

Universitat de Barcelona  
Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques  
Departament de Geodinàmica i Geofísica

**NOUS ASPECTES METODOLÒGICS EN  
L'EXPLORACIÓ ELÈCTRICA I  
ELECTROMAGNÈTICA**

Memòria presentada per Anna Gabàs i Gasa per optar al títol de Doctora en Física.

Aquesta tesi ha estat realitzada dins el Programa de Doctorat Ciències de la Terra, bienni 1999-2001, de la Universitat de Barcelona.

Director:

Dr. Alejandro Marcuello Pascual

Barcelona, setembre 2003



Al meu Pare i a la meva Mare, que m'han ensenyat tot el que sóc. M'han ensenyat a caminar per avançar, a somniar, escoltar i sentir, a aprendre per a créixer, a lluitar per a viure, a estimar i ser estimat.

Anna  
Setembre, 2003



## Agraïments

Per a fer aquesta tesi he tingut la sort de comptar amb moltes persones que m'han donat els seus coneixements, suport i ajuda. Gràcies a tots i perdoneu si per error algú no queda esmentat.

Primer de tot, vull agrair al Dr. Alejandro Marcuello, Director d'aquesta Tesi, l'esforç constant, les hores dedicades, la paciència i l'ajuda rebuda, tant per entendre el món de la prospecció geofísica com el món de l'ensenyament universitari.

A la Dra. Pilar Queralt pels seus consells científics, per l'ajuda i col·laboració en la realització de les classes, i és clar, per la seva l'amistat.

Al Juanjo per l'ajuda que m'ha donat des del primer dia que ens vam conèixer, i a la Bea, l'Anna, la Clàudia i l'Ester pels ànims que m'han donat constantment, l'amistat i el bon ambient que tenim dins aquest grup de treball.

A tots els que comparteixen o han compartit els cafès al bar al llarg d'aquests anys. A l'Hector, a l'Oscar F., a l'Oscar G., a l'Eva, a la Berta, a l'Albeiro, a la Núria, a la Wiebke, al Pau, al Gerard, a l'Oriol F. i a l'altre Oriol F., a la Maria, a la Marta i a la Ylènia. Espero no haver-me deixat a ningú, ja que sou molts. Gràcies per aquestes pauses de diversió que fan el dia a dia menys dur.

A tots els membres del Departament de Geodinàmica i Geofísica, i especialment, a la Glòria i a l'Eduard per aguantar-me com a companya de despatx.

A la Dra. Teresa Texidó i altres membres de l'Institut Cartogràfic de Catalunya, per deixar en les meves mans l'equip de tomografia elèctrica i permetre'm abandonar l'ordinador.

Al Dr. René Chávez per acollir-me a la gran Ciutat de Mèxic D.F. Al Dr. Andrés Tejero per les dades de camp. A la Dra. Leticia Flores per compartir l'ordinador. A tots els amics que vaig fer allà per ajudar-me a no perdre'm en aquesta gran ciutat. Al Pedro i a la Denisse, a la Martha, a l'Oscar, a l'Ariadna, a la Rocío, a l'Àngela i al Paco. Gràcies

per a fer-me tan agradable l'estada de tres mesos fora de casa i donar-me la possibilitat de conèixer una petita part del vostre país.

Al Dr. Lluís Cabrera i al seu equip per facilitar-nos la realització de les campanyes de tomografia elèctrica a Caspe.

Finalment, vull donar especialment les gràcies a la meva família.

En primer lloc, als meus Pares que em van transmetre les ganes de conèixer i d'aprendre. A la meva Mare per estar sempre al meu costat i al meu Pare per haver deixat petjada dins meu i ser-hi d'aquesta manera tan especial.

Als meus germans per ser-hi també en tot moment. A l'Àngela per les xerrades, els consells literaris i els llibres que em recomana per a desconnectar-me de la realitat. A l'Àngel per la portada de la tesi i les estones divertides que passem junts. Al Dani i a la Montse per donar-me aquesta fantàstica injecció de vida, en Martí. I al Martí per ser el primer que fa créixer la nostra família i que dóna un color especial a la vida.

A la família de La Pobla, Jordi, Dolors, Helena, Carola, Montserrat i Pilar, per a rebre'ns sempre amb gran il·lusió. I a la part de la família que ja no és amb nosaltres, també moltes gràcies per tot el que em vàreu ensenyar.

Finalment, a en Joan, per la companyia del dia a dia, per veure sempre el vas mig ple i transmetre-m'ho, per les estones que hem rigut i plorat junts, i per buscar sense fi allò que ens és vital i essencial.

Tots plegats m'heu ajudat a aconseguir aquesta fita que semblava que no tenia final.

A tots moltes gràcies.

Part d'aquesta tesi ha rebut suport financer dels projectes REN2002-04538-C02-01 i BTE 2001-3650.

## **RESUM**

Els mètodes elèctrics i electromagnètics caracteritzen les estructures del subsòl mitjançant la propietat física del medi anomenada conductivitat elèctrica. Aquests mètodes enregistren determinats components del camp electromagnètic, els quals poden ser generats per una font natural o artificial. Les respostes mesurades depenen tant de la composició del terreny com de les característiques de la font emissora i dels receptors.

Dins aquest ampli conjunt de mètodes d'exploració, aquesta tesi se centra en l'estudi dels mètodes magnetotel·lúric i elèctric de corrent continu. Aquestes dues tècniques poden complementar-se i la integració de les seves dades pot millorar significativament els models que descriuen la conductivitat elèctrica del terreny.

L'obtenció de models que descriuen adequadament el subsòl és un dels aspectes més importants dins el camp de la prospecció geofísica. Els models obtinguts a partir de les respostes experimentals són el resultat d'un elaborat procés anomenat problema invers, del qual es descriuen els fonaments en un dels capítols de la memòria.

Aquest treball presenta el desenvolupament de diferents aspectes metodològics sobre els mètodes magnetotel·lúric i elèctric de corrent continu, amb els objectius de millorar el tractament de les dades experimentals i d'optimitzar el procés de la inversió.

Així la memòria es pot dividir en dues grans parts, segons els dos mètodes anteriors, cadascuna amb uns objectius específics.

En el mètode magnetotel·lúric es presenten dos aspectes diferenciats i innovadors. L'objectiu del primer és l'optimització de la informació que s'introdueix en la inversió per tal d'evitar que, per exemple, cert tipus de respostes controlin el resultat. Per això s'estudia la influència de cada tipus de resposta magnetotel·lúrica en aquest procés. El segon aspecte té l'objectiu de desenvolupar una nova metodologia per identificar i corregir l'efecte de la distorsió galvànica sobre les dades experimentals. Aquest efecte pot conduir a una errònia interpretació del subsòl, per això la seva correcció s'aplica com un pas previ a la seva interpretació de les dades.

La metodologia segueix dos passos, en el primer s'obtenen unes expressions analítiques a partir de les equacions fonamentals del mètode magnetotel·lúric (equacions de Maxwell), i en el segon pas, s'avaluen aquestes expressions amb dades

---

sintètiques i dades experimentals.

Els resultats obtinguts són molt satisfactoris. Per un costat es presenta una nova relació teòrica entre els errors de dues respostes magnetotel·lúriques. Aquest capítol es completa amb la utilització d'un mètode alternatiu que permet estimar relacions entre magnituds quan no és possible deduir-les a partir de desenvolupaments analítics. Per un altre costat, es presenta un nou mètode de correcció de la distorsió galvànica mitjançant l'ús de les respostes magnetotel·lúriques que requereix només l'ajust a l'equació d'una recta.

El treball realitzat amb el mètode de prospecció elèctrica de corrent continu té com a objectius l'elaboració d'un programa de modelització i la d'un programa d'inversió en dues dimensions.

Per a controlar i optimitzar les diferents etapes dels processos, s'han implementat diferents aspectes que milloren la resolució d'aquests programes. En la modelització es tracten qüestions com la generació de malles, la determinació del potencial elèctric antitransformat i la incorporació dels efectes de la topografia. En la inversió s'aprofundeix en el càlcul de la matriu sensibilitat.

