área investigada.



**Plano Geo. (Hojas 529 Sta. María del Berrocal y 530 Vadillo de La Sierra)**

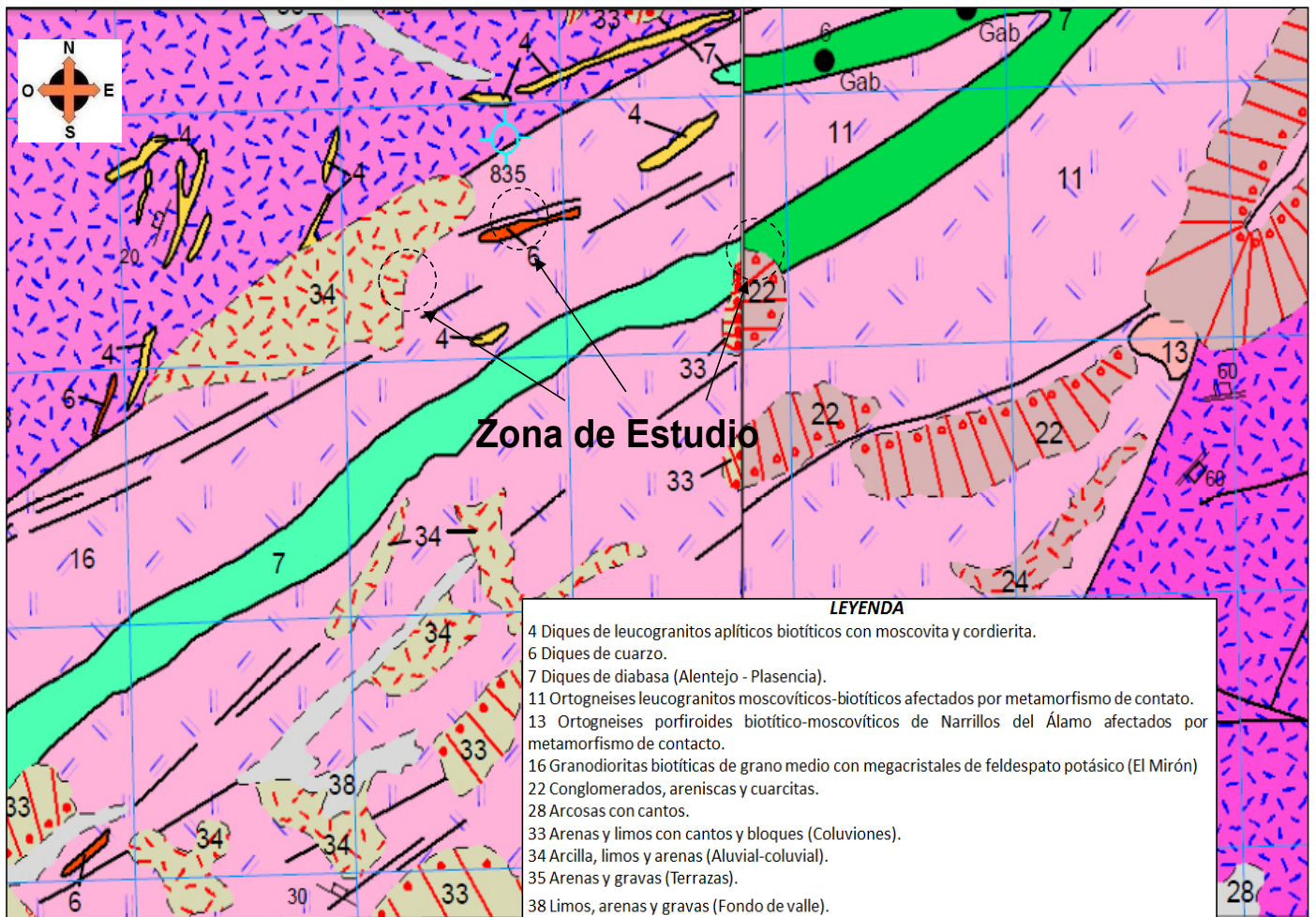


Figura 4.3.2: Plano geológico (Hojas 529 y 530) – IGME

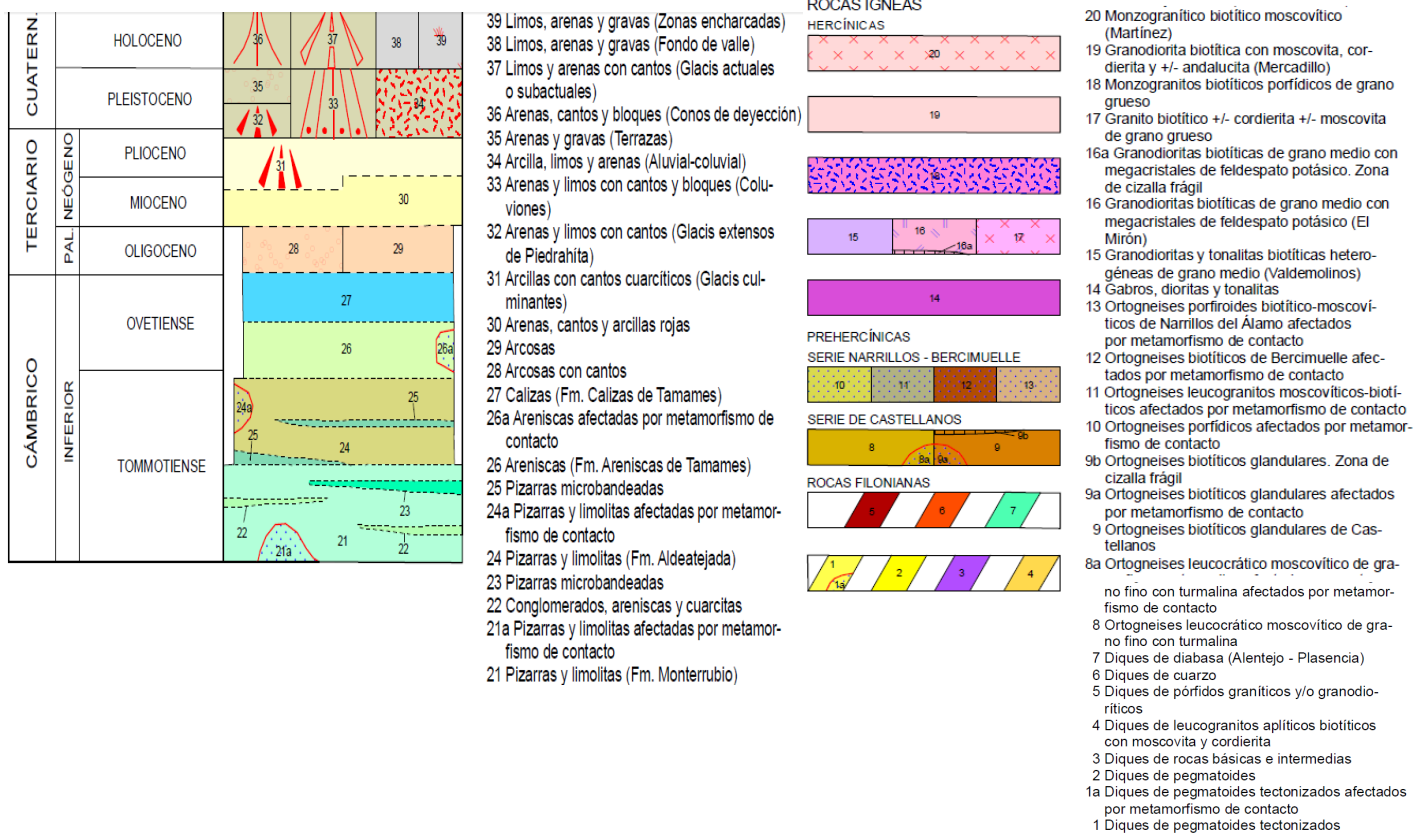


Figura 4.3.3: Leyenda (Hoja 529 Santa María del Berrocal) – IGME.

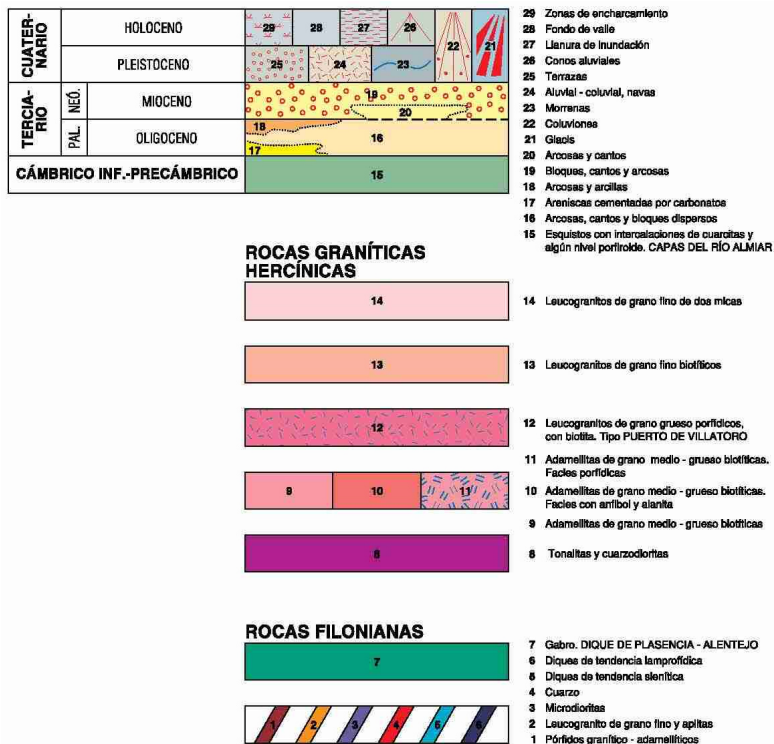


Figura 4.3.4: Leyenda (Hoja 530 Vadillo de La Sierra) – IGME.

