



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Anàlisi temps-freqüència de l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric

Polarisation analysis of the magnetotelluric signal
in the time-frequency domain

Magdalena Escalas Oliver



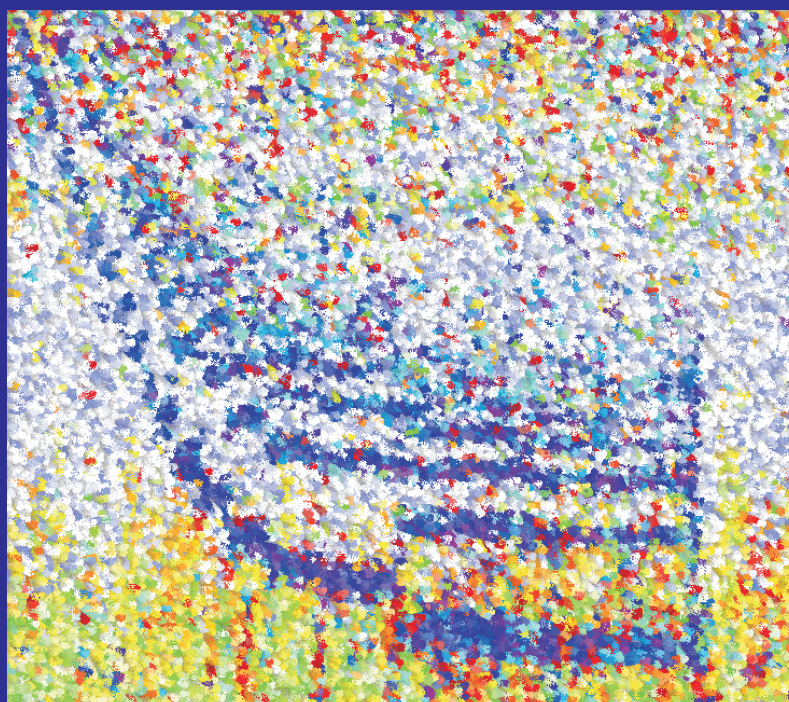
Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**

Anàlisi temps-freqüència de l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric

Magdalena Escalas Oliver
Tesi Doctoral



Directora: Dra. Pilar Queralt

Barcelona, 2015

Grup d'Exploració Electromagnètica i Sísmica
Institut de Recerca Geomodels
Departament de Geodinàmica i Geofísica
Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona

Grup d'Exploració Electromagnètica i Sísmica
Institut de Recerca Geomodels
Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques
Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona

Anàlisi temps-freqüència de l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric

*Polarisation analysis of the magnetotelluric signal
in the time-frequency domain*

Memòria presentada per

Magdalena Escalas Oliver

per optar al títol de Doctora dins el programa de doctorat de Ciències de la Terra
de la Universitat de Barcelona, sota la direcció de la **Dra. Pilar Queralt**.

Magdalena Escalas Oliver
Barcelona, maig de 2015

Dra. Pilar Queralt
Directora i tutora

Aquesta tesi s'ha realitzat gràcies a l'ajut predoctoral FI-DGR 2011 concedit pel Departament d'Innovació, Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya, amb suport del Fons Social Europeu.

Els següents projectes, institucions i grups d'investigació han col·laborat en el finançament d'aquesta tesi:

- PIER-CO2: Progress In Electromagnetic Research for CO₂ geological reservoirs, (CGL2009-07604).
- Desarrollo y adaptación de técnicas electromagnéticas: caracterización de almacenes geológicos (FBG 305656 – FBG306224).
- Desarrollo y adaptación de técnicas electromagnéticas: control y seguimiento de almacenes geológicos (FBG 305658)
- Beca de la Generalitat de Catalunya per l'estada de recerca a la School of Geosciences de la Universitat d'Edimburg (BE-DGR 2011)
- Ajut de mobilitat del Consiglio Nazionale delle Ricerche (STM 2014)
- Institut de Recerca Geomodels
- Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (2009SGR1198)
- Departament de Geodinàmica i Geofísica (Universitat de Barcelona)

“...que tot està per fer, i tot és possible...”

Miquel Martí i Pol

Agraïments

En primer lloc vull donar les gràcies a la Pilar, directora de la tesi. A les teves classes em vaig interessar per la Geofísica, i el que després va començar com una petita col·laboració estiuenca s'ha acabat convertint en un doctorat...qui m'ho hagués dit! Moltes gràcies pel teu suport constant en tots els aspectes, pel que m'has ensenyat i els consells que m'has donat durant aquests anys. Gràcies per tenir sempre una estona per escoltar-me.

Gràcies Àlex per resoldre'm qualsevol dubte i per tot el temps que m'has dedicat, y gracias Juanjo por enseñarme a ver siempre el lado más práctico, dándole sentido a lo que estaba haciendo. Tots tres, des del primer dia va fer que em sentís còmoda treballant amb vosaltres i sempre m'heu ajudat en tot el que he necessitat. Gràcies per donar-me l'oportunitat de formar part d'aquest grup i d'aprendre moltíssimes coses.

A la resta de membres de l'EXES, Anna, Oriol, Joan, Perla, Xènia, Fabià, Eloi i David, per totes les aventures i bons moments que hem viscut junts, ja sigui al camp, al despatx, a Barcelona o arreu del món. Gràcies també a tots els que va venir al camp, Yonas, Mikel, Marc i Àlex, y a Perla en especial por tu ayuda con la fuente y los minivoltios. A la gent de l'Hostal Sotopalacios per donar-nos tot el que vam demanar, i més. Recordar totes les campanyes de camp amb un gran somriure, encara que fossin de tres setmanes seguides, és un gran privilegi! “Siempre nos quedará Hontomín...”

Eloi, gràcies per escoltar atentament els meus dubtes existencials i tenir sempre una resposta tranquilitzant. Anna Quintà i Eloi Carola, gràcies per posar el toc geològic al despatx i respondre'm els dubtes de geologia. Anna Martí i Grant, moltes gràcies per les correccions de l'anglès. Anna Carmona, gràcies per ensenyar-me un trocet d'Escòcia i acollir-me a casa vostra, i per la teva ajuda amb la workstation.

Al grup “Qué bien nos lo pasamos”, Marta Ferrater, Mar, Cris, Marta Guinau, Anna E., Eva, Lena D., Sara, Rosario i Ane, gràcies precisament per això, perquè amb vosaltres la vida es un carnaval! I a la resta de becaris, professors i personal d’administració del departament, gràcies per fer del meu lloc de treball un lloc tan agradable.

Aquesta tesi també ha estat possible gràcies a l’IGME per cedir-nos la font de corrent, i a l’ajuda de Pedro Ibarra en el camp. Gracias Claudia Arango por cederme tu código de procesado y por tu tesis, han sido mi punto de partida en el mundo de las wavelets. Gràcies als membres de l’Observatori de l’Ebre pels seus consells sobre els senyals geomagnètics.

Thank you Anton Ziolkowski for giving me the opportunity to collaborate with your research group at the School of Geosciences of the University of Edinburgh. Many thanks Dieter Werthmüller for your assistance.

Gerardo, thank you very much for your suggestions, help and continuous support. Grazie mille for the really nice stay in Italy. Thank you Marianna and Agatha for your collaboration and warm welcome. I am sincerely grateful to you and your research groups, at the IMAA and University of Bari, for providing MT data from Lamezia Terme and Tramutola sites for this thesis.

Maria, gracias per ser-hi sempre. Gracias a tu i a en Martí, y gracias Ivana, Marco y Karla por vuestros ánimos y porque los años que pasamos juntos en Barcelona fueron inolvidables. Por los buenos momentos que compartimos siempre, sea donde sea.

Gracias a las sisters Ana i Maria Merino, por su amistad y apoyo en todo momento. Gracias a sus padres por ser siempre tan geniales y acogedores.

Miriam, Anna, Clara, Laura, gràcies pel temps que hem compartit en els viatgets, els concerts, les excursions, els sopars...gràcies per les rialles i les sorpreses, perquè sempre m’heu donat forces per seguir endavant, amb la tesi o el que fos. Gràcies Laura pels teus consells artístics amb la portada!

Elia, Asís, Sergio, Marta, Maria i Albert, gràcies per tots els soparets “Equipiso” i per les nits que vam passar al Quilombo, realment ajudaven a oblidar les penes tesiàtiques! Va ser una gran experiència compartir pis amb vosaltres. Als companys de Física pels vostres ànims. Marina i Cris, gràcies per la vostra amistat i per mostrar-me que existeix un món post-tesi durant els soparets a la plaça Osca. Savitri, gràcies per les passejades i xerrades vora el mar, ja sigui a la Barceloneta o a Austràlia. Marta i Joana, pels vostres ànims durant ses retrobades a s’illa.