Els dos programes han estat aplicats sobre els perfils de sondejos elèctrics verticals i sobre els perfils de tomografia elèctrica, en concret amb els dispositius Dipol-Dipol i Wenner-Schlumberger. Els resultats de la modelització i de la inversió s'han comparat amb els obtinguts per altres programes comercials donant resultats equivalents.

Aquesta tesi forma part d'una primera etapa en la integració de les dades geoelèctriques, que correspon a una línia de recerca actual en la Prospecció Geofísica, i obre noves perspectives de futur en aquest camp.

---



## Índex

Índex de taules .....	v
Índex de figures .....	vii
PRESENTACIÓ .....	1

### **CAPÍTOL 1: FONAMENTS DEL MÈTODE MAGNETOTEL·LÚRIC**

1.1 - INTRODUCCIÓ .....	9
1.2 – INICIS DEL MÈTODE MAGNETOTEL·LÚRIC .....	9
1.3 – INTRODUCCIÓ AL MÈTODE MAGNETOTEL·LÚRIC .....	10
1.3.1 - INSTRUMENTACIÓ .....	13
1.4 – EQUACIONS DEL MÈTODE MAGNETOTEL·LÚRIC .....	14
1.5 - LES RESPOSTES MAGNETOTEL·LÚRIQUES .....	17
1.5.1 - IMPEDÀNCIA (Z) .....	17
1.5.1.1 - DIMENSIONALITAT DE L'ESTRUCTURA .....	20
1.5.2 - FUNCIO DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA .....	23
1.6 - LIMITACIONS DEL MÈTODE MAGNETOTEL·LÚRIC .....	24
1.6.1 - LA DISTORSIÓ GALVÀNICA .....	25
1.6.2 - LA DISTORSIÓ INDUCTIVA .....	27
1.6.3 - EFECTES SOBRE LES DADES MESURADES .....	28
1.7 - CONCLUSIONS .....	30

### **CAPÍTOL 2: LA INFLUÈNCIA DE LES RESPOSTES MAGNETOTEL·LÚRIQUES**

2.1 - INTRODUCCIÓ .....	31
2.2 – EL PES DE LES RESPOSTES .....	32
2.2.1 – RELACIÓ ENTRE ELS ERRORS: RESISTIVITAT APARENT I FASE .....	33
2.2.2 – RELACIÓ ENTRE ELS ERRORS: IMPEDÀNCIA I FUNCIO DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA .....	35
2.3 – TÈCNICA DE VERIFICACIÓ .....	37
2.3.1 - DESCRIPCIÓ DEL MÈTODE .....	38
2.3.1.1 - ASPECTES TÈCNICS .....	39
2.3.2 – APLICACIÓ A LES RESPOSTES SINTÈTIQUES .....	40
2.3.2.1 - CAS 1: RESISTIVITAT APARENT - FASE .....	40
2.3.2.2 - CAS 2: RESISTIVITAT APARENT - PART REAL DE LA FUNCIO DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA .....	42
2.3.2.2.1 - DISCUSSIÓ DELS RESULTATS .....	43
2.3.3 – APLICACIÓ A LES RESPOSTES EXPERIMENTALS .....	45
2.3.3.1 - CAS 1: RESISTIVITAT APARENT - FASE .....	45

2.3.3.2 - CAS 2: RESISTIVITAT APARENT - PART REAL DE LA FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA .....	46
2.3.3.3 - DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.....	48
2.4 – MÈTODE ALTERNATIU PER A DETERMINAR RELACIONS ENTRE RESPOSTES .....	49
2.4.1 – DESCRIPCIÓ DEL MÈTODE.....	50
2.4.2 – SUPERFÍCIE RMS .....	52
2.4.3 – APLICACIÓ DEL MÈTODE .....	54
2.4.4 – RESULTATS .....	55
2.4.4.1 - CAS 1: RESISTIVITAT APARENT - RESISTIVITAT APARENT (MODELS 1A – 1B) .....	56
2.4.4.2 - CAS 2: RESISTIVITAT APARENT - FASE (MODELS 1A - 1B) .....	57
2.4.4.3 - CAS 3: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA (MODELS 1A – 1B) .....	59
2.4.4.4 - CAS 4: RESISTIVITAT APARENT – PART REAL DE LA FUNCIÓ DE TRANSFERÈNCIA GEOMAGNÈTICA (MODELS 2A – 2B) .....	60
2.4.4.5 - DISCUSSIÓ DELS RESULTATS .....	62
2.5 - DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS.....	62

### **CAPÍTOL 3: CORRECCIÓ DE LA DISTORSIÓ GALVÀNICA**

3.1 – INTRODUCCIÓ .....	65
3.2 – FONAMENTS DEL NOU MÈTODE DE CORRECCIÓ .....	66
3.2.1 - HIPÒTESIS.....	67
3.2.2 – EQUACIONS DE MAXWELL .....	67
3.3 – METODOLOGIA .....	69
3.3.1 - POLARITZACIÓ E .....	72
3.3.2 – POLARITZACIÓ H.....	75
3.4 – APLICACIONS .....	77
3.4.1 – DADES SINTÈTIQUES .....	77
3.4.1.1 - POLARITZACIÓ E .....	77
3.4.1.2 - POLARITZACIÓ H.....	82
3.4.2 – DADES EXPERIMENTALS.....	87
3.4.2.1 - POLARITZACIÓ E .....	87
3.4.2.2 - POLARITZACIÓ H.....	91
3.5 – DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS .....	94

### **CAPÍTOL 4 : FONAMENTS DEL MÈTODE ELÈCTRIC DE CORRENT CONTINU**

4.1 – INTRODUCCIÓ .....	99
4.2 - EQUACIONS FONAMENTALS .....	100

4.2.1 - CONDICIONS DE CONTORN.....	101
4.2.2 - DETERMINACIÓ DE LA RESISTIVITAT APARENT.....	102
4.3 – DISPOSITIUS ELECTRÒDICS .....	103
4.3.1 - SONDEIG ELÈCTRIC VERTICAL .....	105
4.3.2 - TOMOGRAFIA ELÈCTRICA .....	108
4.3.2.1 – WENNER-SCHLUMBERGER.....	111
4.3.2.2 – DIPOL-DIPOL .....	112

## **CAPÍTOL 5: MODELITZACIÓ EN LA PROSPECCIÓ ELÈCTRICA**

5.1 - INTRODUCCIÓ .....	113
5.2 – RESOLUCIÓ DE L'EQUACIÓ DIFERENCIAL .....	114
5.2.1 – MÈTODE DELS ELEMENTS FINITS (M.E.F.).....	117
5.2.2 - RESOLUCIÓ EN L'ESPAI TRANSFORMAT .....	118
5.2.2.1 - IMPOSICIÓ DE LES CONDICIONS DE CONTORN.....	121
5.2.3 – MÈTODE PER A DETERMINAR EL POTENCIAL ELÈCTRIC.....	122
5.3 - DESCRIPCIÓ DE L'ALGORISME DE MODELITZACIÓ.....	125
5.3.1 – TRACTAMENT DE LA MALLA.....	129
5.3.1.1 - MALLA DISPOSITIU .....	129
5.3.1.2 - MALLA MODEL .....	131
5.3.1.3 - ESTRATÈGIA AMB LES DUES MALLE.....	132
5.3.2 – CÀLCUL DEL POTENCIAL ELÈCTRIC .....	135
5.3.3 – EFECTES DE LA TOPOGRAFIA .....	141
5.3.3.1 – EXEMPLE 1 (EFECTE DE LA TOPOGRAFIA).....	143
5.3.3.2 – EXEMPLE 2 (DIMENSIÓ DE LA TOPOGRAFIA) .....	146
5.3.3.3 – IMPLEMENTACIÓ DE LA TOPOGRAFIA .....	148
5.4 – EXEMPLES DE MODELITZACIÓ D'ESTRUCTURES.....	148
5.4.1 - PERFILS DE SEV .....	149
5.4.2 – WENNER-SCHLUMBERGER .....	150
5.4.3 – DIPOL-DIPOL.....	152
5.5 - CONCLUSIONS .....	154