#### 4.3.5 Procedimientos de Trabajo de Campo

Los trabajos realizados han consistido en la realización de 3 perfiles electromagnéticos VLF. Dichos trabajos quedan representados en la ortofoto adjunta (Figura 4.3.5).

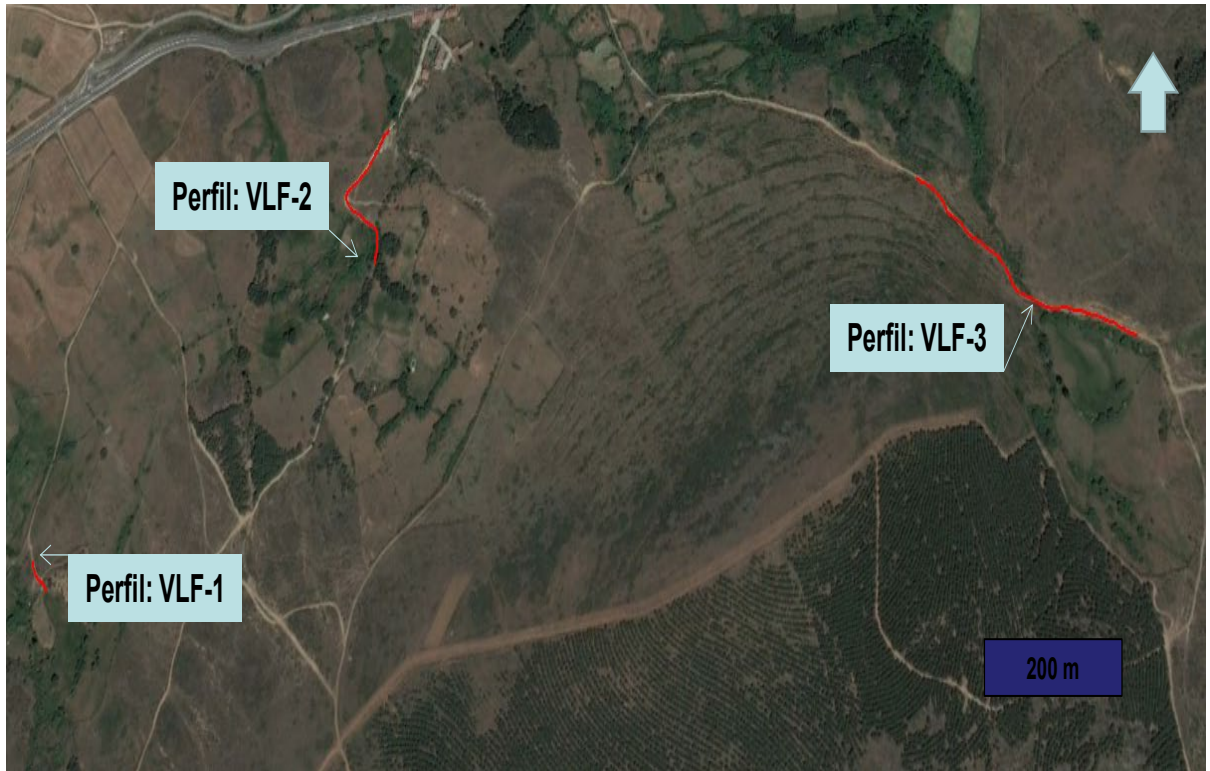


Figura 4.3.5: Situación de Perfiles Electromagnéticos VLF

Dados los condicionantes de penetración necesarios ( $>100$  m), se han ejecutado los perfiles de investigación con las siguientes características:

- Toma de datos cada 10 m en toda el área investigada.
- Perfiles con una longitud variable
- Direcciones preferentes NE paralelas a las posibles fracturas y diques.

#### 4.3.6 Procesamiento e Interpretación de Datos VLF

La adquisición de los perfiles VLF se llevó a cabo en las tres regiones caracterizadas por los cambios de materiales mostrados por la geología regional, identificando los posibles materiales que contenga agua, según lo determinado por las figuras 4.3.6, 4.3.7 y 4.3.8. Como se mencionó en la



sección "2.6.1 Introducción", el objetivo de las mediciones geofísicas fue el reconocimiento de la geología local para localizar fracturas con posibilidad que contenga agua y otros contrastes de conductividad en el subsuelo. Para identificar estas estructuras, los levantamientos de perfil VLF tuvieron que ser transversales a estas estructuras, como se muestra en las figuras 4.3.6, 4.3.7 y 4.3.8. El paisaje en estas regiones es bastante accesible, debido que las áreas son para agricultura (véase la figura 4.3.5). La representación de los perfiles VLF con respecto a las fracturas identificadas y la localización de los fallos identificados por los datos de la VLF, utilizando el software Ramag, de la firma ABEM de Suecia, se presentan en las Figuras 4.3.10, 4.3.12 y 4.3.14. Así mismo se muestran las Figuras 4.3.9, 4.3.11 y 4.3.13, detallando la visualización con Ortofoto-Plano situación del Perfil Electromagnético VLF.

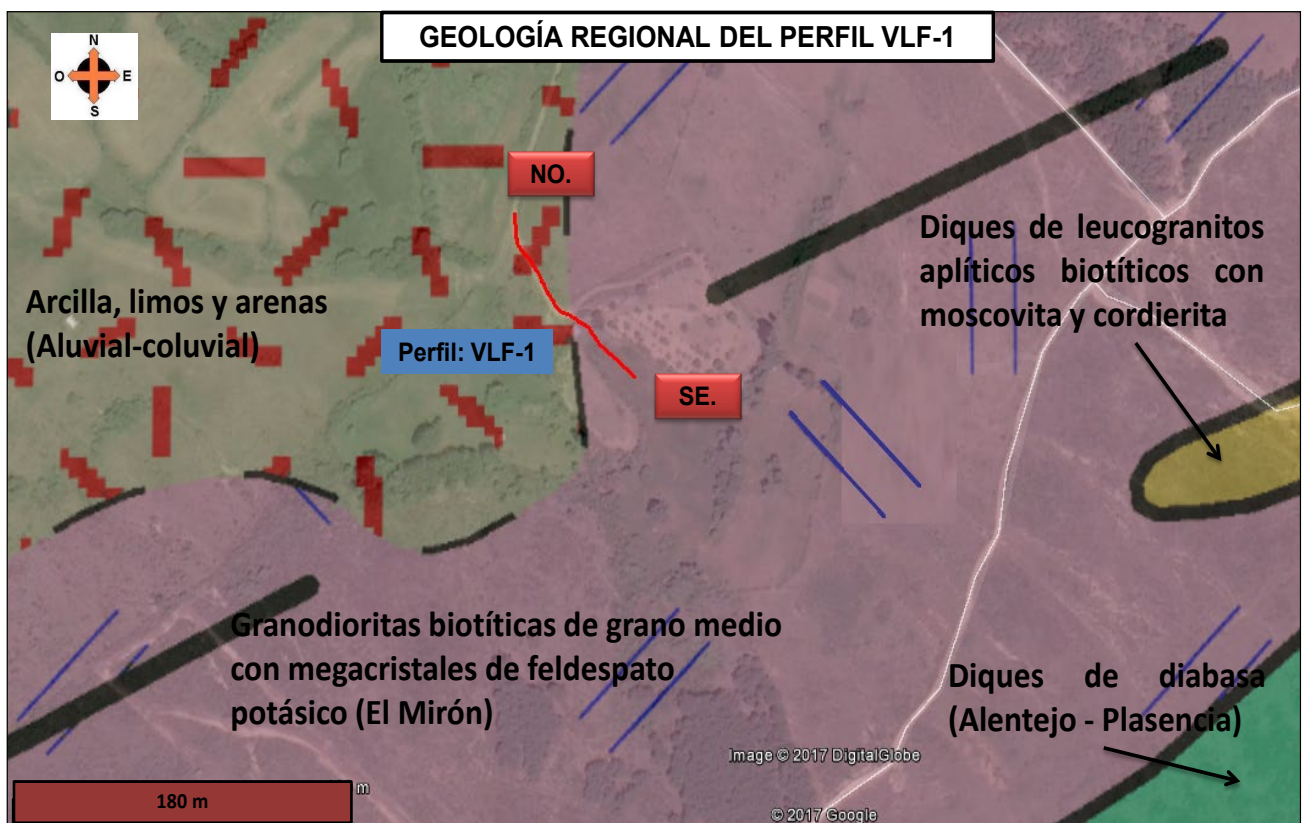


Figura 4.3.6: Geológico regional, perfil VLF-01 (Hojas 529) – IGME.