Gracias a mi familia del sur, Manolo, Dolores, Rocío y Alberto, porque a pesar de la distancia me ha llegado siempre vuestro apoyo. Gracis a tota sa família mallorquina, que sense saber ben bé què faig, sempre heu estat orgullosos de jo i m'heu animat. Ioia, mil gracis per llegir-te tota sa tesi i corregir es català. Gracis per haver-me ajudat sempre, i en tot, com una segona mare. Padrines, gracis per cuidar-me tant i estar tan contentes de jo, per omplir-me es rebost de cocarrois i torró, i per enviar-me coques de xocolate i havarti (per si un cas a Barcelona no en tenen). Prima, porque prima no hay más que una, gracis pes teus consells i per ser com una germana gran. Alfredo i Lina, gracis per donar-mos una cosineta tan preciosa. Joan i Xavi, gracis per ses vostres gamberrades contínues que sempre mos fan riure. Sebi, gracis pes dinars de pasta deliciosa vora la mar. Joan, tu saps d'antenes i jo de senyals elèctrics... me podries contractar a Radio Borne, no trobes? Marilen, gracis pes teus ànims. Maria, gracis per presumir de germana doctora, jo presumiré de germana metgessa. Rosset i Bruna, heu omplit d'alegria ca nostra. Mon pare i mamita, moltes gracis per s'educació i els ànims que m'heu donat, es vostre suport ha estat fonamental per arribar fins aquí.

Manu, GRACIAS en mayúsculas por ayudarme a relativizar y afrontar cualquier situación por complicada que sea. Gracias por la paz, el optimismo y el cariño que me transmites siempre, y que tanto me han ayudado para terminar esta tesis. Gracis per fer que sa vida sigui més senzilla i emocionant compartint-la amb tu.

I aquí s'acaba una etapa. A partir d'ara, com diu en Llach:

“Que tinguem sort”

Barcelona, maig de 2015.

Índex

Llista de figures	v
Llista de taules	xi
Llista d'acrònims.....	xv
Resum.....	xvii
Summary	xxi
Introducció.....	1

Part I: Introducció al senyal magnetotel·lúric

Capítol 1. El senyal magnetotel·lúric.....	7
1.1. Fonaments del mètode magnetotel·lúric (MT)	8
1.1.1. Introducció al mètode MT.....	8
1.1.2. Fonts del senyal MT.....	9
1.1.2.1. Fonts del senyal MT de freqüències inferiors a 1 Hz: interacció Sol-Terra	9
1.1.2.2. Fonts del senyal MT de freqüències superiors a 1 Hz: tempestes elèctriques.....	12
1.1.3. Equacions fonamentals del mètode MT	14
1.1.4. Respostes magnetotel·lúriques	16
1.1.5. Processat de les dades experimentals i obtenció de models geoelectrics	17
1.2. Dipol elèctric horitzontal com a font controlada de senyal EM.....	19
1.2.1. Consideracions inicials.....	19
1.2.2. Resposta d'un dipol elèctric horitzontal en un medi homogeni	20
1.3. Polarització.....	26
1.3.1. Atributs de polarització d'un senyal monofreqüencial en un instant de temps determinat.....	26
1.3.2. Polarització del senyal MT	30
1.3.3. Polarització del senyal generat amb un dipol elèctric horitzontal.....	32
1.4. Soroll cultural.....	32
1.4.1. Fonts de soroll cultural.....	32
1.4.1.1. Línies elèctriques	33
1.4.1.2. Circulació de trens per vies fèrries electrificades	34
1.4.2. Característiques del soroll cultural	35
1.4.3. Mètodes per a la detecció i eliminació del soroll cultural.....	36

Part II: Mètode per a l'anàlisi del senyal magnetotel·lúric

Capítol 2. Anàlisi de l'energia i l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric mitjançant la transformada wavelet.....	39
2.1. Introducció.....	40
2.2. Transformada wavelet.....	40
2.2.1. Introducció.....	40
2.2.2. Definició matemàtica de la TW.....	41
2.2.3. TW amb la wavelet de Morlet com a wavelet mare.....	45
2.2.4. Càlcul computacional de la TW.....	48
2.2.5. TW inversa.....	48
2.2.5.1. Definició de la TW inversa.....	48
2.2.5.2. Expressió pel càlcul de la TW inversa.....	48
2.2.5.3. Exemple de càlcul de la TW inversa.....	51
2.3. Mètode per calcular els atributs de polarització del senyal MT en el domini (t-f) mitjançant la seva TW.....	52
2.3.1. Expressions dels atributs de polarització d'un senyal en funció de la seva TW.....	52
2.3.2. Regió significativa de l'escalograma.....	53
2.3.2.1. Definició de la regió significativa.....	53
2.3.2.2. Mètode per calcular la regió significativa d'un escalograma.....	55
2.3.2.3. Exemple de càlcul de la regió significativa.....	56
2.3.3. Filtratge d'un senyal segons els seus atributs.....	58
2.4. Codi MTWAVELETS.....	58
2.4.1. Mòdul mtwav_TW.m.....	60
2.4.2. Mòdul mtwav_POL.m.....	60
2.4.3. Mòdul mtwav_DIF_POL.m.....	61
2.4.4. Mòdul mtwav_POL_FILT.m.....	61
2.5. Anàlisi de senyals sintètics.....	61
2.5.1. Senyal A, de freqüència i amplitud variables amb el temps.....	62
2.5.2. Senyal B, d'amplitud i desfasament variables amb el temps.....	66
2.5.3. Senyal C, de desfasament variable amb el temps.....	68
2.5.4. Senyal D, d'amplitud i desfasament variables amb la freqüència.....	70
2.5.5. Senyal E, d'amplitud i desfasament variables amb el temps i la freqüència.....	72
2.5.6. Senyal E, filtrat segons l'el·lipticitat.....	74
2.6. Conclusions.....	76
Capítol 3. Experiment “Hontomín-font”: descripció de l'experiment i anàlisi dels resultats.....	77
3.1. Introducció.....	78
3.2. Descripció de l'experiment.....	78
3.2.1. Geometria de l'experiment i equips utilitzats.....	78
3.2.2. Detalls de la font de soroll controlada.....	79
3.3. Anàlisi de les dades experimentals.....	83
3.3.1. Site D24.....	84

3.3.1.1. Anàlisi preliminar de les sèries temporals	84
3.3.1.2. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització dels camps	86
3.3.1.3. Respostes magnetotellúriques.....	96
3.4. Conclusions.....	98

Capítol 4. Experiment “Hontomín-font”: modelització de l'experiment i comparació amb els resultats experimentals.....99

4.1. Introducció. Codi DIPOLE1D.	100
4.2. Resultats en els punts de la xarxa regular	102
4.2.1. Amplitud dels camps.....	104
4.2.2. Atributs de polarització dels camps.....	106
4.2.2.1. Angle de polarització.....	106
4.2.2.2. El·lipticitat i desfasament	108
4.2.2.3. Angle entre E i B	110
4.2.2.4. Comparació dels atributs a les regions de camp proper, transició i camp llunyà	112
4.2.3. Conclusions de la modelització en els punts de la xarxa.....	114
4.3. Resultats en els sites del perfil MT. Comparació amb resultats experimentals.....	115
4.3.1. Amplitud dels camps.....	115
4.3.2. Atributs de polarització dels camps.....	117
4.3.2.1. Configuració NS de la font.....	117
4.3.2.2. Configuració EW de la font	122
4.3.3. Conclusions de la comparació de les dades experimentals i modelitzades al llarg del perfil MT.....	126

Part III: Aplicacions

Capítol 5. Detecció i caracterització de soroll cultural.....129

5.1. Lamezia Terme - soroll cultural.....	130
5.1.1. Introducció	130
5.1.2. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització dels camps.....	132
5.1.2.1. Site S4.....	132
5.1.2.2. Site N6	138
5.1.3. Conclusions Lamezia Terme – soroll cultural.....	140
5.2. Hontomín - soroll cultural.....	141
5.2.1. Introducció	141
5.2.2. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització del senyal d'alta freqüència.	143
5.2.3. Anàlisi temps-freqüència de l'energia i els atributs de polarització del senyal de baixa freqüència.	150
5.2.3.1. Site D24.....	150
5.2.3.2. Site B3.....	153
5.2.4. Conclusions Hontomín - soroll cultural	159

Capítol 6. Detecció i caracterització de senyals geomagnètics polaritzats.	161
6.1. Tramutola - pulsacions geomagnètiques Pc3.	162
6.1.1. Introducció	162
6.1.1.1. Monitoratge de les respostes MT	162
6.1.1.2. Oscil·lació quasi-mensual de la resistivitat aparent i la fase en el rang de freqüències [0.004 Hz – 0.0625 Hz].	163
6.1.2. Segment 30/10/2007	165
6.1.2.1. Anàlisi (t-f) de l'energia i els atributs de polarització dels camps	165
6.1.2.2. Comparació dels resultats obtinguts amb el codi MTWAVELETS amb altres estudis sobre les pulsacions Pc3	169
6.1.2.3. Anàlisi de l'activitat geomagnètica.....	170
6.1.2.4. Respostes magnetotel·lúriques.....	171
6.1.3. Setembre - novembre 2007	172
6.1.4. Conclusions Tramutola – pulsacions geomagnètiques Pc3	173
6.2. Huidobro – Ressonàncies Schumann	175
6.2.1. Introducció	175
6.2.2. Anàlisi (t-f) de l'energia dels camps	176
6.2.3. Anàlisi (t-f) dels atributs de polarització dels camps.....	178
6.2.4. Conclusions Huidobro – ressonàncies Schumann.....	184
Conclusions i perspectives de futur	187
Conclusions and future work.....	191
Referències	195
Annex	207
Annex A: Expressió per calcular la TW de manera computacional	207
Annex B: Característiques dels senyals analitzats i paràmetres del codi MTWAVELETS.....	210
Annex C: Publicació.....	215
Annex digital (CD)	
Annex D: Resultats experiment “Hontomín-font”	
Annex E: Mapa geològic Lamezia Terme	