## **CAPÍTOL 6: EL PROBLEMA INVERS EN LA PROSPECCIÓ ELÈCTRICA**

6.1 – INTRODUCCIÓ .....	157
6.2 - ANTECEDENTS .....	159
6.2.1 - MÈTODE DE GAUSS-NEWTON.....	162
6.2.2 - MÈTODE DEL GRADIENT .....	163
6.3 - MÈTODE DE MARQUARDT-LEVENBERG O RIDGE REGRESSION .....	163
6.3.1 - FONAMENTS TEÒRICS .....	164
6.4 - MATRIU SENSIBILITAT .....	167

6.4.1 - APROXIMACIÓ QUASI - NEWTON.....	170
6.4.2 - REDUCCIÓ DE LA MATRIU SENSIBILITAT .....	171
6.5 - PARÀMETRE DAMPING FACTOR.....	172
6.5.1 - TRACTAMENT DEL PARÀMETRE .....	174
6.6 – IMPLEMENTACIÓ DEL PROGRAMA D'INVERSIÓ .....	175
6.7 – COMPARACIÓ ENTRE MÈTODES D'INVERSIÓ.....	179
6.8 - EXEMPLES AMB DADES SINTÈTIQUES .....	181
6.8.1 - EXEMPLE D'INVERSIÓ WENNER-SCHLUMBERGER.....	182
6.8.2 - EXEMPLE D'INVERSIÓ DIPOL-DIPOL.....	183
6.9 - CONCLUSIONS .....	186

## **CAPÍTOL 7: APLICACIONS DE LA TOMOGRAFIA ELÈCTRICA**

7.1 – INTRODUCCIÓ.....	187
7.2 – DETECCIÓ D'ESTRUCTURES.....	188
7.2.1 – ESTUDI SOBRE LA DETECCIÓ DE CAVITATS.....	188
7.2.1.1- PERFIL PUERTO MAZATLAN.....	190
7.2.1.2 - PERFIL MADERO.....	192
7.2.2 - ESTUDI D'UNA ZONA ARQUEOLÒGICA .....	194
7.2.2.1 – SIMULACIÓ D'UNA CAVITAT ARQUEOLÒGICA.....	196
7.2.3 – DISCUSSIÓ.....	199
7.3 – CAMPANYA DE TOMOGRAFIA ELÈCTRICA A CASPE .....	199
7.3.1 – MARC GEOLÒGIC .....	199
7.3.2 – SIMULACIÓ.....	200
7.3.2.1 – SIMULACIÓ EN DIPOL-DIPOL.....	201
7.3.2.2 – SIMULACIÓ WENNER-SCHLUMBERGER .....	207
7.3.2.3 – DISCUSSIÓ.....	211
7.3.3 – DISSENY DE LA CAMPANYA .....	212
7.3.4 – TRACTAMENT DE DADES MESURADES, INVERSIÓ I INTERPRETACIÓ.....	216
1ª ZONA: ALCAÑIZ.....	217
2ª ZONA: MOCATERO.....	223
7.3.5 - DISCUSSIÓ .....	226

<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>227</b>
--------------------------	------------

<b>REFERÈNCIES.....</b>	<b>235</b>
-------------------------	------------

<b>ANNEX1 .....</b>	<b>243</b>
---------------------	------------

<b>ANNEX2 .....</b>	<b>251</b>
---------------------	------------

## ***Índex de taules***

Taula 1. Quadre esquemàtic on es representen alguns mètodes geoelectrics. En aquesta taula s'ha utilitzat la notació anglosaxona pels acrònims dels mètodes .....	2
Taula 2.1. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre ells i valor del RMS.....	41
Taula 2.2. Errors utilitzats en ambdues dades, quocient entre ells i valor del RMS. ....	42
Taula 2.3. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre elles i valor del RMS.....	46
Taula 2.4. Errors utilitzats en les dues respostes, quocient entre elles i valor del RMS.....	47
Taula 4.1. Determinació de la profunditat d'investigació, $Z_e$ , en funció de L, a i n, pel dispositiu electròdic Wenner-Schlumberger (Loke, 1999) .....	111
Taula 4.2. Determinació de la profunditat d'investigació, $Z_e$ , en funció de L, a i n, pel dispositiu electròdic Dipol-Dipol (Loke, 1999).....	112
Taula 7.1. Quadre explicatiu dels resultats obtinguts en la modelització dels paleocanals amb la tomografia elèctrica. ....	211



## Índex de figures

Figura 1. Gràfic que mostra els rangs de variació de la resistivitat elèctrica en determinades roques i minerals (Modificat d'Orellana, 1982).....	2
Figura 2. Descripció esquemàtica de l'escala d'investigació de cadascun dels mètodes de prospecció utilitzats: Mètode magnetotel·lúric i Mètode de prospecció elèctrica de corrent continu.....	4
Figura 3. Mostra dels possibles efectes que distorsionen les dades magnetotel·lúriques en funció del període.....	6
Figura 4. Diagrama esquemàtic sobre el concepte de la integració de la informació geològica i les dades procedents de diferents mètodes geofísics (elèctrics i electromagnètics).....	8
Figura 1.1. Dibuix que mostra la interacció del vent solar amb el camp magnètic terrestre ( <a href="http://mahi.ucsd.edu/SEMC/SlideShow">http://mahi.ucsd.edu/SEMC/SlideShow</a> ).....	11
Figura 1.2. Esquema simple sobre el funcionament del mètode d'inducció electromagnètica Hp: Camp primari, Hs: camp secundari.....	11
Figura 1.3. Representació del camp elèctric d'una ona electromagnètica plana quan incideix sobre la superfície terrestre. Una part important de l'energia es reflecteix i la petita part que es transmet s'atenua exponencialment amb la profunditat. <b>S</b> representa el vector de propagació de l'energia en el subsòl, vector Poynting (Vozoff, 1989).....	12
Figura 1.4. Representació esquemàtica d'una estació magnetotel·lúrica. Disposició dels elèctrodes i dels magnetòmetres, segons les direccions de mesura x, y, z.....	13
Figura 1.5. Model d'un medi unidimensional i representació en l'escala logarítmica de les corresponents respostes magnetotel·lúriques, resistivitat aparent i fase, en funció de la freqüència en l'estació 001 del perfil.....	19
Figura 1.6. Representació d'una estructura regional 2-D. Les propietats elèctriques d'aquesta estructura no varien al llarg de l'eix x. Aquesta direcció s'anomena "strike" i el tipus de polarització, TE o TM, bé determinada pel camp, $\vec{E}$ o $\vec{H}$ , que és paral·lel a ella.....	22
Figura 1.7. A) Camp elèctric mesurat en el cas que la inhomogeneïtat sigui més conductora que el medi. B) Distorsió galvànica provocada. C) Camp elèctric total en el cas que la inhomogeneïtat sigui més resistent que el medi. D) Distorsió galvànica provocada. (Modificat de Jiraceck, 1990).....	26
Figura 1.8. Comportament de les corbes de la resistivitat aparent i de la fase quan apareix el fenomen de <i>Static Shift</i> .....	30
Figura 2.1. Representació gràfica de la impedància. Es mostra la fase, la part real i la part imaginària de la impedància, i els errors corresponents (modificat de Bendat i Piersol, 1966).....	34
Figura 2.2. Model dissenyat per a calcular les respostes magnetotel·lúriques: resistivitat aparent, fase i part real i imaginària de la funció de transferència geomagnètica.....	40