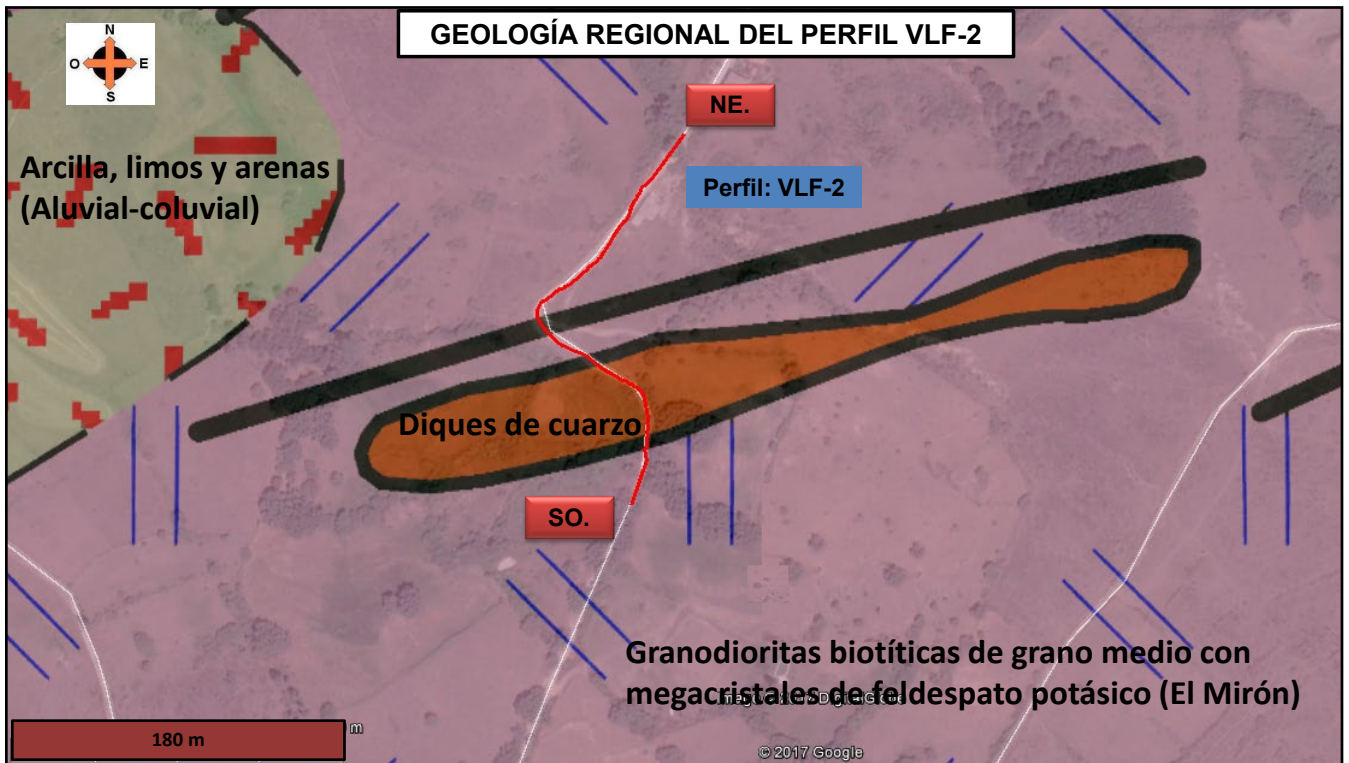


Figura 4.3.7: Geológico regional, perfil VLF-02 (Hojas 529) – IGME



Figura 4.3.8: Geológico regional, perfil VLF-03 (Hojas 529 y 530) – IGME.

#### **4.3.7 Resultado de la Investigación**

##### **Análisis de perfiles Electromagnéticos VLF**

Los resultados obtenidos de los perfiles de densidad de corriente de las parcelas investigadas. El procesado e interpretación de los perfiles y secciones ha tenido como objetivo principal la determinación de las zonas de fracturas y diques con la finalidad de establecer los cambios laterales, así mismo seleccionar los emplazamientos con altos intereses hidrogeológicos.

Los resultados del procesado e interpretación de los tres perfiles realizados se muestran a continuación (Figura 4.3.10, 4.3.12 y 4.3.14).