Capítol 1. El senyal magnetotel·lúric

Figura 1.1. Rangs de resistivitat elèctrica dels materials més comuns de la Terra (Modificada de Palacky, 1987).....	9
Figura 1.2. Pulsació geomagnètica Pc3 enregistrada a l'Observatori de l'Aquila; component horitzontal (H) del camp \mathbf{B} (02/05/2011, 08:55 hora local). (Modificada de Villante i Tiberi, 2015).....	12
Figura 1.3. Espectre de Fourier del camp magnètic B-NS enregistrat a Lanka (Índia) en funció de l'hora local. (Modificada de Chand et al., 2009).....	13
Figura 1.4. Dipol de longitud dl orientat en la direcció NS i coordenades (r, α) del punt P on es calcula el camp EM. (NS:nord-sud, EW: est-oest).....	20
Figura 1.5. Dipol elèctric orientat en la direcció NS i situat al punt $(0,0)$ sobre un medi homogeni de $\rho = 100 \Omega \cdot m$. Longitud del dipol: $10 m$, $I = 1000 A$, $f = 4096 Hz$. (a) camp E: amplitud dels components E-NS i E-EW i mòdul i direcció del vector \mathbf{E} , (b) camp B: amplitud dels components B-NS i B-EW i mòdul i direcció del vector \mathbf{B} . L'ombregat indica les zones on l'amplitud dels camps és molt baixa. (Modificada de Zonge i Hughes, 1991).....	23
Figura 1.6. Dipol elèctric oscil·lant orientat en la direcció NS, línies de camp \mathbf{E} pels instants de temps (a) $\omega t = 0$, (b) $\omega t = \pi/2$, (c) $\omega t = \pi$, (d) $\omega t = 3\pi/2$. Les línies de camp \mathbf{B} (no representades) són circumferències perpendiculars al pla de la figura i centrades en l'eix del dipol. (Modificada de Lorrain i Corson, 1986).....	24
Figura 1.7. Dipol elèctric orientat en la direcció NS, situat a la superfície del medi homogeni descrit a la Figura 1.5 ($\rho = 100 \Omega \cdot m$). Imatges superiors: resistivitat aparent obtinguda a partir dels components: (a) E-NS/B-EW, (b) E-EW/B-NS. Imatges inferiors: els lòbuls verds indiquen les zones per a les mesures dels components dels camps \mathbf{E} i \mathbf{B} en condicions de camp llunyà, la resistivitat aparent és al voltant d'un 5% del vertader valor de la resistivitat del medi en aquestes zones, (a) components E-NS i B-EW: a partir de 5δ en la configuració col·lineal, des de 4δ en configuració broadside, (b) components E-EW i B-NS: a partir de 3δ en totes les direccions. A les zones ombrejades en color gris l'amplitud dels camps és nul·la o gairebé nul·la. (Modificada de Zonge i Hughes, 1991).	25
Figura 1.8. (a) El·lipse de polarització del camp \mathbf{E} en el pla horitzontal, s'indiquen els semieixos major (R) i menor (r) i l'angle de polarització (θ), (b) components NS i EW del camp \mathbf{E} i el desfasament ($\Delta\phi$) entre ells. (Modificada d'Escalas et al., 2013).....	27
Figura 1.9. El·lipses de polarització del camp \mathbf{E} segons el valor del desfasament ($\Delta\phi$) entre els components ortogonals del camp (Modificada de Born i Wolf, 1999).	29
Figura 1.10. Esquema del corrent elèctric en una via fèrria electrificada. El corrent elèctric (I) circula des de la subestació fins al vagó del tren. Una part d'aquest corrent (I1) retorna a la subestació a través dels rails, i una altra part (I2) es desvia cap al subsòl.....	34

Capítol 2. Anàlisi de l'energia i l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric mitjançant la transformada wavelet

Figura 2.1. (a) Senyal $S(t)$, d'amplitud constant i freqüència variable amb el temps, i els seus corresponents (b) DPE calculada mitjançant la TF i (c) escalograma (representació de la TW).....	43
Figura 2.2. Senyals d'amplitud diferent i els seus escalogrames corresponents per comprovar els factors de normalització de la TW: (a) senyal a, (b) senyal b, (c), senyal c.....	44

Figura 2.3. (a) Senyal $N(t)$, (b) escalograma calculat amb el factor 2π a la definició de la TW, (c) escalograma calculat sense el factor 2π a la definició de la TW.....	45
Figura 2.4. (Esquerra) Wavelet de Morlet per a diferents valors dels paràmetres β i σ , (Dreta): els espectres de Fourier corresponents (modificada d'Escalas et al. (2013)).....	46
Figura 2.5. (a) Escalogrames del senyal $F(t)$, de 20 Hz, obtinguts utilitzant diferents valors del paràmetre β de la wavelet de Morlet, (b) ídem, pel senyal $f(t)$ de 0.2 Hz.....	47
Figura 2.6. (a) Senyal $d_n(t)$, (b) TW. Superposició del senyal original i el senyal invertit i el quocient entre ambdós en els casos c) TWI amb $K = 3.615$, i d) TWI inversa amb $K = 1$	51
Figura 2.7. (a) Components $S_{NS}(t)$ i $S_{EW}(t)$ del senyal $S_n(t)$, (b) escalograma del senyal complex $S^C(t) = S_{EW}(t) + iS_{NS}(t)$, (c) RS correcta i components del senyal original i invertit, amb el paràmetre llindar $\lambda = 0.06$, (d) RS i components del senyal original i invertit, amb el paràmetre llindar $\lambda = 0.6$, massa petit ja que no permet recuperar l'amplitud dels components originals.....	57
Figura 2.8. Diagrama de flux del codi MTWAVELETS.....	59
Figura 2.9. Senyal A. (a) components S_{NS} i S_{EW} , (b) hodògrafes, (c) escalograma del senyal $S^C(t)$, (d) RS de l'escalograma, (e) atributs de polarització en el domini (t-f), (f) histogrames dels atributs.....	63
Figura 2.10. Senyal A. a) RS i b) atributs de polarització per dos valors del paràmetre llindar. $\lambda = 0.2$ és el valor que determina la RS correcta, mentre que $\lambda = 1 \cdot 10 - 20$ és massa petit, inclou tot el domini (t-f) dins la RS.....	65
Figura 2.11. Senyal B. (a) components S_{NS} i S_{EW} , (b) hodògrafes, (c) escalograma del senyal $S^C(t)$, (d) RS de l'escalograma, (e) atributs de polarització en el domini (t-f), (f) histogrames dels atributs.....	67
Figura 2.12. Senyal C. (a) components S_{NS} i S_{EW} , (b) hodògrafes, (c) escalograma del senyal $S^C(t)$, (d) RS de l'escalograma, (e) atributs de polarització en el domini (t-f), (f) histogrames dels atributs.....	69
Figura 2.13. Senyal D. (a) components S_{NS} i S_{EW} , (b) hodògrafes, (c) escalograma del senyal $S^C(t)$, (d) RS de l'escalograma, (e) atributs de polarització en el domini t-f, (f) histogrames dels atributs.....	71
Figura 2.14. Senyal E. (a) components S_{NS} i S_{EW} , (b) hodògrafes, (c) escalograma del senyal $S^C(t)$, (d) RS de l'escalograma, (e) atributs de polarització en el domini t-f, (f) histogrames dels atributs.....	73
Figura 2.15. Senyal E. (a) sèries temporals, (b) el·lipticitat, (c) histograma de l'el·lipticitat, (d) el·lipticitat filtrada a l'interval $0.3 < \varepsilon < 0.6$, (e) histograma de l'el·lipticitat filtrada, (f) RF, (g) escalograma del senyal filtrat, (h) sèries temporals del senyal filtrat.....	75

Capítol 3. Experiment “Hontomín-font”: descripció de l'experiment i anàlisi dels resultats.