Figura 2.3. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la fase, $\varepsilon(\phi)$ , i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$ , en l'escala logarítmica.....	41
Figura 2.4. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la part real de la funció de transferència geomagnètica, $\varepsilon(T_R)$ , i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$ , en l'escala logarítmica.....	43
Figura 2.5. Models obtinguts després de la inversió del parell format per la resistivitat aparent i la part real de la funció de transferència geomagnètica utilitzant dos valors diferents del quocient entre els errors: Model A: model resultant de la inversió quan la raó val 0.23 i coincideix amb el valor teòric. Model B: model resultant quan la raó val 3.....	44
Figura 2.6. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la fase, $\varepsilon(\phi)$ , i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$ , en l'escala logarítmica.....	46
Figura 2.7. Comportament de la funció RMS respecte del quocient entre els errors de la part real de la funció de transferència geomagnètica, $\varepsilon(T_R)$ , i del logaritme de la resistivitat aparent, $\varepsilon(\ln\rho_a)$ , en l'escala logarítmica.....	47
Figura 2.8. Models obtinguts després de la inversió per a les dades COPROD2 quan la raó utilitzada és la que correspon al mínim valor del RMS. Model A: model que resulta de la inversió de les dades resistivitat aparent i fase, raó = 0.44. Model B: model que resulta de la inversió de les dades resistivitat aparent i part real de la funció de transferència geomagnètica, raó = 0.33.....	49
Figura 2.9. Esquema del procés dissenyat per a realitzar la inversió utilitzant les dades procedents de dos models diferents, on un model és la imatge de l'altre. ....	51
Figura 2.10. Esquema que descriu el comportament de la superfície RMS en funció dels errors assignats a les dades (X, Y) que s'utilitzen en el procés de la inversió, i en vermell i discontinu, representació de la recta definida en (2.15). ....	53
Figura 2.11. Conjunt de models utilitzats per aplicar el mètode de verificació de les relacions entre els errors, el qual precisa de models simètrics entre ells.....	55
Figura 2.12. Segon conjunt de models per a verificació de les relacions entre els errors.....	55
Figura 2.13. Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representa la recta que senyala la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C. ....	56
Figura 2.14. Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representen les rectes que senyalen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.....	58
Figura 2.15. Esquerra: Representació de la superfície RMS. En verd es representen les rectes que senyalen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.....	60
Figura 2.16. Esquerra: Representació de la superfície RMS. Les rectes dibuixades en color verd representen la zona de transició. Dreta: Models que resulten de la inversió en els punts A, B i C.....	61
Figura 3.1. Model 2-D utilitzat per a la generació de les dades sintètiques. El model conté diferents anomalies conductores a diferents escales.....	78



Figura 3.2. Representació dels factors de distorsió galvànica aplicats a cada estació del model en l'escala logarítmica. ....	79
Figura 3.3. Comparació entre les corbes de la resistivitat aparent i de la fase, mesurades i calculades, per a l'estació 10 del perfil del model. Indicació del rang de períodes on no és possible aplicar aquest mètode de correcció. ....	79
Figura 3.4. Comparació entre les corbes de la resistivitat aparent i de la fase, mesurades i calculades, per a l'estació 25 del perfil del model. ....	80
Figura 3.5. Comparació entre els coeficients de distorsió aplicats de manera aleatòria en les dades i els coeficients de distorsió calculats amb la tècnica proposada de l'ajust a una recta. ....	81
Figura 3.6. Model 2-D utilitzat per a la generació de les dades sintètiques en la polarització H. ....	82
Figura 3.7. Representació dels factors de distorsió aplicats a cada estació del model en l'escala logarítmica per a la polarització H. ....	83
Figura 3.8. Rectes de regressió que resulten d'aplicar el mètode proposat a tres parells d'estacions localitzats en punts diferents del perfil. La recta negra discontinua és la recta de referència de pendent 1 i que passa per l'origen de coordenades. ....	84
Figura 3.9. Comparació entre els paràmetres assignats inicialment de forma aleatòria i els paràmetres calculats amb el mètode de l'ajust a una recta. ....	85
Figura 3.10. Models utilitzats per analitzar l'efecte del contacte vertical. ....	86
Figura 3.11. Rectes de regressió calculades amb els models de la figura 3.10. ....	86
Figura 3.12. Comparació entre les corbes mesurades i les corbes calculades de la resistivitat aparent i la fase per a l'estació 005. ....	87
Figura 3.13. Comparació entre les corbes mesurades i les corbes calculades de la resistivitat aparent i la fase per a l'estació 002. ....	88
Figura 3.14. Valors de $\xi(\omega)$ i $\varphi(\omega)$ per a tot el rang de freqüències en l'estació 005 i recta de regressió obtinguda: Pendent, tall amb l'eix d'ordenades i coeficient de correlació. ....	89
Figura 3.15. A) Valors de $\xi(\omega)$ i $\varphi(\omega)$ pel rang de freqüències determinat, 8 s – 30 s en l'estació 002, i els resultats de la recta de regressió. B) Valors de $\xi(\omega)$ i $\varphi(\omega)$ per a tot el rang de freqüències en l'estació 002, i els resultats de la recta de regressió. ....	90
Figura 3.16. Comparació entre els valors de la resistivitat aparent corregida per Jones (1988), i els valors calculats a partir del mètode proposat. ....	90
Figura 3.17. El gràfic A és la imatge de la resistivitat aparent mesurada, COPROD2R. El gràfic B és la imatge de la resistivitat aparent corregida utilitzant el mètode proposat. La darrera imatge, C, representa la resistivitat corregida per Jones (1988). ....	91
Figura 3.18. Valors calculats del pendent utilitzant l'ajust a la recta (punts negres) i línia vermella que assenyalava el pendent de referència, la unitat. ....	92
Figura 3.19. Representació gràfica i resultats de la recta de regressió pels parells d'estacions 013-012 i 009-008 respectivament. ....	93

Figura 3.20. Representació dels resultats obtinguts amb el mètode de correcció de la distorsió a partir de l'ajust a una recta, i comparació amb els resultats obtinguts per Jones (1988), en la polarització H.....	94
Figura 4.1. Representació de les condicions de contorn per a la densitat de corrent, $\vec{J}$ , i pel camp elèctric, $\vec{E}$ , en la interfície entre dos medis de resistivitat diferent.....	102
Figura 4.2. Mostra d'un dispositiu de corrent elèctrica on s'indiquen els elèctrodes de corrent en contacte amb l'amperímetre i els elèctrodes de potencial en contacte amb un voltímetre.....	104
Figura 4.3. Mostra de la disposició dels quatre elèctrodes en un SEV, i la distribució de les línies de corrent pel cas d'un medi estratificat de dues capes.....	105
Figura 4.4. Representació gràfica de la corba obtinguda amb un SEV pel medi estratificat de dues capes de la figura 4.3.....	106
Figura 4.5. Exemple de la distribució de les línies de corrent per a un model estratificat de dues capes on la capa inferior té una resistivitat més gran.....	107
Figura 4.6. Diagrama d'un dispositiu de tomografia elèctrica pel cas de la configuració Dipol-Dipol, i la corresponent distribució de les línies de corrent i de potencial en el subsòl.....	109
Figura 4.7. Mostra de la construcció d'una pseudosecció per a un dispositiu Dipol-Dipol.....	110
Figura 5.1. Representació de les fronteres, $\Gamma_S$ i $\Gamma_\infty$ del domini $\Omega$ , de la direcció normal a la frontera que simula l'infinit, $\vec{n}$ , del vector distància a la font, $\vec{r}_f$ , i de l'angle que formen aquests dos últims vectors, $\theta$ . (Modificada de Queral, 1989).....	115
Figura 5.2. Representació dels elements triangulars que formen la malla als quals s'associen les funcions de forma lineals, $\xi$ .....	117
Figura 5.3. Representació del potencial elèctric transformat en funció de la variable $t=k_y \cdot r$ .....	123
Figura 5.4. Diagrama del procés de modelització on s'inclouen les entrades i sortides de les dades.....	128
Figura 5.5. Part central de la malla dispositiu utilitzada en el mètode dels elements finits, MEF, pel cas de la configuració electròdica Wenner-Schlumberger o Dipol-Dipol.....	130
Figura 5.6. Representació gràfica de la part central de la malla dispositiu utilitzada en un sondeig elèctric vertical.....	131
Figura 5.7. Exemple d'una malla model simulant una estructura geològica amb diferents valors de la resistivitat elèctrica.....	132
Figura 5.8. Representació gràfica de la superposició de les dues malles i mostra del càlcul de la resistivitat elèctrica tenint en compte el pes dels elements. (Malla dispositiu en color vermell i malla model en color negre).....	133
Figura 5.9. Exemple de la superposició de les malles de les figures 5.5 i 5.7. Aquesta malla presenta les dimensions de la malla dispositiu i els valors de la resistivitat aparent ponderats en funció dels valors fixats en la malla model.....	135