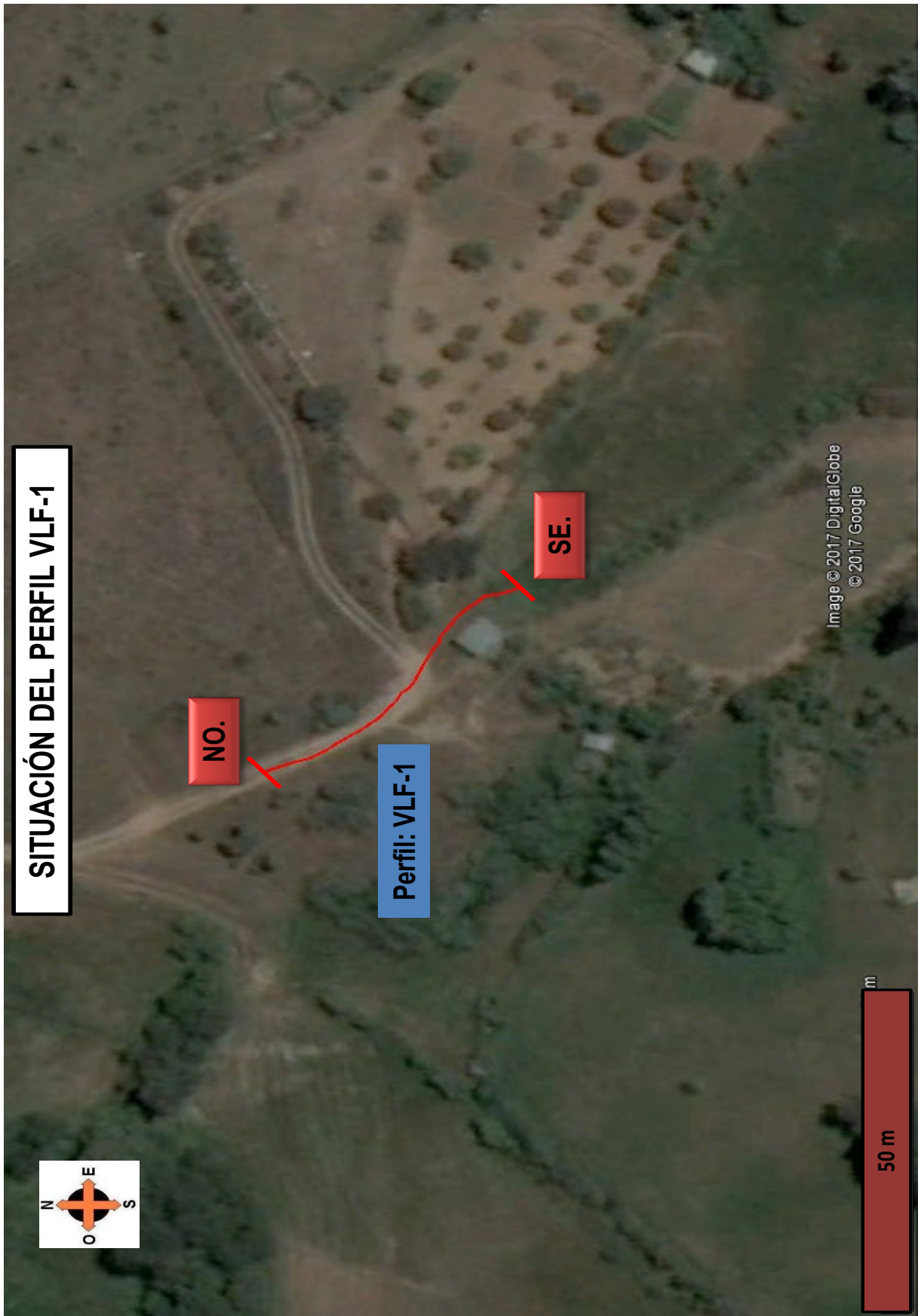


Figura 4.3.9: Ortofoto 1 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-1

# Perfil VLF-1

NO

SE

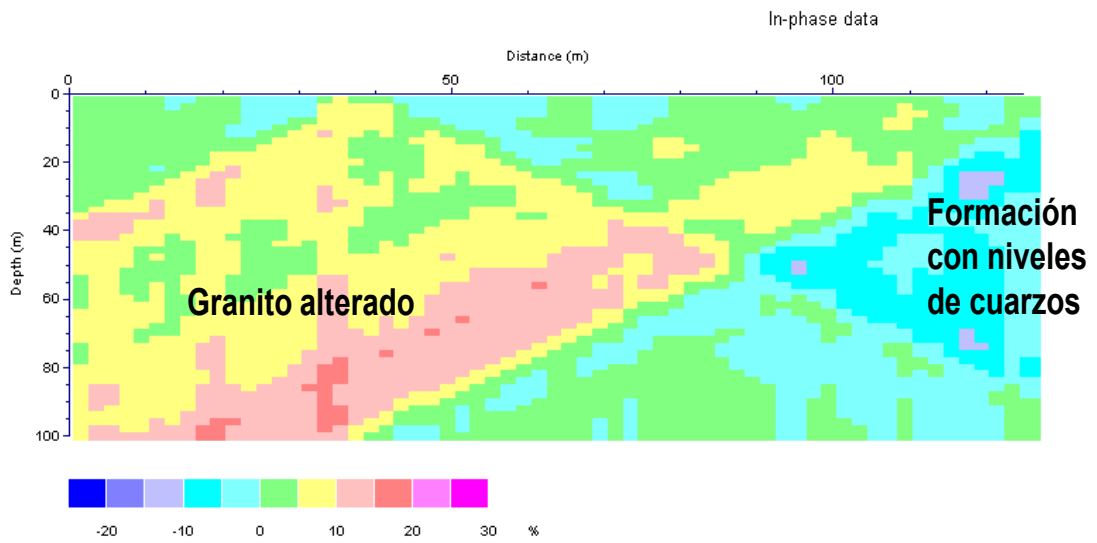
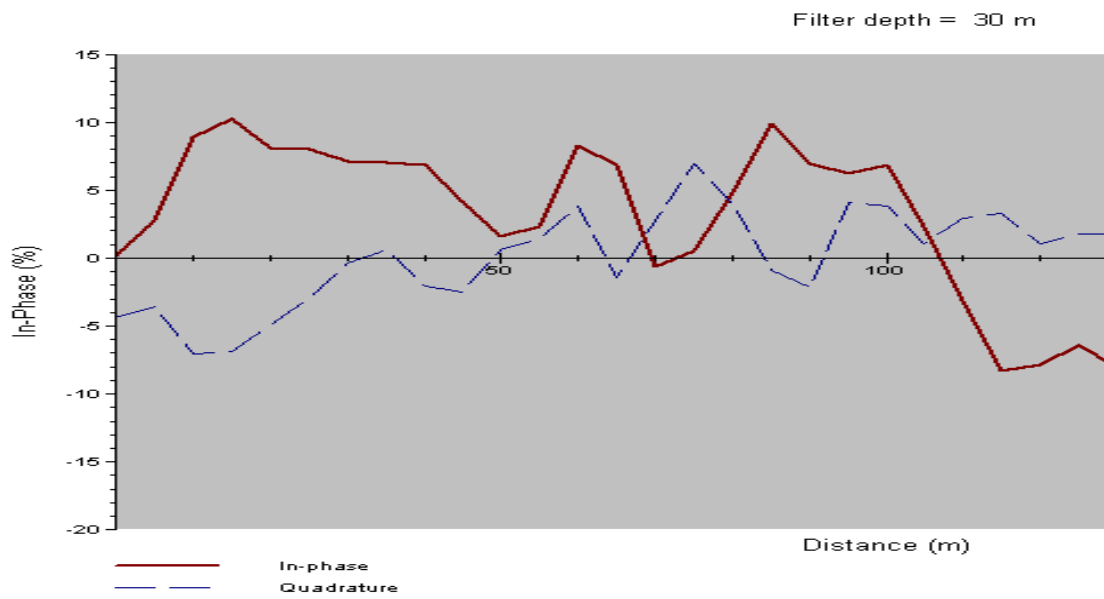


Figura 4.3.10: Perfil Electromagnético VLF-1



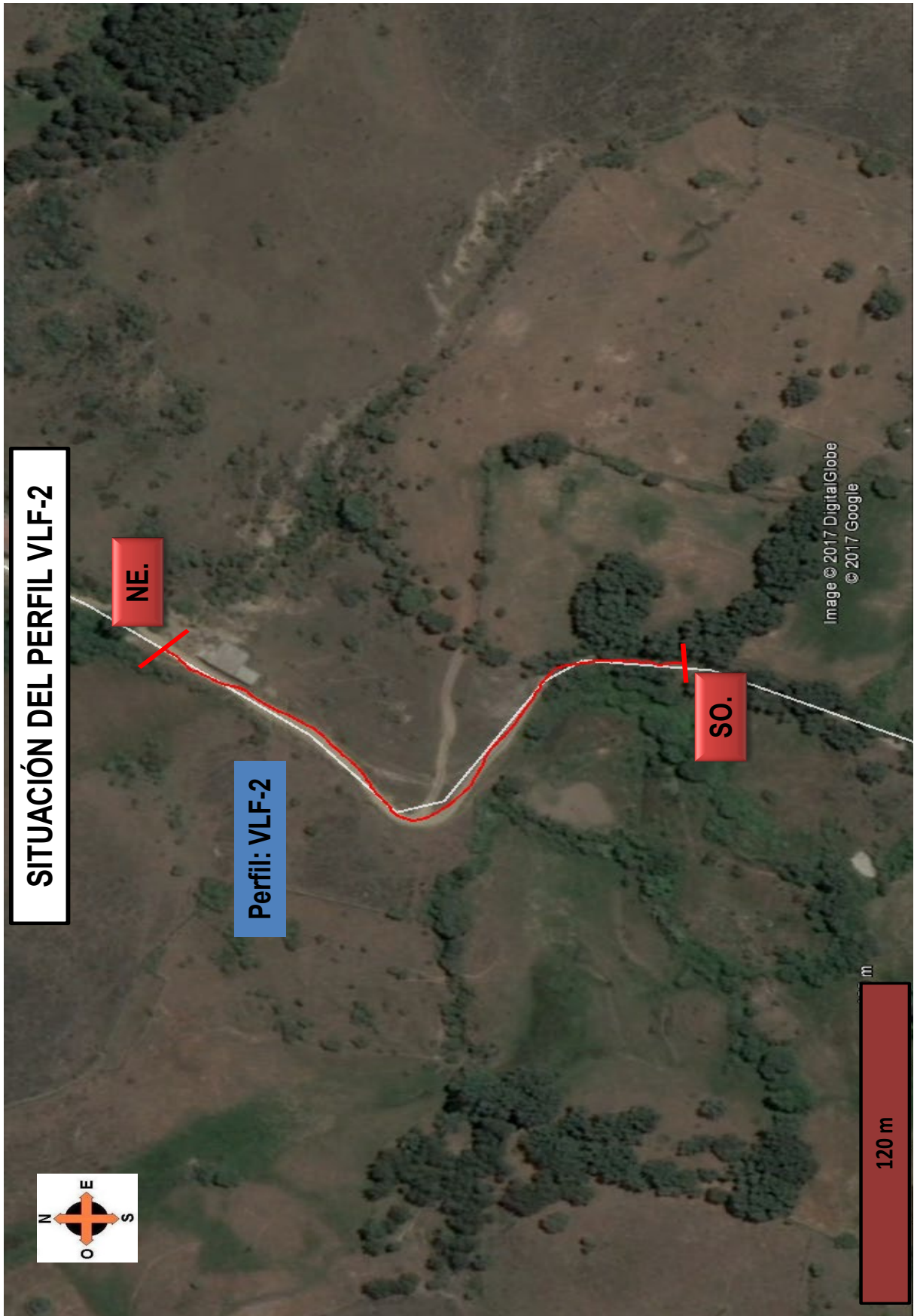


Figura 4.3.11: Ortofoto 2 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-2

# Perfil VLF-2

SO

NE

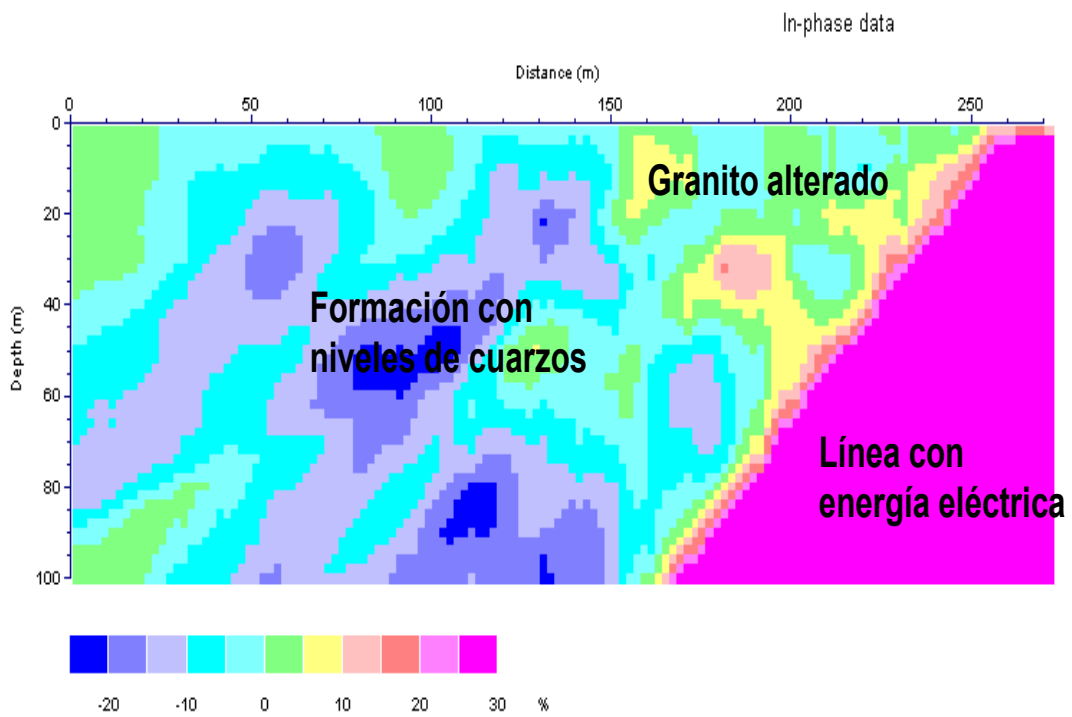
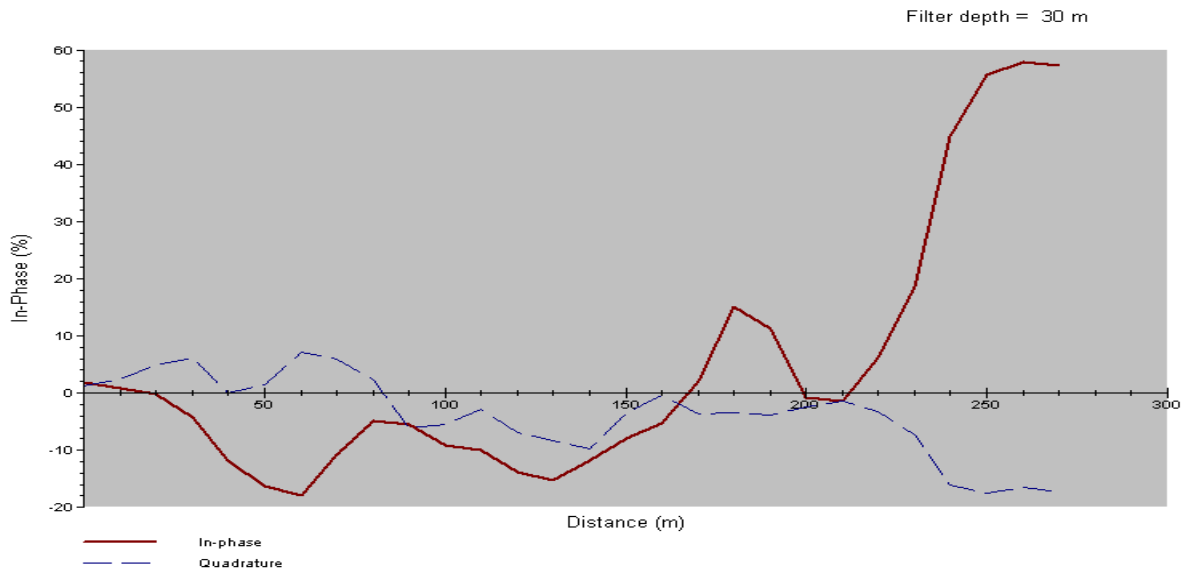