Figura 3.1. Experiment “Hontomín-font”. Esquema inicial de situació de la font controlada respecte el perfil MT. Els triangles indiquen els sites MT, els rectangles simbolitzen els dipòls de la font.....	79
Figura 3.2. Experiment “Hontomín-font”. Mapa de localització dels sites (triangles vermells) i dels dipòls de la font controlada (rectangles grocs). També s'indica la posició del pou d'exploració H2.....	80
Figura 3.3. Experiment “Hontomín-font”. a) Font de corrent T3 alimentada per un motor, b) detall dels controls manuals de la font de corrent, c) detall d'alguns dels elèctrodes dels dipòls de la font.....	80
Figura 3.4. Hontomín. Site D24. Fragment de 40 s dels registres dels camps E i B en absència de font i durant cada una de les configuracions NS i EW d'aquesta. (a) Sèries temporals dels components NS i EW dels camps i (b) hodògrafes.....	85
Figura 3.5. Hontomín. Site D24. Densitat de potència espectral (TF) dels segments de sèrie temporal analitzats: font inactiva, configuració NS i configuració EW. (a) camp E , (b) camp B	87

Figura 3.6. Hontomín. Site D24. Escalogrames dels segments de sèrie temporal analitzats: font inactiva, configuració NS i configuració EW. (a) camp E , (b) camp B	88
Figura 3.7. Hontomín. Site D24. Atributs del camp E i els seus corresponents histogrames pels segments de sèrie temporal analitzats: font inactiva, configuració NS i configuració EW. (a) El·lipticitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.....	91
Figura 3.8. Hontomín. Site D24. Atributs del camp B i els seus corresponents histogrames pels segments de sèrie temporal analitzats: font inactiva, configuració NS i configuració EW. (a) El·lipticitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.....	93
Figura 3.9. Hontomín. Site D24. Comparació dels atributs dels camps E i B i els seus corresponents histogrames pels segments de sèrie temporal analitzats: font inactiva, configuració NS i configuració EW. (a) diferència d'el·lipticitat, (b) desviació respecte a l'ortogonalitat.....	95
Figura 3.10. Hontomín. Site D24. Respostes MT' (resistivitat aparent, fase i coherències múltiples) calculades amb el software Mapros (Metronix) pels segments de sèrie temporal enregistrats (a) en absència de font, (b) durant la configuració NS de la font, (c) durant la configuració EW.....	97

Capítol 4. Experiment “Hontomín-font”: modelització de l'experiment i comparació amb els resultats experimentals

Figura 4.1. Sondeig de resistivitat al pou H2 d'Hontomín (en color negre), i el model estratificat d'onze capes 1D-Hontomín (en color vermell). (Modificada d'Ogaya et al., 2013).....	101
Figura 4.2. Esquema de la posició del dipol elèctric (rectangle) i dels punts d'una xarxa regular (creus) on s'ha calculat el camp EM amb el codi DIPOLE1D.....	102
Figura 4.3. Dipol elèctric horitzontal actuant com a font, situat en el punt (0,0) i orientat en la direcció NS. Amplitud dels components NS i EW dels camps E i B que crea la font per les freqüències $f=1$ Hz i $f=16$ Hz, i pels diferents tipus de medi. Superposats en color negre, les el·lipses de polarització dels camps i els sites del perfil MT de l'experiment “Hontomín-font” (quadrats negres).....	105
Figura 4.4. Dipol elèctric horitzontal actuant com a font, situat en el punt (0,0) i orientat en la direcció NS. El·lipses de polarització dels camps (a) E i (b) B per tres medis homogenis de resistivitats $\rho = 50 \Omega \cdot m$ (en color verd), $\rho = 100 \Omega \cdot m$ (blau) i $\rho = 500 \Omega \cdot m$ (vermell), a la freqüència $f = 16$ Hz.....	107
Figura 4.5. Dipol elèctric horitzontal actuant com a font, situat en el punt (0,0) i orientat en la direcció NS. El·lipticitat i desfasament dels camps E i B que crea la font a les freqüències $f=1$ Hz i $f=16$ Hz, i en els diferents medis. En color negre, les el·lipses de polarització dels camps i els sites del perfil MT de l'experiment “Hontomín-font”.....	109
Figura 4.6. Dipol elèctric horitzontal actuant com a font, situat en el punt (0,0) i orientat en la direcció NS. Desviació respecte a l'ortogonalitat de l'angle entre els camps E i B que crea la font a les freqüències $f=1$ Hz i $f=16$ Hz, i en els diferents medis. Superposades, hi ha les el·lipses de polarització dels camps E (verd) i B (groc), i els sites del perfil MT de l'experiment “Hontomín-font” (quadrats blancs).....	111
Figura 4.7. Dipol elèctric horitzontal actuant com a font, situat en el punt (0,0) i orientat en la direcció NS. Medi homogeni de $\rho = 100 \Omega \cdot m$, freqüència $f = 16$ Hz. a) Desviació respecte a l'ortogonalitat de l'angle entre els camps E i B creats per la font; superposades hi ha les el·lipses de polarització dels camps E (verd) i B (vermell) i els sites del perfil MT de l'experiment “Hontomín-font” (quadrats negres), b) detall de les el·lipses de polarització dels camps en el primer quadrant de la xarxa.....	111
Figura 4.8. Experiment “Hontomín-font”. Amplitud dels components (a) NS i (b) EW del camp E durant cada configuració de la font per a quatre valors de la freqüència. La línia contínua és l'amplitud modelitzada amb el codi DIPOLE1D en funció de la distància a la font. Els punts indiquen l'amplitud experimental a cada site; les barres d'error venen determinades	

	per la intensitat variable de la font. En alguns sites no hi ha dada experimental perquè l'amplitud del senyal era molt baixa. (Modificada de Vilamajó, 2011).....	116
Figura 4.9.	Experiment “Hontomín-font”, configuració NS. El·lipses de polarització dels camps E (vermell) i B (verd) obtingudes a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) a les freqüències (a) 0.25 Hz, (b) 1Hz, (c) 4Hz, (d) 16 Hz en cada un dels sites del perfil MT.....	119
Figura 4.10.	Experiment “Hontomín-font”, configuració NS. Atributs de polarització dels camps E i B obtinguts a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) en tots els sites del perfil MT a les freqüències 0.25 Hz, 1Hz, 4Hz i 16 Hz. Els sites estan ordenats segons la seva distància a la font. (a) El·lipticitat del camp E , (b) desfasament del camp E , (c) el·lipticitat del camp B , (d) desfasament del camp B , (e) desviació respecte a l'ortogonalitat de l'angle de polarització entre els camps E i B	120
Figura 4.11.	Experiment “Hontomín-font”, configuració EW. El·lipses de polarització dels camps E (vermell) i B (verd) obtingudes a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) a les freqüències (a) 0.25 Hz, (b) 1Hz, (c) 4Hz, (d) 16 Hz en cada un dels sites del perfil MT.....	123
Figura 4.12.	Experiment “Hontomín-font”, configuració EW. Atributs de polarització dels camps E i B obtinguts a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) en tots els sites del perfil MT a les freqüències 0.25 Hz, 1Hz, 4Hz i 16 Hz. Els sites estan ordenats segons la seva distància a la font. (a) El·lipticitat del camp E , (b) desfasament del camp E , (c) el·lipticitat del camp B , (d) desfasament del camp B , (e) desviació respecte a l'ortogonalitat de l'angle de polarització entre els camps E i B	124
Capítol 5. Detecció i caracterització de soroll cultural.		
Figura 5.1.	Mapa de situació dels sites S4 i N6 a la regió de Calàbria (Itàlia). Les vies fèrries electrificades amb corrent continu (www.rfi.it) estan indicades en color vermell (via principal, de 2 o més vies) i en blau (via secundària, d'una sola via). També s'inclou la posició de les estacions més properes a aquests dos sites, de la ciutat Lamezia Terme i del seu aeroport.....	130
Figura 5.2	Lamezia. Respostes MT en els sites: (a) S4, (b) N6, calculades amb el codi de processat robust desenvolupat per Egbert i Booker (1986). Les coherències són les ordinàries entre els components dels camps mesurats (coherència NS: E_{NS}, B_{EW} , coherència EW: E_{EW}, B_{NS}).....	131
Figura 5.3	Lamezia. Sites S4 i S6. (a) sèries temporals, (b) escalogrames, (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic.....	134
Figura 5.4	Lamezia. Sites S4 i N6. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic. (a) El·lipticitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.....	135
Figura 5.5	Lamezia. Comparació dels atributs de polarització dels camps i els corresponents histogrames en els sites (a) S4 i (b) N6.....	136
Figura 5.6	Lamezia. Escalograma del mòdul dels camps, (a) site S4 -camp E, (b) site N6 - camp E, (c) site S4 – camp B, (d) site N6 – camp B. A sobre dels escalogrames del site S4 s'ha superposat amb línies negres verticals l'horari de pas dels trens de passatgers per l'estació Santa Eufèmia.....	137
Figura 5.7.	(a) Situació d'Hontomín respecte a les ciutats més poblades i les vies fèrries electrificades amb CC. Huidobro és una localitat molt petita on es va instal·lar el site 99; s'analitza a la secció 6.2. (b) Detall de la zona d'Hontomín, amb la posició dels sites D24 i B3 i les possibles fonts de soroll cultural. Les línies elèctriques tenen tensions iguals o inferiors als 100 kV.....	141
Figura 5.8.	Hontomín. Respostes MT en els sites (a) D24, 36 hores de registre, i (b) B3, 24h de registre, calculades amb el codi Mapros (Metronix). Les coherències són les múltiples entre els components dels camps mesurats i els estimats a partir del tensor d'impedències (coherència NS: E_{NS}, B , coherència EW: E_{EW}, B).....	142