Figura 5.10. Representació gràfica del potencial elèctric transformat en funció de la variable ( $k_y \cdot r$ ) en l'escala logarítmica, per a diferents nodes de la malla de la configuració Wenner-Schlumberger.....	136
Figura 5.11. Representació gràfica del potencial elèctric transformat en funció de la variable ( $k_y \cdot r$ ), en l'escala logarítmica, per a diferents nodes de la malla SEV. ....	137
Figura 5.12. Representació del potencial transformat en funció del nombre d'ona en l'escala logarítmica per a diferents nodes de la malla Wenner-Schlumberger.....	138
Figura 5.13. Comportament del potencial elèctric transformat en tots els nusos de la malla per a un valor de $k_y = 10^{-6}$ . ....	138
Figura 5.14. Comportament del potencial elèctric transformat en tots els nusos de la malla per a un valor de $k_y = 2.1544$ . ....	139
Figura 5.15. Part superior: Pseudoseccions obtingudes amb el programa de modelització utilitzant 61 $k_y$ i 3 $k_y$ per a calcular el potencial elèctric antitransformat. Part inferior: diferència relativa entre les dues pseudoseccions en % .....	140
Figura 5.16. Representació gràfica de les resistivitats aparents obtingudes en la modelització d'un sondeig elèctric vertical en un medi homogeni. ....	141
Figura 5.17. Efecte d'una elevació topogràfica sobre les línies de corrent i les superfícies equipotencials (modificat de Fox et al. 1980). ....	143
Figura 5.18. Efecte sobre les línies de corrent i les superfícies equipotencials d'una zona on la topografia disminueix (modificat de Fox et al. 1980). ....	143
Figura 5.19. Descripció de les estructures utilitzades en la modelització per tal d'observar els efectes de la topografia.....	144
Figura 5.20. Mostra dels efectes topogràfics sobre un model homogeni on existeix una elevació topogràfica, una depressió o un desnivell vertical, utilitzant els dispositius A) Dipol-Dipol o B) Wenner-Schlumberger. ....	145
Figura 5.21. Pseudoseccions obtingudes i models que representen una elevació topogràfica amb diferents alçades: A) 0.1 m, B) 0.2 m, C) 0.4 m, D) 1 m i E) 2 m.....	147
Figura 5.22. Model utilitzat per calcular la resposta d'un perfil de vuit sondejos elèctrics verticals (SEV).....	150
Figura 5.23. Resposta obtinguda amb un perfil de vuit SEV al llarg d'una mateixa línia en la superfície del model de la figura 5.22. Els punts negres indiquen la posició de la resposta obtinguda en la modelització. ....	150
Figura 5.24. Representació senzilla d'una falla, de la qual es vol conèixer la resposta elèctrica utilitzant un dispositiu Wenner-Schlumberger.....	151
Figura 5.25. Resposta elèctrica en forma de pseudosecció.....	151
Figura 5.26. Model d'una estructura vertical, intrusió d'un material resistent en un medi més conductor. ....	152
Figura 5.27. Resposta elèctrica en forma de pseudosecció.....	152
Figura 5.28. Model de dos cossos resistents de $1000 \Omega \cdot m$ en un medi conductor de $30 \Omega \cdot m$ . ....	153

Figura 5.29. Pseudosecció obtinguda amb una configuració Wenner-Schlumberger. ....	154
Figura 5.30. Pseudosecció obtinguda amb una configuració Dipol-Dipol. ....	154
Figura 6.1. Relació geomètrica entre les solucions dels mètodes: Gauss-Newton, Gradient i Marquardt-Levenberg per a un model amb dos paràmetres (Lines i Treitel, 1984). ....	161
Figura 6.2. Representació de la matriu Jacobiana on estan marcades en vermell les files on es calcula explícitament el valor. Per a la resta de punts s'aplica la interpolació lineal simple. ....	172
Figura 6.3. Esquema de l'algorisme d'inversió desenvolupat. Es mostren les dades d'entrada (verd), les dades de sortida (blau) i les subrutines dels processos matemàtics. Les lletres de color blau fosc indiquen cadascun dels passos explicats anteriorment. ....	178
Figura 6.4. Model creat per determinar la resposta elèctrica i utilitzar aquestes dades per aplicar la inversió amb els tres mètodes, per la posterior comparació dels resultats. ....	179
Figura 6.5. Evolució del valor dels paràmetres, $p_1$ i $p_2$ , en cada iteració del problema invers i pels tres mètodes descrits. L'evolució del paràmetre més profund, $p_2$ , es descriu a en color blau, i l'evolució del paràmetre superficial, $p_1$ , en color verd. ....	180
Figura 6.6. Mostra de l'evolució del coeficient RMS per a cada iteració i pels tres mètodes descrits. ....	181
Figura 6.7. Model d'un cos resistent en un medi de 100 ohm-m. El cos presenta 10 metres d'amplada, està situat a 1 metre de profunditat i arriba fins a 3 metres. ....	182
Figura 6.8. Mostra de la pseudosecció obtinguda sobre el model de la figura 6.7. ....	182
Figura 6.9. Model obtingut després de la inversió fins a una profunditat de 5 metres. ....	183
Figura 6.10. Mostra de la pseudosecció corresponent al model de la figura 6.9. ....	183
Figura 6.11. Model amb una variació lateral de les capes. La capa més superficial pateix un aprimament degut a la intrusió del material més resistent i més profund. ....	184
Figura 6.12. Mostra de la pseudosecció obtinguda sobre el model de la figura 6.11 amb una configuració Dipol-Dipol. ....	184
Figura 6.13. Model resultat de la inversió amb un ajust excel·lent determinat pel valor del RMS. ....	185
Figura 6.14. Pseudosecció obtinguda del model final de la figura 6.13 i que permet observar el bon ajust amb la imatge de la figura 6.12. ....	185
Figura 7.1. Localització dels perfils Mazatlan i Madero en la Delegación Álvaro Obregon i localització del túnel (Modificat de Tejero et al. 2002). ....	189
Figura 7.2. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger sobre el carrer de Puerto Mazatlan. ....	190
Figura 7.3. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.54 i representació de la pseudosecció calculada. ....	191