Figura 4.3.12: Perfil Electromagnético VLF-2

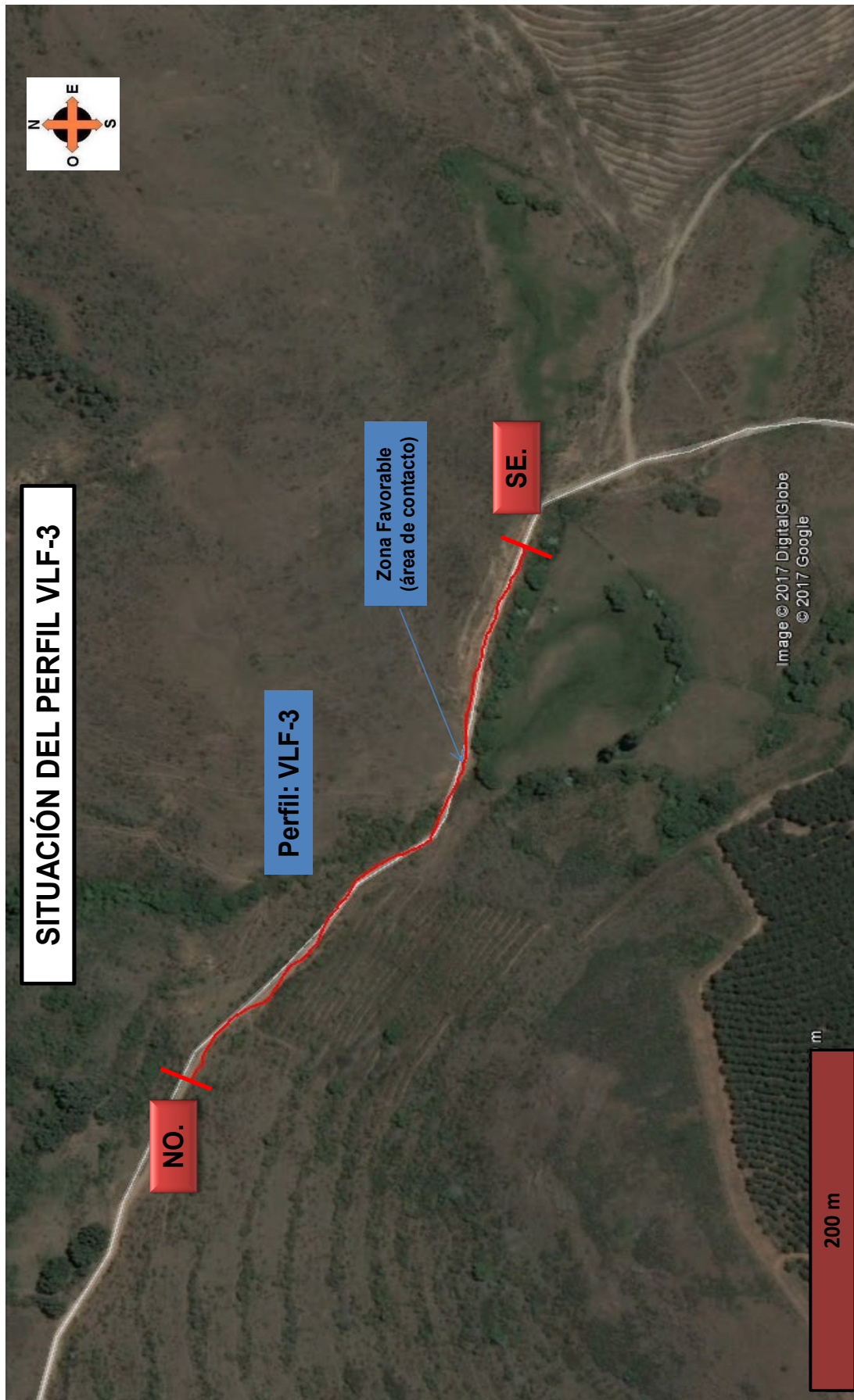


Figura 4.3.13: Ortofoto 3 - Plano situación del Perfil Electromagnético VLF-3.

# Perfil VLF-3

SE

NO

Filter depth = 30 m

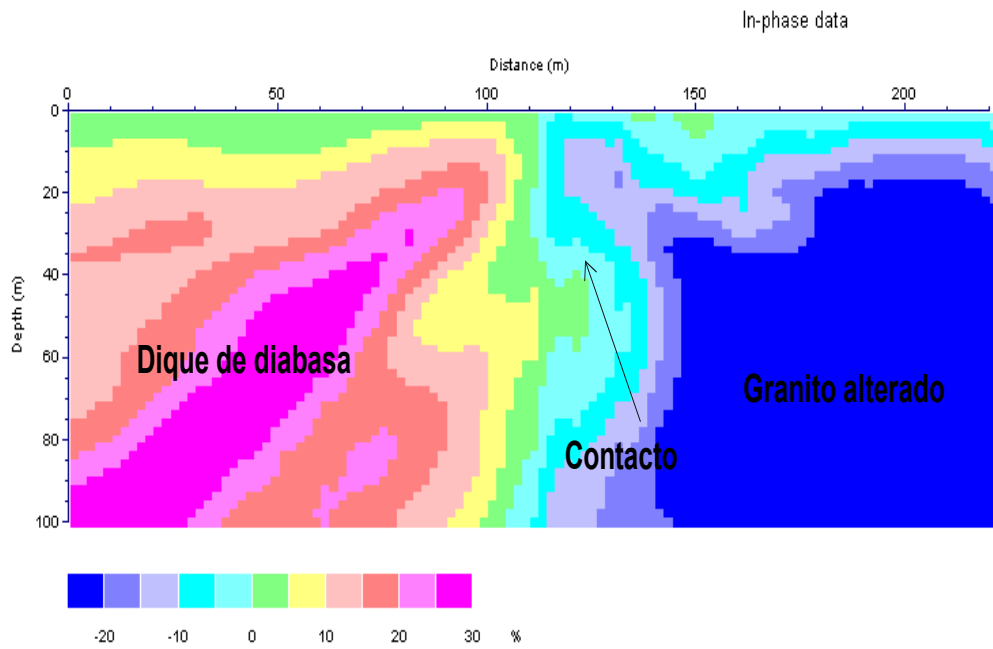
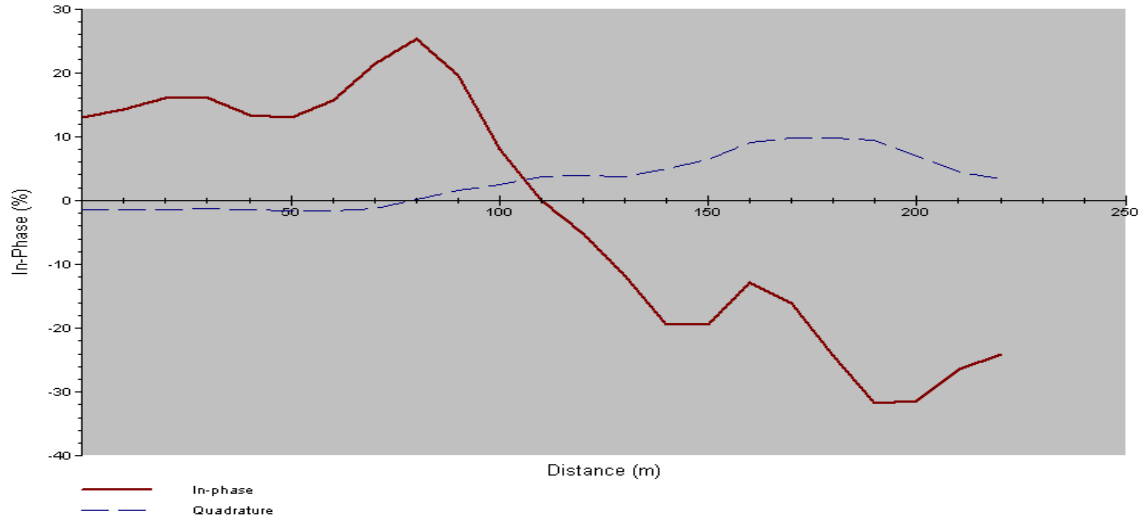