Figura 5.9 Hontomín. Sites D24 i B3. (a) Sèries temporals, (b)escalogrames i (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$).	144
Figura 5.10. Hontomín. Sites D24 i B3. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$).....	145
Figura 5.11. Hontomín. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic pel senyal enregistrat a alta freqüència ($f_m = 4096 \text{ Hz}$) en els sites (a) D24 i (b) B3.	146
Figura 5.12 Hontomín. Sites D24 i B3. (a) Sèries temporals, (b) escalogrames i (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a baixa freqüència (site D24 $f_m = 128 \text{ Hz}$, site B3 $f_m = 256 \text{ Hz}$).	156
Figura 5.13 Hontomín. Sites D24 i B3. Histogrames dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del senyal enregistrat a baixa freqüència (site D24 $f_m = 128 \text{ Hz}$, site B3 $f_m = 256 \text{ Hz}$), (a) el·lipticitat, (b) angle de polarització, (c) desfasament.	157
Figura 5.14 Hontomín. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic pel senyal enregistrat a baixa freqüència en els sites (a) D24 ($f_m = 128 \text{ Hz}$), (b)B3($f_m = 256 \text{ Hz}$).	158

Capítol 6. Detecció i caracterització de senyals geomagnètics polaritzats

Figura 6.1. Site TRAM. Mediana de les respostes MT obtingudes en l'interval de monitoratge [juliol de 2007 - novembre de 2011]. Direccions: XY:NS, YX:EW.(Modificada de Romano et al., 2014).....	162
Figura 6.2. Site TRAM. Mediana de les respostes MT (direcció NS) en funció de l'índex d'activitat geomagnètica Ap. S'obtenen resultats anàlegs en la direcció EW. (Modificada de Romano et al., 2014).....	163
Figura 6.3. Site TRAM, (a) sèries temporals, (b) escalogrames, (c) atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic.	166
Figura 6.4. Site TRAM. (a) escalogrames dels camps elèctric i magnètic, el requadre negre indica la regió [5 h – 8 h] – [0.02 Hz – 0.04 Hz], (b) histogrames dels atributs de polarització a la regió indicada en els escalogrames.....	167
Figura 6.5. Site TRAM. (a) Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic, el requadre blanc indica la regió [5 h – 8 h] – [0.02 Hz – 0.04 Hz], (b) histogrames dels atributs a la regió indicada pel requadre.....	168
Figura 6.6. Site TRAM. Sèries temporals dels camps elèctric i magnètic de l'esdeveniment observat (05:00 – 08:00) filtrades en el rang de freqüències [0.02 Hz – 0.04 Hz].....	168
Figura 6.7 (a) Velocitat del vent solar, (b) <i>cone angle</i> , (c) amplitud de l'IMF. En color gris s'indica la franja horària [05:00 – 08:00] del dia 30.....	170
Figura 6.8. Site TRAM. Respostes MT del dia 30/10/2007: resistivitat aparent, fase i coherències ordinàries pels segments A [04:00 – 08:00] i B [16:00 – 20:00]. (Escalas et al., en prep.)	171
Figura 6.9. Site TRAM. Densitat de potència espectral dels escalogrames dels camps E i B en el rang de freqüències [0.02 Hz – 0.04 Hz] comparada amb la DPE de la velocitat del vent solar. S'han calculat mitjançant el mètode dels periodogrames de Lomb a partir de les dades dels mesos setembre, octubre i novembre de 2007. (Escalas et al., en prep.)	173
Figura 6.10. Huidobro, site 99. Respostes MT (resistivitat aparent, fase i coherències múltiples) d'un registre de 48 h.....	175
Figura 6.11. Huidobro. Site 99. (a) Sèries temporals, (b) escalogrames dels camps elèctric i magnètic. En els escalogrames s'indiquen els rangs de freqüències que inclouen les SR, (1r mode, $f \approx 8 \text{ Hz}$, 2n mode $f \approx 14 \text{ Hz}$, 3r mode $f \approx 20 \text{ Hz}$, 4t mode $f \approx 26 \text{ Hz}$).	177
Figura 6.12. Huidobro. Site 99. Atributs de polarització del camp elèctric dels segments (a) DIA i (b) NIT, i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz], en els quals s'indica el valor més freqüent (max).	180

Figura 6.13. Huidobro. Site 99. Atributs de polarització del camp magnètic dels segments (a) DIA i (b) NIT, i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz], en els quals s'indica el valor més freqüent (max).	181
Figura 6.14 Huidobro. Site 99. Comparació dels atributs de polarització dels camps elèctric i magnètic del segments (a) DIA i (b) NIT i els corresponents histogrames en els rangs de freqüències [7 Hz – 9 Hz], [12 Hz – 16 Hz] i [19 Hz – 28 Hz].	182
Figura 6.15 Huidobro, Site 99. Signe de l'el·lipticitat dels camps (a) elèctric i (b) magnètic dels segments DIA i NIT.	183

Llista de taules

Capítol 1. El senyal magnetotel·lúric.

Taula 1.1. Definició de les pulsacions geomagnètiques segons el seu període o freqüència. (Modificada de Jacobs et al., 1964).....	11
---	----

Capítol 2. Anàlisi de l'energia i l'estat de polarització del senyal magnetotel·lúric mitjançant la transformada wavelet.

Taula 2.1. Valors proposats pel paràmetre β de la wavelet de Morlet segons la freqüència del senyal analitzat	48
Taula 2.2. Valor de la constant K utilitzada en el càlcul de la TWI , per als diferents valors de β i segons la base logarítmica B de la discretització de les escales.	50
Taula 2.3. Senyal A. Components ortogonals del senyal a cada interval de temps.	62
Taula 2.4. Senyal A. Atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.....	63
Taula 2.5. Senyal B. Components ortogonals del senyal a cada interval de temps.	66
Taula 2.6. Senyal B. Atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.....	67
Taula 2.7. Senyal C. Components ortogonals del senyal a cada interval, i atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.	68
Taula 2.8. Senyal C. Atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.....	69
Taula 2.9. Senyal D. Components ortogonals del senyal a cada interval, i atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.	70
Taula 2.10. Senyal D. Atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.....	70
Taula 2.11. Senyal E. Components ortogonals del senyal a cada interval, i atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.	72
Taula 2.12. Senyal E. Atributs i estat de polarització obtinguts amb el codi MTWAVELETS.....	72

Capítol 3. Experiment “Hontomín-font”: descripció de l'experiment i anàlisi dels resultats.

Taula 3.1. Experiment “Hontomín-font”. Freqüències consecutives i durada del senyal transmès amb la font controlada.....	82
Taula 3.2. Experiment “Hontomín-font”. Detall dels sites, l'equip de mesura, la freqüència de mostreig i la data del registre.	83
Taula 3.3. Experiment “Hontomín-font”. Segments de sèrie temporal analitzats a partir dels registres MT durant cada configuració de la font. Els superíndexs fan referència a la configuració de la font, els subíndexs indiquen el component del camp mesurat.	83
Taula 3.4. Senyals complexes construïts per calcular els atributs de polarització en absència de font (nf) i durant les configuracions NS i EW d'aquesta.	90
Taula 3.5. Hontomín. Site D24. Atributs de polarització del camp E (el·lipticitat, angle de polarització i desfasament) a les quatre freqüències seleccionades, durant cada una de les configuracions de la font controlada.....	90
Taula 3.6. Hontomín. Site D24. Atributs de polarització del camp B (el·lipticitat, angle de polarització i desfasament) a les quatre freqüències seleccionades, durant cada una de les configuracions de la font controlada.....	92
Taula 3.7. Hontomín. Site D24. Comparació dels atributs de polarització dels camps E i B (diferència d'el·lipticitat i desviació respecte l'ortogonalitat) a les quatre freqüències seleccionades, durant cada una de les configuracions de la font controlada.	94

Taula 3.8. Hontomín. Site D24. Freqüències màxima (f_{max}) i mínima (f_{min}) per estar en condicions de camp proper i camp llunyà, respectivament, en aquest site respecte cada un dels dipòls de la font.....97

Capítol 4. Experiment “Hontomín-font”: modelització de l’experiment i comparació amb els resultats experimentals.

Taula 4.1. Casos modelitzats amb el codi DIPOLE1D que es mostren en aquesta memòria.....101

Taula 4.2. Skin depth (δ), distància màxima que verifica la condició de camp proper (r_{max}^{CP}) i distància mínima per assolir el camp llunyà (r_{min}^{CLL}) segons la resistivitat aparent del medi i la freqüència.....103

Taula 4.3. Expressions analítiques dels components NS i EW dels camps E i B en les direccions totalment *collinear* i *broadside* respecte al dipòl font (orientat en la direcció NS) en les condicions de camp proper i camp llunyà, segons (1.34)-(1.41).....103

Taula 4.4. Atributs de polarització dels camps E i B creats a la superfície d’un medi homogeni o estratificat per un dipòl elèctric horitzontal situat a sobre d’aquest, en funció de la zona i la direcció respecte el dipòl. Tots els atributs presenten simetria respecte l’eix del dipòl i la seva direcció perpendicular.....113

Taula 4.5. Experiment “Hontomín-font”, configuració NS. Atributs de polarització dels camps E i B obtinguts a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) del medi 1D-Hontomín en tots els sites del perfil MT a les freqüències 0.25 Hz, 1Hz, 4Hz i 16 Hz. Els colors indiquen la posició de cada site respecte a la font, considerant un medi homogeni de $\rho = 100 \Omega \cdot m$, vermell: camp proper, groc: zona de transició, verd: camp llunyà.....121

Taula 4.6. Experiment Hontomín-font, configuració EW. Atributs de polarització dels camps E i B obtinguts a partir de les dades experimentals (exp) i de la modelització (mod) del medi 1D-Hontomín en tots els sites del perfil MT a les freqüències 0.25 Hz, 1Hz, 4Hz i 16 Hz. Els colors indiquen la posició de cada site respecte a la font, considerant un medi homogeni de $\rho = 100 \Omega \cdot m$, vermell: camp proper, groc: zona de transició, verd: camp llunyà.....125

Capítol 5. Detecció i caracterització de soroll cultural.