Figura 7.4. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger pel perfil realitzat en el carrer Madero.....	192
Figura 7.5. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.45 i representació de la pseudosecció calculada. ....	193
Figura 7.6. Pseudosecció de les dades experimentals amb la configuració Wenner-Schlumberger per a 15 elèctrodes separats 3 metres entre ells i fins a 6 nivells de profunditat.....	195
Figura 7.7. Resultat de la inversió: model obtingut amb un ajust RMS= 0.13 i representació de la pseudosecció calculada. ....	195
Figura 7.8. Model que representa la cavitat buida amb una elevada resistivitat elèctrica (15000 $\Omega\cdot m$ ). ....	197
Figura 7.9. Representació gràfica de la resposta elèctrica del model de la figura 7.8 per a dos perfils diferents: Per a 15 elèctrodes, a=3 m i 6 nivells de profunditat. Per a 20 elèctrodes, a=3 m i 8 nivells de profunditat. ....	197
Figura 7.10. Model recuperat després de la inversió i valors de la pseudosecció calculada, la qual es compara amb la resposta de la modelització per a determinar i observar l'ajust de la inversió.....	198
Figura 7.11. Mapa tectònic del NE de la península Ibèrica on se situen els Pirineus, la Carena Costanera Catalana i la Carena Ibèrica, envoltant la Conca d'avantpaís de l'Ebre. En vermell s'assenyala la zona d'estudi de Caspe. (Vergés, 1993). ....	200
Figura 7.12. Situació deposicional de la Formació Caspe en el Sistema Guadalupe-Matarranya (GM) localitzat al sud dels sistemes Los Monegros (LM) i Montsant (Mo).....	200
Figura 7.13. Model que representa l'estructura d'un paleocanal i la seva corresponent resposta elèctrica en forma de pseudosecció.....	202
Figura 7.14. Representació de dues geometries de l'ala d'un paleocanal i la seva corresponent resposta elèctrica en forma de pseudosecció. ....	203
Figura 7.15. Model on apareixen dos paleocanals de 4000 $\Omega\cdot m$ de resistivitat elèctrica en un medi de 50 $\Omega\cdot m$ , i les respostes elèctriques que s'obtenen en la configuració indicada en cada pseudosecció. ....	204
Figura 7.16. Representació de dos paleocanals i les seves respectives respostes elèctriques en funció de la profunditat a la que es troben. ....	205
Figura 7.17. Representació de dos paleocanals en contacte directe i resposta elèctrica per a un perfil Dipol-Dipol amb 32 elèctrodes. ....	206
Figura 7.18. Representació d'un paleocanal i la seva resposta elèctrica amb el dispositiu Wenner-Schlumberger.....	208
Figura 7.19. Representació de l'ala d'un paleocanal amb diferents geometries i les seves corresponents pseudoseccions. ....	208
Figura 7.20. Representació de dos paleocanals a igual profunditat i a profunditats diferents, i la seva resposta elèctrica (part dreta de la figura). La pseudosecció del primer model està determinada amb un dispositiu electròdic a=5 m, mentre que les altres dos tenen una a=2 m.....	209

Figura 7.21. Representació de dos paleocanals en contacte i mostra de la seva resposta elèctrica per a una configuració Wenner-Schlumberger de 24 elèctrodes, 2 metres de separació entre aquests i 9 nivells de profunditat. ....	210
Figura 7.22. Fotografia de l'equip RESISTAR (RS-100M) utilitzat per a realitzar la tomografia elèctrica en el camp. ....	212
Figura 7.23. Fotografia aèria de la zona d'estudi en el quilòmetre 266 de la carretera d'Alcañiz, i representació de la malla construïda amb els 9 perfils de tomografia elèctrica (fletxes vermelles de la fotografia inferior). ....	215
Figura 7.24. Fotografia aèria de la zona d'estudi en el quilòmetre 39 de la carretera de Mocatero, i localització del perfil elèctric realitzat en aquesta zona (fotografia inferior) en la direcció NW – SE.....	216
Figura 7.25. Fotografia de la zona d'estudi en la carretera d'Alcañiz. El Paleocanal que s'observa a un nivell inferior és que desapareix després de contactar amb el paleocanal superior que s'observa al costat dret de la fotografia en una direcció totalment diferent. ....	217
Figura 7.26. Seqüència de les pseudoseccions mesurades en els perfils paral·lels a la secció del paleocanal, en la direcció SW-NE, perfils transversals.....	218
Figura 7.27. Seqüència de les pseudoseccions mesurades en els perfils perpendiculars a la secció del paleocanal, perfils axials.....	219
Figura 7.28. Models que resulten de la inversió acompanyats del valor del RMS corresponent, (perfils transversals).....	221
Figura 7.29. Models que resulten de la inversió acompanyats del valor del RMS corresponent, que mostra l'ajust d'aquests models amb les dades mesurades (perfils axials).....	222
Figura 7.30. Visió en tres dimensions del paleocanal en una direcció NE-SW. ....	223
Figura 7.31. Fotografia d'un perfil de tomografia elèctrica en la zona de Mocatero, entre els dos paleocanals. ....	224
Figura 7.32. Imatge bidimensional de les tres pseudoseccions mesurades en la zona de Mocatero.....	225
Figura 7.33. Composició dels models obtinguts en la inversió de les dades pels tres perfils Wenner-Schlumberger realitzats en la zona de Mocatero. ....	225
Figura 7.34. Imatge bidimensional de les tres pseudoseccions calculades a partir dels models de la figura 7.36.....	226

## **PRESENTACIÓ**

La prospecció geofísica agrupa el conjunt de tècniques aplicades a l'exploració i a l'estudi del subsòl mitjançant les observacions efectuades en la superfície de la Terra. Aquests mètodes caracteritzen ràpidament el subsòl sense pertorbar l'àrea d'estudi oferint informació detallada sobre les seves condicions i la seva composició. Per a poder aplicar un mètode geofísic és necessari que es presentin dues condicions bàsiques:

- que existeixin contrastos significatius entre algunes propietats físiques, les quals es manifesten com anomalies que es poden detectar i mesurar.
- que els contrastes es puguin correlacionar amb la geologia del subsòl.

L'estudi desenvolupat en aquesta tesi es basa en els mètodes d'exploració geoelèctrics que utilitzen la conductivitat elèctrica,  $\sigma$ , com el paràmetre d'identificació dels diferents cossos o estructures. Aquesta propietat física del terreny descriu la capacitat que tenen els diferents materials del subsòl per a transportar les càrregues elèctriques.

En la memòria es fa referència a aquesta propietat del medi, però en moltes ocasions s'utilitza aquest concepte a través de la seva inversa, la resistivitat elèctrica,  $\rho$ .

Els marges de variabilitat de la resistivitat elèctrica de les roques és força ampli degut a la dependència amb els diferents factors constitutius de les roques, com poden ser la presència d'aigua, la porositat o la mida del gra, figura 1.

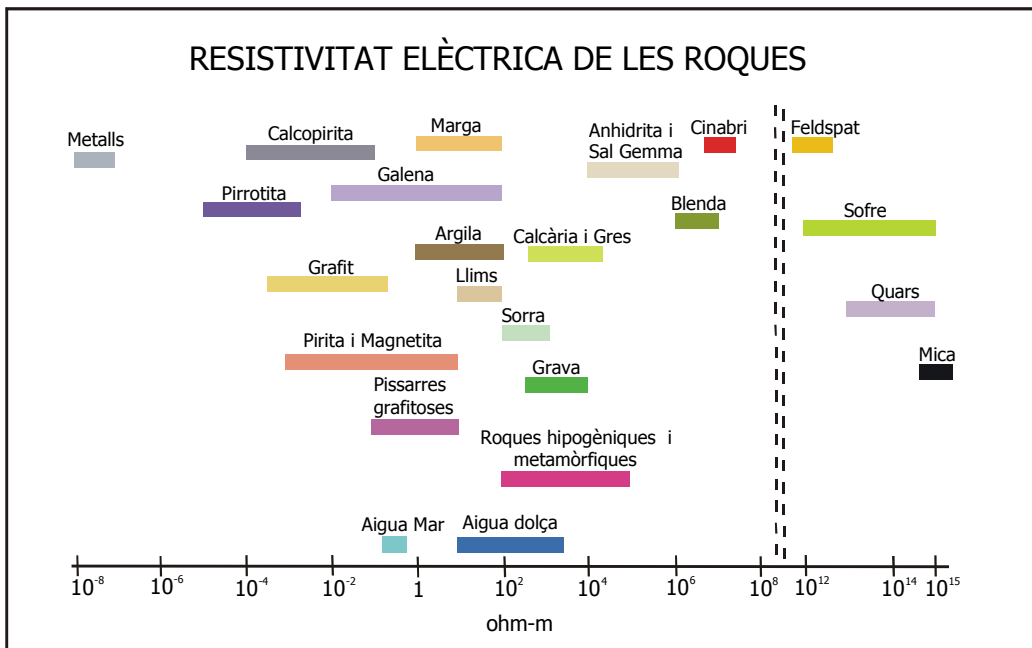


Figura 1. Gràfic que mostra els rangs de variació de la resistivitat elèctrica en determinades roques i minerals (Modificat d'Orellana, 1982).