Figura 4.3.14: Perfil Electromagnético VLF-3



El análisis de los perfiles y secciones pone de relieve:

- ❖ **GRANITO ALTERADO**. Constituye la unidad con mayor proporción, debido a la presencia de fracturas y cuarzos.
- ❖ **DIQUE DE DIABASA**. Esta unidad se asocia a materiales con zonas de fracturas o diaclasas de la roca gabro. La zona de mayor grado de alteración y/o contacto se encuentra en el Perfil VLF-3 en la dirección SE - NO.

En la ortofoto adjunta se muestran las áreas de fracturas más importantes detectadas con la prospección geofísica. Figura 4.3.12.

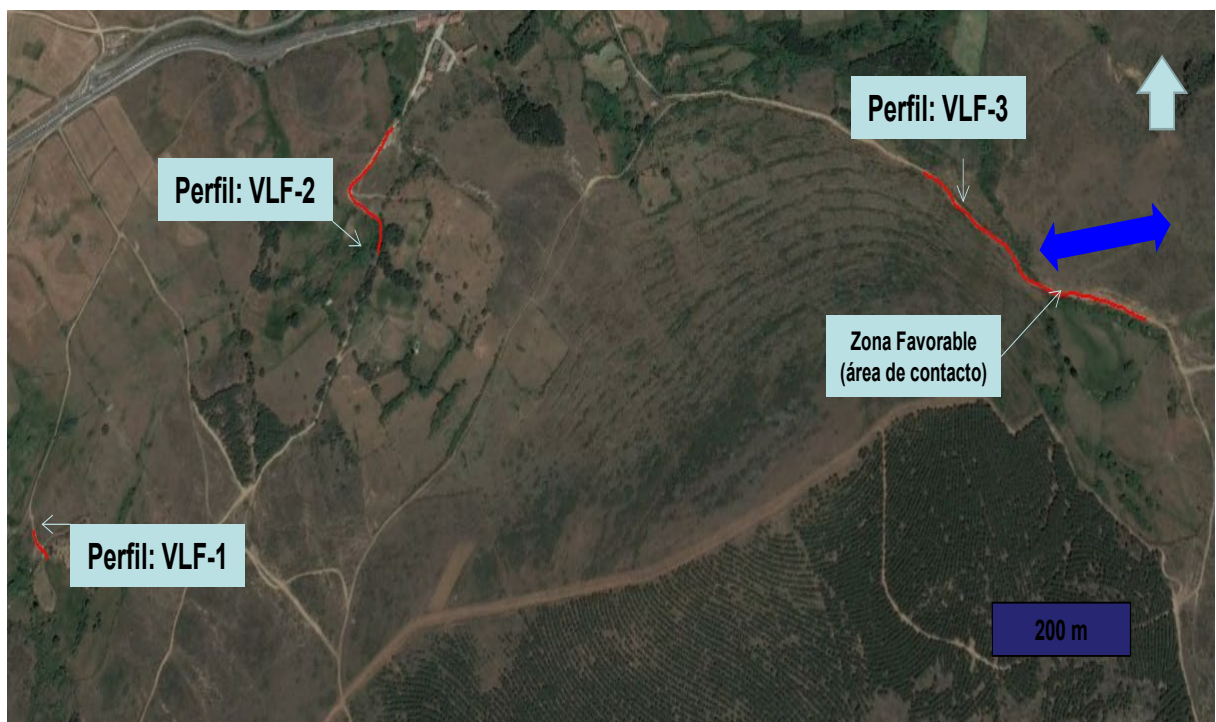


Figura 4.3.15: Zonas favorables detectadas

#### 4.3.8 Conclusiones y Recomendaciones

El estudio geofísico-hidrogeológico realizado permite la obtención de las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Se ha realizado un reconocimiento geológico, hidrogeológico y geofísico de la finca cartografiándose las principales formaciones litológicas existentes en profundidad.

- En referencia al estudio geofísico realizado, el mismo ha facilitado la definición de la estructura general de las rocas existentes, permitiendo caracterizar litológica e hidrogeológicamente las unidades detectadas:
  - **GRANITO ALTERADO**: Constituye la unidad con mayor proporción, debido a la presencia de fracturas y cuarzos. La zona de mayor grado de alteración y/o contacto se encuentra en el Perfil VLF-3 en la dirección SE - NO. Unidad sin posibilidades para captar aguas subterráneas.
  - **DIQUE DE DIABASA**: Esta unidad se asocia a materiales con zonas de fracturas o diaclasas de la roca gabro. La zona de mayor grado de alteración y/o contacto se encuentra en el Perfil VLF-3 en la dirección SE – NO. Unidad con posibilidades para captar aguas subterráneas.
- En todo caso, en la zona investigada los materiales presentan un índice alto debido al contacto del dique de diabasa y por tanto, las posibilidades de captar aguas subterráneas se consideran altas, donde los caudales serán los esperados.
- De cara a llevar a cabo la ejecución de un sondeo se recomienda la zona Sur de la finca (Figura 4.3.12) , las características de la obra serán las siguientes:
  - Situación : Perfil-3
  - Profundidad: 100 m, orientativa.
  - Sistema de perforación: Rotopercusión
  - En base a los resultados se determinará su acabado.

#### 4.4 Discusión De Resultados

1.- Realizar un estudio geofísico para determinar la ubicación de un sitio, con las características ideales para la perforación de un pozo exploratorio, del que pueda extraerse agua subterránea para el abastecimiento de un parque industrial, en especial cuando estamos estudiando áreas muy extensas, según Edgar Alonso Hernández, 2016 en su tesis “Estudio Geofísico de Resistividad Electromagnética para definir las Características Geohidrológicas del Acuífero Apan en un Predio Delimitado”. Exponen los resultados de los 15 sondeos TDEM con un loop de 300x300 m, en las cuales se trazaron 7 perfiles geoelectricos, que permiten visualizar claramente la distribución de los estratos resistivos. El área de estudio, se encuentra en el estado de Hidalgo, 67km en dirección NE del D.F. México y 50Km en dirección SE a Pachuca (México). El objetivo fue definir las características Geo-resistivas de un predio, para posteriormente delimitar las zonas más atractivas para la extracción de agua y proponer los sitios exactos para la realización de pozos exploratorios, así como la profundidad adecuada para obtener los gastos requeridos. Como resultado de su investigación concluye que el sondeo que muestra el mayor espesor de U2a es el sondeo PI-02, por lo tanto se considera este sitio como el más recomendable para la realización de un pozo exploratorio, este tendrá 500m en la vertical, para asegurar el acuífero profundo de Apan. De este modo se podrá asegurar el gasto requerido para el Parque Industrial.

En la presente investigación para la Prospección de Acuíferos – España, se aplicaron los Métodos de: Tomografía Eléctrica, Sondaje TEM y el Very Low Frequency – VLF.

2.- En la presente tesis de maestría, se presenta una anomalía relativa a la intrusión de agua salada que fue detectado por Kunert (2012) y Reisinger (2013), mediante la aplicación de mediciones específicas de conductancia específica (CE) del agua dentro de pozos de observación. La zona se caracteriza por una posición relativamente superficial de la interface entre el agua dulce y el agua salobre en comparación con los alrededores, según Cauich Kau, D. (2015). En su tesis, nos dice que una alta estructura permeable está conectada directamente al mar, la cual permite que el agua salada se presente a una menor profundidad en esta zona. El trabajo de

campo, comprende un área total de 539.94km<sup>2</sup> dentro del cual se encuentran cinco municipios (Mérida, Progreso, Conkal, Chicxulub Pueblo y Ucú). Esta tesis analizó, la variación espacio-temporal de la respuesta Geofísica (resistividad) generada por la recarga natural del agua subterránea sobre una sección perpendicular a la costa. Concluye que de acuerdo con el análisis efectuado la correlación de estas mediciones permitió identificar tres unidades geoelectricas en cada una de las secciones. La unidad más resistiva ( $> 5$  [Ohm-m]), área de mayor interés hidrogeológico el mayor espesor de este cuerpo, llega a profundidades del orden de 45 m. Subyaciendo a esta unidad se encuentra la unidad dos con resistividades ( $>1$  y  $< 5$  [Ohm-m]), la cual esta correlacionada con una mezcla entre el agua dulce y salada, área de bajo interés hidrogeológico, variando su profundidad de inicio desde los 45 m al sur, hasta valores de 10 m. Finalmente la unidad tres con resistividades ( $< 1$  [Ohm-m]), se correlacionada con la zona de agua salada, esto es, debido a la profundidad a la que inicia, la cual varía de 55 m en la zona sur hasta 10 m. En la presente tesis de investigación la caracterización litológica de los materiales, muestra un modelo geoelectrico tricapa con las siguientes características: Unidad Geoelectrica 1: Conformado por conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Se considera una unidad de baja permeabilidad y por lo tanto, de bajo interés hidrogeológico. Unidad Geoelectrica 2: Arcillas y margas con niveles aislados de calizas y conglomerados. Se considera una unidad impermeable y por lo tanto, sin interés hidrogeológico. Unidad Geoelectrica 3: Calizas y margocalizas. Se considera una unidad de permeable por Karstificación y por lo tanto, con interés hidrogeológico.