Taula 5.1 Lamezia, site S4. Fonts de soroll i les freqüències màxima i mínima que verifiquen les condicions de camp proper i camp llunyà, respectivament, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$ 138

Taula 5.2 Lamezia, site N6. Fonts de soroll i les freqüències màxima i mínima que verifiquen les condicions de camp proper i camp llunyà, respectivament, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$ 139

Taula 5.3 Hontomín, site D24, freqüències altes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$ 149

Taula 5.4 Hontomín, site B3, freqüències altes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$ 149

Taula 5.5 Hontomín, site D24, freqüències baixes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 40 \Omega \cdot m$ 152

Taula 5.6 Hontomín, site B3, freqüències baixes. Fonts de soroll, distància respecte el site i zona en què es troben (CP: camp proper, ZT: zona de transició, CLL: camp llunyà) segons la freqüència, considerant el medi homogeni de resistivitat $\rho = 100 \Omega \cdot m$ 155

Annex A: Expressió per calcular la TW de manera computacional

Taula A1. Senyals sintètics. Característiques dels senyals i paràmetres del codi MTWAVELETS.....	210
Taula A2. Senyals sintètics. Paràmetres del càlcul de la RS.	210
Taula A3. Experiment Hontomín-font. Característiques dels senyals i paràmetres del codi MTWAVELETS. Les dades dels sites 17 i 13 s'han dividit en 2 segments de 219 punts.	211
Taula A4. Experiment Hontomín-font. Paràmetres del càlcul de la RS. Les dades dels sites 17 i 13 s'han dividit en 2 segments de 219 punts, es mostren per separat els paràmetres de cada segment (seg1, seg2).....	211
Taula A5. Lamezia Terme. Característiques dels senyals i paràmetres del codi MTWAVELETS.	212
Taula A6. Lamezia Terme. Paràmetres del càlcul de la RS.	212
Taula A7. Hontomín – soroll cultural - freqüències altes. Característiques dels senyals i paràmetres del codi MTWAVELETS.	213
Taula A8. Hontomín – soroll cultural - freqüències altes. Paràmetres del càlcul de la RS.....	213
Taula A9. Hontomín – soroll cultural - freqüències baixes. Característiques dels senyals i paràmetres del codi MTWAVELETS.	213
Taula A10. Hontomín – soroll cultural- freqüències baixes. Paràmetres del càlcul de la RS.....	213
Taula A11. Tramutola. Característiques del senyal i paràmetres del codi MTWAVELETS.	214
Taula A12. Tramutola. Paràmetres del càlcul de la RS.	214
Taula A13. Huidobro. Característiques del senyal i paràmetres del codi MTWAVELETS.....	214
Taula A14. Huidobro. Paràmetres del càlcul de la RS.	214

Llista d'acrònims

CAMP	Campotenesa (Site de MT proper a la localitat italiana Campotenesa)
CC	Corrent Continu
CP	Camp Proper
CLL	Camp Llunya
CSAMT	<i>Controlled Source AudioMagnetotellurics</i> (Mètode Audiomagnetotel·lúric amb font controlada)
CSEM	<i>Controlled Source Electromagnetics</i> (Mètode Electromagnètic amb font controlada)
DPE	Densitat de Potència Espectral
EM	Electromagnètic
EW	est-oest
EMD	<i>Empirical Mode Decomposition</i> (Descomposició modal empírica)
IMF	<i>Interplanetary Magnetic Field</i> (Camp magnètic interplanetari)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada ràpida de Fourier)
MT	Mètode Magnetotel·lúric
NS	nord-sud
Pc	Pulsació contínua
Pi	Pulsació irregular
RFILT	Regió Filtrada
RS	Regió Significativa
RT	Radi Terrestre
<i>snm</i>	sobre el nivell del mar
SR	<i>Schumann Resonances</i> (Ressonàncies Schumann)
TF	Transformada de Fourier
TRAM	Tramutola (Site de MT proper a la localitat italiana Tramutola)
TW	Transformada Wavelet
TWI	Transformada Wavelet Inversa
UTC	Temps Universal Coordinat
WFT	<i>Windowed Fourier Transform</i> (Transformada de Fourier segmentada)
WPS	<i>Wavelet Power Spectrum</i> (Espectre de potència wavelet)
ZT	Zona de Transició
(t-f)	temps-freqüència
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

Resum

El mètode magnetotel·lúric (MT) és una tècnica geofísica que proporciona la distribució de la resistivitat elèctrica en el subsòl a partir de les fluctuacions temporals del senyal electromagnètic (EM) natural mesurades a la superfície terrestre. Permet caracteritzar les estructures del subsòl a diferents profunditats, des de desenes de metres fins a centenars de kilòmetres de profunditat, gràcies a l'ampli rang de freqüències del senyal EM natural. Per aquest motiu, actualment és un dels mètodes d'exploració EM que presenta més camps d'aplicació.

El senyal MT mesurat prop de zones industrials, zones urbanes, o zones on es duen a terme activitats agrícoles i ramaderes, sovint esdevé contaminat per soroll EM d'origen antropogènic; és l'anomenat soroll cultural. La seva detecció i eliminació és un dels reptes actuals per millorar la qualitat de les respostes obtingudes amb el mètode MT. L'estudi de les característiques del senyal MT i del soroll cultural és un pas clau per poder diferenciar ambdós senyals i eliminar posteriorment el soroll.

En general el senyal MT no presenta un estat de polarització concret en el domini temps-freqüència (t-f), ara bé, algunes de les seves fonts naturals com les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 o les ressonàncies Schumann es caracteritzen pel seu estat de polarització. En canvi, el soroll cultural que contamina el senyal MT sol estar polaritzat linealment en una direcció determinada a causa de la posició fixa de les seves fonts a l'espai.

Tenint en compte que l'estat de polarització del senyal MT està estretament lligat a les característiques de les seves fonts, en aquesta tesi es proposa la seva anàlisi com a eina per identificar i caracteritzar algunes de les seves fonts naturals i les fonts de soroll cultural que el contaminen. Atès que tant el senyal MT com el soroll cultural que el pot afectar són senyals variables amb el temps i presenten múltiples freqüències, s'ha considerat adient analitzar el seu estat de polarització en funció no tan sols del temps sinó també de la freqüència. Malgrat existeixen estudis previs sobre el soroll cultural que afecta les dades MT, en cap d'ells s'analitza des del punt de vista de l'estat de polarització dels senyals en el domini (t-f).

La principal contribució d'aquesta tesi és el desenvolupament, per primer cop, d'un mètode per analitzar l'estat de polarització del senyal MT en el domini (t-f) a partir de les sèries temporals dels camps elèctric (\mathbf{E}) i magnètic (\mathbf{B}). S'han establert les bases teòriques del mètode i s'ha implementat en un codi en llenguatge Matlab anomenat MTWAVELETS. Aquest s'ha aplicat a l'anàlisi de nombrosos tipus de senyals, posant de manifest la utilitat del mètode desenvolupat.

En concret, el mètode dissenyat permet obtenir els atributs de polarització d'ambdós camps, \mathbf{E} i \mathbf{B} , que són l'el·lipticitat, l'angle de polarització i el desfasament entre els seus components ortogonals, així com comparar l'el·lipticitat dels camps \mathbf{E} i \mathbf{B} i la desviació de l'angle que formen entre ells respecte a l'ortogonalitat. Els atributs es calculen en el domini (t-f) mitjançant la transformada wavelet (TW), utilitzant la wavelet de Morlet com a wavelet mare.

S'ha donat resposta a diverses problemàtiques relacionades amb el càlcul dels atributs. S'han seleccionat els factors de normalització més adients per a la TW, i s'ha fet variable el paràmetre característic de la wavelet de Morlet segons el rang de freqüències a analitzar. També s'ha dissenyat un procediment per obtenir la regió significativa del domini (t-f) on es calculen els atributs de polarització, ja que és aquesta regió la que conté informació sobre el senyal. Així mateix, s'ha proposat una expressió empírica per calcular la TW inversa d'un senyal i s'ha elaborat una estratègia per filtrar-lo segons el valor dels seus atributs.