Malgrat que existeixen moltes maneres de classificar els mètodes geoelectrics, en la taula 1 es presenta un senzill quadre dels mètodes més habituals. Aquest mostra els diferents mètodes en funció de l'origen de la font utilitzada i del tipus de dependència temporal dels camps, és a dir, si són estacionaris o no estacionaris.

	<b>Font Natural</b>	<b>Font artificial</b>
<b>Camps estacionaris</b>	SP (Self Potential)	VES (Verical Electrical Sounding) ERT (Electrical Resistivity Tomography)
<b>Camps no estacionaris</b>	MT (Magnetotelluric) GS (Geomagnetic Sounding)	VLF (Very Low Frequency) CSAMT (Control Source Audio MT) TEM (Time Domain EM) IP (Induced Polarization) GPR (Ground Penetrating Radar)

Taula 1. Quadre esquemàtic on es representen alguns mètodes geoelectrics. En aquesta taula s'ha utilitzat la notació anglosaxona pels acrònims dels mètodes.



En particular, aquesta tesi treballa els mètodes estacionaris de font artificial: 1) VES o SEV (Sondeig Elèctric Vertical) i 2) ERT, que es coneix amb el nom de tomografia elèctrica, i els mètodes no estacionaris de font natural: MT i GS. En la memòria es fa referència als primers com els mètodes elèctrics de corrent continu, i als segons com el mètode magnetotel·lúric.

El mètode magnetotel·lúric és una de les línies principals de recerca del nostre grup de treball amb la realització de nombroses campanyes de prospecció i el desenvolupament de mètodes que milloren el tractament de les dades mesurades.

Anys enrera, però, cap a la dècada dels 90, el mètode de prospecció elèctrica de corrent continu havia estat el mètode d'investigació per excel·lència dins el mateix grup amb la realització d'estudis tals com la implementació d'un algorisme de modelització per a sondejos elèctrics verticals (Queralt *et al.*, 1991).

El desenvolupament i la millora actual dels mètodes elèctrics ha permès que aquests tinguin una important aplicació per a resoldre qüestions mediambientals, degut principalment a la simplicitat de l'instrumentació i al seu baix cost econòmic.

Aquest motiu va empènyer al nostre grup de treball a recuperar els estudis previs que existien sobre aquest mètode d'exploració i a posar-se al dia respecte dels mètodes elèctrics de corrent continu. Així, es va pensar en utilitzar aquestes dues tècniques d'exploració com a mètodes complementaris per extreure informació del subsòl a diferents escales espacials, figura 2.

L'objectiu global d'aquesta tesi és aprofundir en diferents aspectes metodològics de la prospecció magnetotel·lúrica i de la prospecció elèctrica de corrent continu, mitjançant la realització d'estudis que contribueixen a la millora dels models que representen el subsòl real.

L'estudi s'inicia amb el mètode magnetotel·lúric, el qual pot aportar informació del subsòl fins a fondàries de centenars de quilòmetres. A més a més, aquest mètode és particularment útil per a caracteritzar estructures conductores en medis resistius, perquè les capes conductores del subsòl limiten la penetració de les línies de corrent d'una manera més important que en els mètodes elèctrics.

En segon lloc, els mètodes de prospecció elèctrica de corrent continu poden complementar els mètodes electromagnètics proporcionant una informació més detallada dels metres més superficials (desenes de metres).

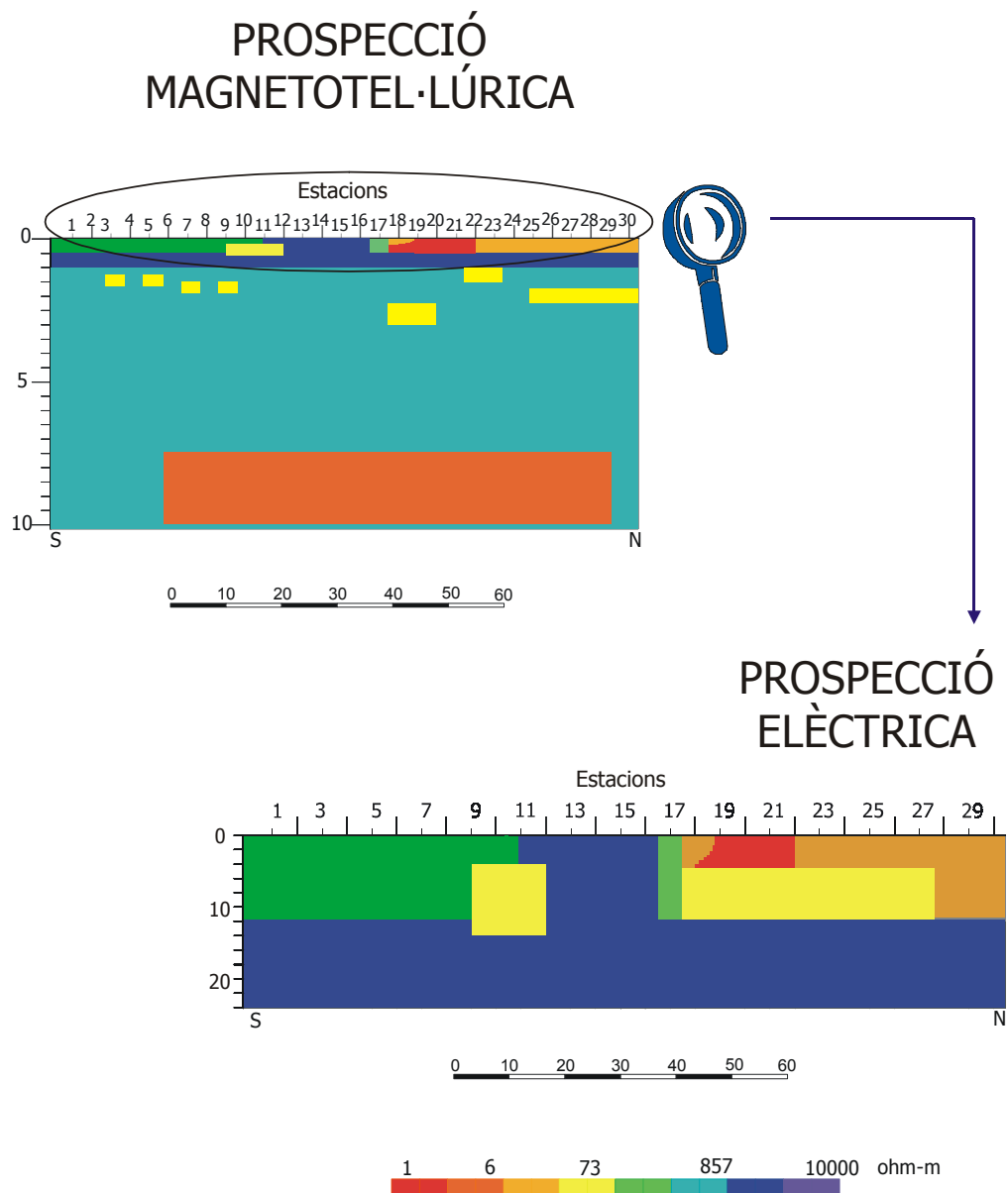


Figura 2. Descripció esquemàtica de l'escala d'investigació de cadascun dels mètodes de prospecció utilitzats: Mètode magnetotel·lúric i Mètode de prospecció elèctrica de corrent continu. Amb unitats arbitràries de longitud.

La memòria presenta dos grans temes, segons els dos mètodes de prospecció geofísica considerats, i s'ha estructurat en una introducció, 7 capítols i les conclusions. Els tres primers capítols tracten el mètode magnetotel·lúric i els quatre següents el mètode de prospecció elèctrica.

Els estudis sobre el mètode magnetotel·lúric se centren en aspectes metodològics específics, i per això, es presenta una introducció detallada del mètode. En canvi, els objectius plantejats sobre el mètode elèctric se centren en l'elaboració de programes que resolen el problema directe i el problema invers. Per això, els capítols que s'ocupen d'aquest mètode descriuen detalladament els algorismes de modelització i d'inversió, i pel contrari, es realitza una introducció menys extensa del mètode d'exploració en qüestió.