- 3.- Realizar un estudio geofísico, es importante cuando constituye problemas al suelo, por causas de líquidos provenientes de procesos de filtración, a través del suelo, según Bortolotti Villalobos, A. (2009), en su tesis, nos dice que su proyecto, se emplazó en Zaachila - Oaxaca. El objetivo fundamental de esta investigación fue localizar fracturas y líquidos vertidos, mediante Very Low Frequency. Como resultado de su investigación revela que el botadero, presenta un material de baja resistividad en dirección al SE, y



aumenta en el medio hasta 60m en la vertical, concordando con el conducto del flujo vertido.

La aplicación geofísica del Very Low Frequency (VLF), se usa, como un método rápido de reconocimiento para localizar fracturas con posibilidad que contenga agua y otros contrastes de conductividad en el subsuelo, localización de cavidades, estudios de contaminación y localización de cuerpos mineralizados.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- 1.- La aplicación geofísica de (Tomografía Eléctrica, Sondaje TEM y Very Low Frequency – VLF), resultan ser herramientas válidas la para prospección de acuíferos o exploración de aguas subterráneas, tanto someras como profundas, los mismos que pueden funcionar para España, así como, cualquier otro país del mundo; sin embargo estos métodos pueden ser completados con técnicas alternativas (Ensayos Directos).
- 2.- Los resultados de la Tomografía Eléctrica y los SEDT, en el T.M. Alcalá, dan tres unidades geoeléctricas principales, de las cuales las subunidades UG2 (50.3 y 441Ohm\*m, asociados a dolomitas alteradas, arcillas y yesos) y UG3 (1.9 y 17 Ohm\*m, asociados a arcillas y yesos) se considera una unidad de baja permeabilidad a impermeable y por lo tanto, de bajo interés hidrogeológico. Sin embargo la UG1 tiene un intervalo resistivo entre 441 y 3869 Ohm\*m, valores asociados a Dolomitas y se considera una unidad permeable por fisuración y kartificación, así mismo presenta interés hidrogeológico cuando se encuentra por debajo del nivel freático.
- 3.- Los resultados del TEM, T.M. San Jorge (Castellón), dan tres unidades geoeléctricas: La UG1, presenta valores de resistividad asociados a conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Unidad de baja permeabilidad y por lo tanto, de bajo interés hidrogeológico; La UG2, presenta valores de resistividad asociados a arcillas y margas con niveles aislados de calizas y conglomerados. Unidad impermeable y por lo tanto, sin interés hidrogeológico; La UG3, presenta valores de resistividad asociados a calizas y margocalizas. Unidad permeable por Karstificación y por lo tanto, con interés hidrogeológico.
- 4.- Los resultados del método Electromagnéticos en el dominio de frecuencia (Very Low Frequency – VLF), aplicado en las tres zonas de estudio del Término Municipal de Casas del Puerto de Villatoro (Ávila), dan los siguientes resultados: La zona de estudio 1, El perfil VLF-1, muestra que

cuerpo detectado es muy conductor pero mal conductor, en dirección NO-SE. Los materiales geológicos en el perfil son de granito alterado a formaciones con niveles de cuarzo. La zona de estudio 2, El perfil VLF-2, muestra que cuerpo detectado es mal conductor o resistivo pero mal a buen conductor, en dirección SO-NE. Los materiales geológicos en el perfil son formaciones con niveles de cuarzo a granito alterado. La zona de estudio 3, El perfil VLF-3, muestra que cuerpo detectado es muy conductor a muy resistivo pero buen a mal conductor, en dirección SE-NO. Ese cambio que muestran los cuerpos detectados se debe grado de alteración y/o contacto, entre el granito alterado y el dique de diabasa, con toma de datos cada 10m.

## 5.2 Recomendaciones

Como resultado de los estudios de la presente tesis, se recomienda lo siguiente:

- 1.- Una vez ubicado la perforación de un sondaje por agua, se recomienda realizar pruebas geofísicas en el pozo, a fin de determinar las características y el estado del sondeo para obtener el desarrollo más eficiente del pozo en cuanto a las posibles capas permeables.
- 2.- En la zona de Cádiz, donde se aplicó los métodos de Tomografía Eléctrica y SEDT, se recomienda realizar el sondaje por agua hasta una profundidad de 120 m, por la existencia de permeabilidad, siendo susceptible de contener agua subterránea, por la asociación de los valores de resistividad y materiales geológicos encontrados en los sondeos S-18 y S-19.
- 3.- En la zona de Castellón, por la presencia de una secuencia de calizas intercaladas con margas en la UG3, es susceptible de contener recursos hídricos, por lo que se recomienda una perforación de 300m, para alcanzar ese nivel.
- 4.- En Ávila, se encuentra un contacto de granito alterado con un dique de diabasa, con alta porosidad y gran indicio de contener agua subterránea en el contacto de ambos cuerpos, por lo que se recomienda realizar un pozo en el orden de 100 m, cuya profundidad final se determinara de acuerdo al avance de las perforaciones.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM Designation D6431–99, (2005). Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation.
2. ASTM Designation D6820. Standard Guide for Use of the Time Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigation.
3. ASTM Designation D6639–01. Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigation.
4. ASTM Designation G57, (1995a). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method.
5. Adepelumi, A., Yi, M., Kim, J., Ako, B., Son, J., (2006). Integration of Surface Geophysical Methods for Fracture Detection in Crystalline Bedrocks of Southwestern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, Vol. 7, Pp 1284-1306.
6. ABEM, (2001). *Abem Wadi VLF Instruments. Simple, State-of-the-Art Water and Mineral Prospecting Instruments. Manual de operación*, Encinitas, California, USA.
7. Archie, G. E., (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min Metal. And Petr. Eng.*, Vol. 146, p. 54-62.
8. Brereton, N. R., McEwen, T. J. & Lee, M. K. (1987). Fluid flow in crystalline rocks: relationships between groundwater spring alignments and other surface lineation's at Altnabreac, United Kingdom. *Journal of Geophysical Research*, 92 (B8), 7797-7806.
9. Beck, A.E. (1981) *Physical Principles of Exploration Methods*, Macmillan, London.
10. Bortolotti Villalobos, A. (2009). *Estudio Geofísico Usando Métodos Electromagnéticos en un Medio Fracturado Afectado por Lixiviados*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. Tesis de Master. Oaxaca – México.
11. Christensen, N. B., (1995). *Den Transiente Electromagnetiske Sonderingsmetode*. Lecture notes, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Aarhus, pp 38.
12. Covert C.L., Kaymen D.T., Phillips I.M., and Harrison J.C., (1996). *Very Low Frequency (VLF)*.
13. 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.
14. Cauich Kau, D. (2015). *Caracterización Geofísica de la Recarga Natural en la Región Mérida - Progreso del Acuífero Kárstico Península de Yucatán [Tesis de Maestría]*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

15. DeGroot-Hedlin, C., and Constable, S., (1990). Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, Vol 55, p. 1613-1624.
16. Drahor, M., (2006). Integrated Geophysical Studies in the Upper Part of Sardis Archaeological Site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 50, Pp 205-223.
17. Dutta, S., Krishnamurthy, N., Arora, T., Rao, V., Ahmed, S., Baltassat, J., (2006). Localization of Water Bearing Fractured Zones in a Hard Rock Area Using Integrated Geophysical Techniques in Andhra Pradesh, India. *Hydrogeology Journal*, Vol.14. Pp 760-766.
18. Eze, C., Mamah, L., Cooney, I., (2004). Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) Response from a Lead Sulphide Lode in the Abakaliki Lead/Zinc Field, Nigeria. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 5, Pp 159-163.
19. Edwards, L. S., (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, Vol. 42, No. 5, p. 1020-1036.
20. Ellis, R. G. & Oldenburg, D. W. (1994): "The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach". *Geophys. J. Int.* 119, pp. 187-194.
21. Edgar, Alonso H., (2016). Tesis "Estudio Geofísico de Resistividad Electromagnética para definir las Características Geohidrológicas del Acuífero Apan en un Predio Delimitado". Facultad De Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma De México, Mexico.
22. Felipe A., Daza H., (2012). Tesis "Métodos Geoeléctricos Aplicados a la Exploración de Aguas Subterráneas y Termales". Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Concepción-Chile.
23. Fitterman DV, Stewart MT., (1986). Transient Electromagnetic Sounding for Groundwater. *Geophysics*, 51, 995 – 1005.
24. Flathe, H. 1955. Possibilities and Limitations in Applying Geoelectrical Methods to Hydrogeological Problems in the Coastal Areas of North west Germany. *Geophysical Prospecting*, vol. 3, pp. 95-110.
25. Flathe, H. 1970. Interpretation of Geoelectrical Resistivity Measurements for Solving Hydrogeological Problems. In Morely, E. W. (ed.), *Mining and Groundwater Geophysics: Geological Survey of Canada Economic Geologica Report*, no. 26, pp. 580-597.
26. Ganerod, G., Ronning, J., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmoy, K., Nilsen, B., Braathen, A., (2006). Comparison of Geophysical Methods for Sub-Surface Mapping of Faults and Fracture Zones in a Section of the Viggja Road Tunnel, Norway. *Bull Eng Geol Env*, Vol 65. Pp 231-243.
27. Griffiths, D.H. and Turnbull, J., (1985). A multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3 (No. 7), 16-20.
28. Griffiths, D.H., Turnbull, J. and Olayinka, A.I., (1990). Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break* 8, 121-129.