El correcte funcionament del codi MTWAVELETS en què s'ha implementat el mètode desenvolupat s'ha comprovat mitjançant l'anàlisi de nombrosos senyals sintètics amb característiques de polarització molt diferents en el domini (t-f). D'aquesta manera també s'han posat de manifest els avantatges que presenta la TW respecte a la transformada de Fourier segmentada per analitzar l'energia d'un senyal no-estacionari, i respecte a la representació de les hodògrafes per analitzar el seu estat de polarització.

Per avaluar la capacitat del mètode en l'anàlisi de sèries temporals MT reals s'ha dissenyat un experiment amb una font de soroll controlada, l'experiment "Hontomín-font". S'ha dut a terme a Hontomín (Espanya), utilitzant dos dipòls elèctrics horitzontals alimentats per una font de corrent per contaminar les sèries temporals MT en diferents instants de temps i freqüències, i amb diferents estats de polarització. L'anàlisi dels resultats de l'experiment ha posat de manifest la utilitat del mètode proposat per distingir el senyal MT del soroll. Ha mostrat que l'estat de polarització del senyal MT és gairebé aleatori en el domini (t-f), en canvi el senyal generat amb la font de soroll té uns atributs de polarització determinats que la caracteritzen. A partir de les sèries temporals MT mesurades a diferents sites s'han detectat els intervals de temps i les freqüències del senyal generat amb la font, i s'ha caracteritzat el seu estat de polarització en el domini (t-f). D'aquesta manera s'ha pogut identificar el tipus de font utilitzada i estimar la seva posició relativa respecte els sites on s'han mesurat les sèries temporals MT.

S'ha modelitzat l'experiment Hontomín-font per conèixer la resposta teòrica de l'amplitud i dels atributs de polarització del senyal generat amb la font controlada. En concret, s'ha determinat el seu comportament a les regions de camp proper, zona de transició i camp llunyà respecte a la font, i en els punts corresponents als sites de l'experiment. La comparació

dels resultats de l'experiment obtinguts amb el codi MTWAVELETS amb els resultats de la modelització indica que els models de medi utilitzats (homogeni i estratificat) no són els més adients per descriure el medi geoelectric de l'experiment. Suggereix la presència d'inhomogeneïtats, sobretot en alguns sites. Aquest resultat era l'esperat tenint en compte que ja es coneix un model 3D d'Hontomín. Ara bé, l'objectiu de la modelització era conèixer el comportament del senyal emès amb la font en un medi senzill, el més similar possible al medi real, i ha estat assolit satisfactòriament.

El mètode desenvolupat s'ha aplicat també a l'anàlisi de nombroses sèries temporals MT mesurades a diferents localitzacions i que presenten o bé indicis de soroll cultural o bé indicis de la presència de senyals geomagnètics amb un estat de polarització determinat.

Per una banda, a partir de l'anàlisi de sèries temporals MT mesurades a Hontomín i a Lamezia Terme (Itàlia) s'ha detectat el soroll cultural creat per línies elèctriques, la circulació de trens per vies fèrries electrificades amb corrent continu, aerogeneradors i entorns industrials i urbans, i s'ha determinat la posició relativa d'aquestes fonts respecte els punts de mesura. S'ha caracteritzat el comportament que presenten l'amplitud i els atributs de polarització d'aquests senyals sorollosos en el domini (t-f). Un cop coneguts aquests patrons, a partir d'ara pot identificar-se fàcilment la presència d'aquestes fonts contaminants a sèries temporals MT. La determinació concreta de les freqüències i els intervals de temps afectats per soroll és un aspecte molt útil de cara a la posterior selecció de les millors dades per obtenir respostes MT de major qualitat. A diferència de l'anàlisi de les respostes MT de les sèries temporals contaminades per aquestes fonts, l'anàlisi de l'amplitud i els atributs de polarització dels camps **E** i **B** sí ha permès identificar correctament el nivell de soroll que presentaven les dades en cada cas. A més, s'ha posat de manifest la importància de disposar de mesures de sèries temporals MT tant diürnes com nocturnes, ja que algunes de les fonts de soroll cultural estan inactives durant certes hores de la nit.

D'altra banda, l'anàlisi de les sèries temporals MT mesurades a Tramutola (Itàlia) ha suggerit que les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 són una de les causes de l'oscil·lació que presenten les respostes MT en aquest site en el domini (t-f). No s'ha detectat la presència de cap font de soroll cultural. En canvi, s'han detectat nombrosos esdeveniments amb durades, freqüències i atributs de polarització que presenten les característiques pròpies de les pulsacions Pc3. A més, l'anàlisi de l'activitat geomagnètica corresponent als dies analitzats indica que les condicions són favorables per a la creació d'aquests senyals.

Finalment, s'han detectat i analitzat els quatre primers modes de les ressonàncies Schumann a partir de sèries temporals MT mesurades a Huidobro (Espanya). L'anàlisi (t-f) dels seus atributs de polarització ha permès diferenciar aquest senyals geomagnètics de la resta del senyal MT. Amb la comparació de dos segments de sèrie temporal, un diürn i l'altre nocturn, s'han observat variacions en l'amplitud i la freqüència de les ressonàncies Schumann que depenen dels components NS i EW dels camps **E** i **B** així com del mode de la ressonància i de l'hora del dia.

En definitiva, la nova eina desenvolupada en aquesta tesi constitueix una aportació significativa per a l'anàlisi del senyal MT, ja que permet detectar i caracteritzar les seves fonts,

ja siguin naturals o de soroll. Té nombroses aplicacions: en l'àmbit de la millora de les respostes MT per a la identificació del soroll cultural i de senyals geomagnètics que puguin alterar-les, i en l'estudi de la ionosfera i la magnetosfera per a la caracterització de senyals geomagnètics.

Summary

The magnetotelluric method (MT) is a geophysical technique to infer the electrical conductivity distribution of the subsurface using the natural electromagnetic (EM) field time variations at the Earth's surface. It determines the structure of the Earth at many depths, from tens of meters to several hundreds of kilometres, due to the wide frequency spectrum of the natural EM signal. For that reason, nowadays this is one of the EM exploration methods with a broader range of applications.

The MT signal acquired in the vicinity of industrialised, urban or farming areas is usually affected by EM anthropogenic noise, commonly referred to as cultural noise. At present, its detection and removal is one of the challenges to improve the MT responses. The study of the MT signal and cultural noise characteristics is fundamental to distinguish those signals and to subsequently remove the noise.

The MT signal does not generally have a specific polarisation state in the time-frequency (t-f) domain. However, some of its natural sources such as Pc3 geomagnetic pulsations or Schumann resonances have characteristic polarisation properties. On the other hand, cultural noise is usually linearly polarised in a certain direction due to the fixed location of its sources in space.

Thus, the polarisation state of the MT signal is closely related to the features of its sources. Taking advantage of this fact, in this thesis the analysis of the polarisation properties of the MT signal is proposed as a tool to identify and characterise some of its natural sources and those of cultural noise. Since both the MT signal and the cultural noise show time and frequency variations, the polarisation analysis is proposed to be performed in the (t-f) domain. Previous studies have addressed the cultural noise of the MT data, but none of them from the point of view of the polarisation state of signal in the (t-f) domain.

The major contribution of this thesis is the development, for the first time, of a method for polarisation analysis of the MT signal in the (t-f) domain from electric (\mathbf{E}) and magnetic (\mathbf{B}) field time-series. The theoretical basis of the method has been established, and it has been implemented in a Matlab code named MTWAVELETS. This code has been applied to the analysis of many different signals, and has proven the usefulness of this new method.

In particular, the method provides the polarisation attributes of both fields, \mathbf{E} and \mathbf{B} . These are the ellipticity, the polarisation angle, the phase difference between the orthogonal components of each field, the ellipticity difference between both fields and the deviation of the angle between them from the orthogonality. The attributes are computed in the (t-f) domain in terms of the wavelet transform (WT), using the Morlet wavelet as the mother wavelet.

Several difficulties related to the computation of the attributes have been solved. The most suitable normalisation factors for the WT were chosen, and also the characteristic parameter of the Morlet wavelet was changed according to the analysed frequency range. Besides, a method was designed to obtain the significant region of the (t-f) domain where the attributes were computed, since that region contains the information about the signal. Moreover, both an empirical expression to compute the inverse WT of a signal, and a strategy to filter it according to its polarisation attributes was proposed.

To assess the efficiency of the MTWAVELETS code numerous synthetic signals with different polarisation properties in the (t-f) domain have been analysed. In this way, the advantages of the WT with respect to the windowed Fourier transform have been tested in the analysis of the energy of a non-stationary signal, and with respect to the hodograms in the analysis of its polarisation state.

A field test with a controlled noise source, named “Hontomín-font”, has been designed and performed in Hontomín (Spain). It involved contamination of the MT signal at different time intervals and frequencies with the artificial signal transmitted by two grounded horizontal electric dipoles, powered by a current source. Thus, the artificial signal contained different polarisation properties depending on the orientation of the dipole sources.

Analysis of the experimental results proves the ability of the proposed method to differentiate noisy signals from the natural MT signal. It has shown the almost random polarisation state of the MT signal in the (t-f) domain, and the specific polarisation attributes of the artificial signal related to its source. The time intervals, frequencies and polarisation properties of the signal transmitted from the source were successfully recovered. In this way, the source and its relative location with respect to the measured sites were identified.