L'estructura de la tesi és la següent:

- 1) El capítol 1 realitza una presentació dels fonaments del mètode magnetotel·lúric, com són les equacions, les respostes que s'utilitzen, les limitacions que presenta i la instrumentació necessària. L'objectiu d'aquest primer capítol és fer conèixer al lector els conceptes necessaris per seguir els diferents processos metodològics desenvolupats en els capítols 2 i 3.
- 2) En el segon capítol, es presenta un estudi totalment innovador sobre la importància de les dades magnetotel·lúriques en el procés de la inversió utilitzant les relacions teòriques entre els errors de les respostes. Els resultats obtinguts analíticament són comprovats mitjançant una tècnica numèrica basada en l'error i en l'ajust dels models que resulten de les inversions. Addicionalment, es presenta una manera alternativa d'estimar la raó entre els errors, quan la seva determinació analítica sigui complexa.
- 3) El capítol 3 estudia una de les limitacions més important que presenta el mètode magnetotel·lúric: la distorsió galvànica. Aquest fenomen és conseqüència de l'efecte de les inhomogeneïtats superficials sobre les respostes mesurades, el qual pot conduir a una interpretació errònia de les dades, corbes de la resistivitat aparent i de la fase, (Larsen, 1977; Wannamaker *et al.* 1984;

Jones 1988). La correcció d'aquest fenomen és necessària abans d'extreure un model de conductivitats de la zona d'estudi, i en aquest capítol es presenta un nou mètode per a efectuar aquesta correcció de forma senzilla.

La figura 3 mostra esquemàticament l'abast dels efectes de les distorsions sobre les dades magnetotel·lúriques en funció del període. Un d'aquests efectes és la distorsió galvànica.

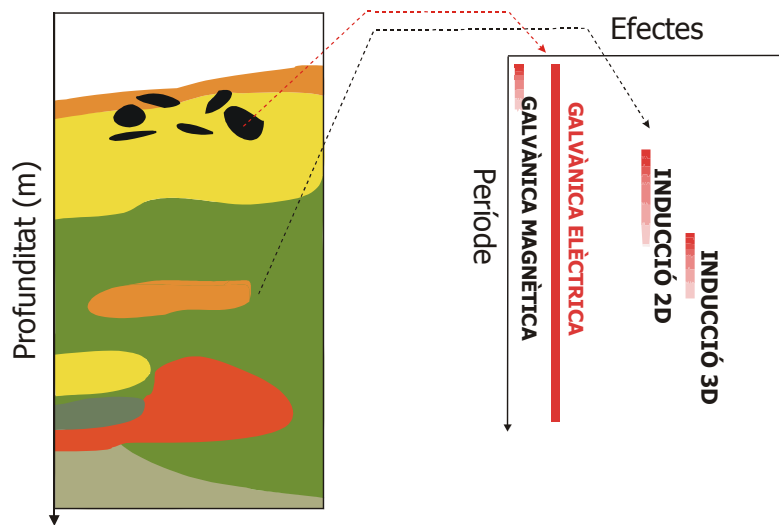


Figura 3. Mostra dels possibles efectes que distorsionen les dades magnetotel·lúriques en funció del període.

- 4) El capítol 4 presenta les característiques generals del mètode elèctric de corrent continu. En ell es descriuen les equacions sobre les quals es fonamenta el mètode i que són necessàries per a resoldre el problema directe i el problema invers, i els dispositius electrònics més usuals: perfils de sondejos elèctrics verticals, i les configuracions Wenner-Schlumberger i Dipol-Dipol de la tomografia elèctrica.
- 5) En el capítol 5 es presenta un estudi exhaustiu del procés de modelització bidimensional de la prospecció elèctrica i s'analitzen els diferents processos numèrics de l'algorisme de modelització implementat. Es presenten nous mètodes i es milloren algunes tècniques de la seva resolució.

- 6) Les dades mesurades només representen una imatge del subsòl. És necessari aplicar l'anomenat problema invers per extreure una informació més detallada de la seva estructura.

El capítol 6 explica aquest procés en detall i presenta la implementació d'un programa amb el qual es controlen els diferents processos numèrics que actuen sobre les dades. El programa s'aplica a dades sintètiques per a verificar la seva bondat.

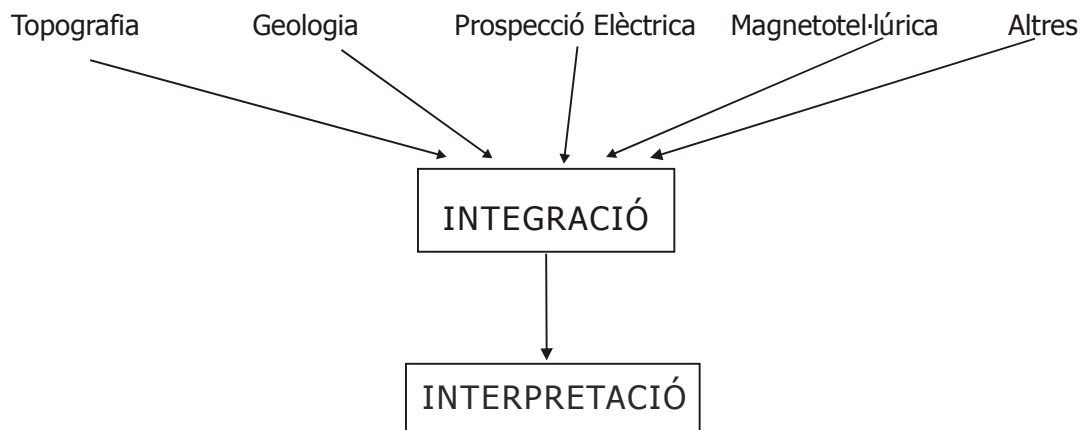
- 7) En el capítol 7 es presenten dues aplicacions dels dos programes desenvolupats, modelització i inversió, a dos casos reals. Per un costat la reinterpretació d'unes dades adquirides en la Ciutat de Mèxic D.F. per a la detecció de cavitats buides, i en segon lloc la caracterització dels paleocanals en la Formació Caspe (Saragossa).

Finalment, es presenta un apartat amb les conclusions d'aquesta tesi destacant les fites aconseguides, les aportacions originals que es fan i les futures línies d'investigació que poden sorgir a partir d'aquest estudi.

En resum, tal com mostra l'estructura de la tesi, l'estudi plantejat millora diferents aspectes del tractament de les dades geofísiques procedents d'aquests dos mètodes. En el mètode magnetotel·lúric s'han treballat metodologies molt concretes, una anàlisi del pes de les dades i una correcció del fenomen de la distorsió galvànica. En canvi, en el mètode de prospecció elèctrica s'ha optat per a fer un estudi de la modelització i de la resolució del problema invers en dues dimensions. L'objectiu d'aquesta part de la tesi és l'obtenció de programes que permeten, per un costat tenir la resposta elèctrica de qualsevol estructura, i per una altra banda, interpretar les dades mesurades amb un control sobre els algorismes que no permeten els programes comercials.

La interpretació de les dades i l'obtenció de models bidimensionals o tridimensionals compatibles amb tot tipus d'informació procedent d'altres estudis geològics i geofísics és, actualment, la línia de treball on s'inverteixen més esforços d'investigació. La importància d'una bona determinació a qualsevol profunditat és un dels principals problemes alhora d'aplicar els mètodes geofísics, perquè molts d'ells estan limitats a una resolució i penetració. Això implica que es tendeix a utilitzar més d'un mètode per

a realitzar l'estudi d'una zona, per posteriorment, integrar totes les dades mesurades i fer una interpretació conjunta del subsòl, figura 4.



*Figura 4. Diagrama esquemàtic sobre el concepte de la integració de la informació geològica i les dades procedents de diferents mètodes geofísics (elèctrics i electromagnètics).*