29. Hutchinson, P., y Barta, L., (2002). VLF Surveying To Delineate Longwall Mine-Induced Fractures. *The Leading Edge*, Pp 491-493.
30. Harrington. R.F., (1961). "Time-Harmonic Electromagnetic Fields". Me .Graw-Hill.
31. IGME. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. 2ª serie, Hoja del Magna Nº 1063 Algar. Madrid, 1975.
32. IGME. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. 2ª serie, Hoja del Magna Nº 546 Ulldecona. Madrid, 1975.
33. IGME. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. 2ª serie, Hojas 529 Santa María del Berrocal y 530 Vadillo de La Sierra. Madrid, 1975.
34. Jeng, Y., Lin, M., Chen, Ch., (2004). A Very Low Frequency Electromagnetic Study of the Geo Environmental Hazardous Areas in Taiwan. *Environmental Geology*, Vol. 46, Pp 784-795.
35. Jeng, Y., Lin, M., Chen, Ch., (2004). A Very Low Frequency Electromagnetic Study of the Geo Environmental Hazardous Areas in Taiwan. *Environmental Geology*, Vol. 46, Pp 784-795.
36. Juan L. Plata T. et al. (2005). Tomografía Geoelectrica: Desarrollo Para La Caracterización de Acuíferos. Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Instituto Geológico y Minero De España, Universidad de Barcelona.
37. Juan N. Mendoza N., (2010). Tesis: Exploración De Aguas Subterráneas En La Región Lambayeque – Perú Usando Imágenes Landsat y Aster. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú.
38. 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.
39. Karous, M., Hjelt, S.E. (1983). Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements. *Geophysical Prospection*. Vol. 32, Pp 782-794.
40. Kaya, M., Özürlan, G., Sengül, E., (2007). Delineation of Soil and Groundwater Contamination Using Geophysical Methods at a Waste Disposal Site in Çanakkale, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 135. Pp 441-446.
41. Knödel, K., (2007), *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*. Ed. Springer. Estados Unidos, p. 1357.
42. Kunert, M. J., (2012). Groundwater in the Transect from the City of Mérida to the Coastal Ecosystems (Yucatán, México). Changes of Groundwater Quality with Time in the City Area and Vulnerability of the Karst Aquifer. Master Thesis. RWTH Aachen (Faculty of Georesources and Materials Engineering), 140 pp., Aachen.
43. Li, Y. and Oldenburg, D.W., (1992). Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*, 109, 343-362.
44. Liu, H., Liu, J., Yu, Ch., Ye, J., Zeng, Q., (2006). Integrated Geological and Geophysical Exploration for Concealed Ores Beneath Cover in the

- Chaihulanzi Goldfield, Northern China. *Geophysical Prospecting*, Vol. 54, Pp 605–621.
45. Lines, L. R. & Treitel, S. (1984): "A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems". *Geophysical Prospecting* 32 (2), pp. 159-186.
  46. Loke, M.H., (1996 – 2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
  47. Loke, M.H., and Barker, R.D., (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, Vol. 44, p. 131-152.
  48. Manual de instrucciones "Rapid 2-D Resistivity & IP Inversión Using The Least-Squares Method". *Geoelectrical Imaging 2-D & 3D GEOTOMO SOFTWARE*.
  49. McGillivray, P.R. and 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.
  50. McNeill, J. D. (1980), Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Geonics Limited Technical Note Tn-6*.
  51. McNeill, J.D., (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies: in *Geotechnical and Environmental Geophysics*, ed: S.H.Ward, SEG, IG#5, Vol. 1: P.191-218.
  52. McNeill JD, Labson VF (1991) Geological mapping using VLF radio fields. In: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics II*. Soc, Exp. Geophys., pp. 521-640.
  53. Navarro Luna, R. A., (2006). Aplicación de pruebas electromagnéticas en el dominio de tiempo (TDEM) para caracterización de recursos hídricos en Venezuela. Tesis de ingeniería. Venezuela: Universidad Simón Bolívar, 86 pp.
  54. Orellana, E., (1972). *Prospección Eléctrica en Corriente Continua*. Editorial Parafino, Madrid.
  55. Olayinka, A. I., (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 45, p. 63-81.
  56. Oskooit, B., Pedersen, L., (2005). Comparison between VLF and RMT Methods. A Combined Tool for Mapping Conductivity Changes in the Sedimentary Cover. *Applied Geophysics*, Vol. 57, Pp 227– 241.
  57. Ogilvy, A. A. 1970. *Geophysical Prospecting for Groundwater in the Soviet Union*, in Morely E. W. (ed.), *Mining and Groundwater Geophysics: Geological Survey of Canada Economic Geological Report*, no. 26, pp. 536-543.
  58. Ogilvy, R. D., & Lee, A. C., (1991). Interpretation of VLF-EM In-Phase Data Using Current Density Pseudosections. *Geophysical Prospecting*, 39, 567-580.



59. Pazdirek, O. and Blaha, V., (1996). Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts. Amsterdam.
60. Pedro Carrasco G., (2013). Tesis Doctoral. Avance en Técnicas Geofísicas para la Caracterización del Subsuelo Mediante Innovación y el Uso de Herramientas de Gestión de Información Espacial. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca. Ávila - España.
61. Pedro Martínez P., (2006). Aplicación de Diferentes Técnicas no Destructivas de Prospección Geofísica a Problemas Relacionados con Contaminación Ambiental Producida por Diferentes Actividades Antrópicas en la Región de Murcia. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena. Tesis Doctoral. Murcia – España.
62. RAMAG Instruction Manual, Ver. 2.2., (2002). VLF survey planning and interpretation software. Encinitas, California.
63. Reisinger, T., (2013). Preliminary Hydrogeological Model and 2D Groundwater Flow Modelling of the Karst Aquifer from Mérida to the Northern Coast (Yucatán, México). Master Thesis. RWTH Aachen (Faculty of Georesources and Materials Engineering), 143 pp., Aachen.
64. Reynolds, J. M. (2011). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, Chichester, 2nd Edition.
65. Spiker Algorithm. Smith et al., (1994). An Automatic Technique for Presentation of Coincident - Loop, Impulse-Response, Transient Electromagnetic. Data: geophysics, vol. 59, p. 1542-1550.
66. Soupios, P., Papadopoulos, N., Papadopoulos, I., Kouli, M., Vallianatos, F., Sarris, A., Manios, T., (2007). Application of Integrated Methods in Mapping Waste Disposal Areas. Environ Geol, Vol. 53, Pp. 661-675.
67. Sharma, S., Baranwal, V., (2005). Delineation of Groundwater-Bearing Fracture Zones in a Hard Rock Area Integrating Very Low Frequency Electromagnetic and Resistivity Data. Applied Geophysics, Vol. 57, Pp. 155-166.
68. Sheriff, R.E., (2002). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, 4th edn, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.
69. TERRATEM, Operator's Manual, (1993). Types M, MM and MMS, V61.4.9. Mineral Control Instruments Limited (ACN 007 954 627) Australia.
70. Ward, S. H., and Hohmann G.W. (1988), Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. En: Nabighian M.N. (Ed.) Electromagnetic Methods Applied To Geophysics, Vol. 1, Ch. 4.
71. Ward, S. H., (1990). Resistivity and induced polarization methods. Geotechnical and environmental geophysics, Vol. I: Review and tutorial, p. 147-190.
72. Wolke, R. & Schwetlick, H. (1988):" Iterative reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons". SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations, 9, pp. 907-921.

73. Zlotnicki, J., Vargemezi, G., Mille, A., Bruere, F., Hammouya, G., (2006) State of the Hydrothermal Activity of Soufrie` Re of Guadeloupe Volcano Inferred by VLF Surveys. Journal of Applied Geophysics, Vol. 58, Pp 265-279.
74. Zohdy, A. A. R. 1969. The Use of Schlumberger and Eqatorial Soundings in Groundwater Investigations near El Paso, Texas. Geophysics, v. 34, pp.713-728.
75. Zohdy, A. A. R., Eaton, G. P. and Mabey, D. R. 1974. Application of Surface Geophysics to Ground Water Investigation. U. S. G. S. Techniques of Water-Resource Investigation, Book 2.