The field test data were modeled in order to infer the theoretical behaviour of the amplitude and polarisation attributes of the signal transmitted from the controlled source. In particular, its behavior was determined in the near field, transition zone and far field regions with respect to the source, and at the location of the MT sites during the field test. The comparison of the experimental results obtained using the MTWAVELETS code with the modeling results reveals that the Earth models used (homogeneous and stratified) are not the most suitable ones to describe the geoelectrical subsurface during the field test. It suggests

the presence inhomogeneities, mostly at specific sites. This is the expected result since a 3D model of Hontomín is already known. However, the aim of the modeling was to know the response of the transmitted signal from the source for a simple Earth model (the most similar to the real one) and this objective was successfully achieved.

The method developed has also been applied to the analysis of numerous MT time-series acquired at different locations. All these data sets show signs of cultural noise or suggest the presence of geomagnetic signals with a specific polarisation state.

On the one hand, cultural noise created by power lines, electrified DC railways, wind turbines and industrial and urban areas has been detected from the analysis of MT time series acquired at Hontomín and Lamezia Terme (Italy). Furthermore, the location of its sources relative to the MT sites has been determined. The behavior of the amplitude and polarisation attributes of those signals in the (t-f) domain was characterised. In the future, since the patterns of these noise sources are known, they can be detected easily from MT time-series. The identification of the (t-f) region affected by noise is fundamental for the future selection of the most suitable data to obtain the highest quality MT responses. In contrast to the analysis of the MT responses of the time-series contaminated by these noise sources, the analysis of the amplitude and polarisation attributes of the \mathbf{E} and \mathbf{B} fields has successfully shown the noise level in each case. Moreover, it has revealed the usefulness of the acquisition of MT time-series during both daytime and night-time, some cultural noise sources remaining inactive at night.

On the other hand, the analysis of MT time-series acquired at Tramutola (Italy) points to Pc3 pulsations as one of the causes of the oscillation of the MT responses in the (t-f) domain at this site. No cultural noise sources have been observed in these time-series. In contrast, numerous events have been detected with lengths, frequencies and polarisation attributes typical of the Pc3 pulsations. Moreover, analysis of the geomagnetic activity of the corresponding dates shows favorable conditions for the formation of these signals.

Finally, the first four modes of the Schumann resonances were detected and analysed from MT time-series acquired at Huidobro (Spain). The (t-f) analysis of their polarisation attributes allows differentiating these geomagnetic signals from the rest of the MT signal. Amplitude and frequency variations of the Schumann resonances have been detected from the analysis of daytime and night-time segments. These variations depend on the NS and EW components of the \mathbf{E} and \mathbf{B} fields, and also on their mode of resonance and the time of the day.

In brief, the new tool developed in this thesis is a major contribution to the analysis of the MT signal since it allows detecting and characterising its sources, both natural and noisy. It has many applications: in the scope of improving the quality of the MT responses due to the identification of cultural noise and geomagnetic signals capable of altering them, and in the scope of the study of the ionosphere and the magnetosphere due to the characterisation of geomagnetic signals.

Introducció

Motivació

El mètode magnetotel·lúric (MT) permet determinar la distribució de la resistivitat elèctrica en el subsòl a partir de les fluctuacions del camp electromagnètic (EM) mesurades a la superfície terrestre. Es basa en el fenomen de la inducció electromagnètica: quan el camp EM natural interacciona amb la Terra s'indueixen distribucions de càrregues i de corrent en el subsòl, i aquestes alhora generen un altre camp EM. El senyal MT és, per tant, la superposició d'aquests dos camps a la superfície terrestre.

Les variacions del camp EM natural tenen dos orígens diferents. Les de freqüències inferiors a 1 Hz es generen mitjançant la interacció del vent solar i el camp magnètic terrestre, i per la ionització que causa la radiació solar a la part més alta de l'atmosfera. En canvi, les de freqüències superiors a 1 Hz tenen el seu origen a les descàrregues elèctriques que tenen lloc a l'atmosfera durant les tempestes (Chave i Jones, 2012).

Segons les hipòtesis del mètode MT els camps elèctric (\mathbf{E}) i magnètic (\mathbf{B}) del senyal MT oscil·len en un pla paral·lel a la superfície terrestre (Chave i Jones, 2012). A causa de la gran diversitat de fonts i la seva variabilitat, el senyal MT en general presenta un nombre infinit d'estats de polarització (Zonge i Hugues, 1991). És a dir, els camps \mathbf{E} i \mathbf{B} no tenen un estat de polarització concret.

Només en alguns casos particulars, com per exemple quan una de les seves fonts predomina sobre les altres, el senyal MT pot esdevenir polaritzat a certes freqüències. Aquest és el cas de les pulsacions geomagnètiques del tipus Pc3 (Villante et al., 2015) o les ressonàncies Schumann (Nickolaenko i Sentman, 2007). Ambdós són senyals geomagnètics, fonts del senyal MT, que presenten un estat de polarització característic. Habitualment les propietats d'aquests senyals s'analitzen a partir de les sèries temporals de camp \mathbf{B} mesurades en observatoris geomagnètics.

El senyal MT esdevé contaminat pel senyal EM que generen fonts antropogèniques, és el que s'anomena soroll cultural. Les fonts de soroll més habituals són les línies elèctriques i la circulació de trens per vies fèrries electrificades, en ambdós casos es generen corrents paràsits en el subsòl que se superposen al senyal EM natural. El soroll cultural sol estar polaritzat de manera lineal en una direcció determinada (Szarka, 1988; Junge, 1996) a causa de la posició i orientació fixa de les seves fonts a l'espai. La detecció i l'eliminació del soroll cultural que contamina el senyal MT és un pas clau per obtenir resultats satisfactoris amb aquest mètode. No es tracta d'un procés senzill, i actualment és un dels aspectes en el que cal avançar en l'aplicació del mètode MT.

En els casos en què el soroll és fàcilment identificable per la seva amplitud o freqüència es filtra manualment en el domini temporal o freqüencial (Szarka, 1988). Tanmateix, aquest procediment requereix molt de temps i no és totalment objectiu. Pel que fa als mètodes de processat del senyal MT, inclús els més robusts no permeten eliminar l'efecte del soroll cultural, que sol ser coherent, sobre les respostes MT (Chave i Jones, 2012).

Tenint en compte el diferent estat de polarització que presenten el senyal MT en general i el soroll cultural, Santarato i Spagnolini (1995) van proposar un mètode per eliminar el soroll cultural de caràcter impulsiu i polaritzat, basat en propietats estadístiques i de la direcció de polarització. Weckmann et al. (2005), en canvi, proposaren la detecció de soroll segons la direcció de polarització del camp **B** del senyal MT en el domini freqüencial.

L'estat de polarització del senyal MT, per tant, està estretament lligat a les característiques de les seves fonts, ja siguin naturals o fonts de soroll cultural. Per aquest motiu, en aquesta tesi es proposa l'anàlisi de l'estat de polarització del senyal MT com a eina per detectar i caracteritzar algunes de les seves fonts naturals i les fonts de soroll cultural que el contaminen. Tenint en compte que tant el senyal MT com el soroll cultural són senyals no estacionaris, és a dir, són variables amb el temps i presenten característiques diferents segons la freqüència, s'ha considerat adient analitzar l'estat de polarització del senyal MT en funció del temps i la freqüència al mateix temps.

Objectius

L'**objectiu general** d'aquesta tesi és l'anàlisi de l'estat de polarització del senyal MT en funció del temps i la freqüència. Els **objectius concrets** són els següents:

1. Desenvolupar una eina que permeti caracteritzar l'estat de polarització del senyal MT en el domini temps-freqüència (t-f).
 - a. Dissenyar un mètode de càlcul de l'estat de polarització (t-f) del senyal MT.
 - b. Implementar el mètode en un codi per dur a terme els càlculs de manera computacional.
2. Detectar i caracteritzar:
 - a. fonts de soroll cultural
 - b. senyals geomagnètics polaritzats

L'objectiu 1 és metodològic mentre que l'objectiu 2 és d'aplicació. Per assolir-los s'han analitzat un gran nombre de senyals, tant sintètics com mesurats experimentalment.

Organització de la memòria

El treball realitzat i els resultats obtinguts s'exposen en aquesta memòria que consta de sis capítols i s'estructura en tres parts:

- Part I: Introducció al senyal MT.
 - En el capítol 1 es descriuen les fonts del senyal MT i les fonts de soroll cultural que poden contaminar-lo, s'indiquen les seves característiques generals en el domini (t-f) i el seu estat de polarització.
- Part II: Mètode per a l'anàlisi del senyal MT.
 - En el capítol 2 s'explica el mètode dissenyat per analitzar l'energia i l'estat de polarització del senyal MT. Es detalla el funcionament del codi MTWAVELETS, en el qual s'ha implementat el nou mètode, i es mostra la seva aplicació a l'anàlisi de diversos senyals sintètics.
 - En el capítol 3 es descriu l'experiment "Hontomín-font" dut a terme amb una font de soroll controlada per avaluar el funcionament del mètode desenvolupat. També es mostren els resultats obtinguts amb el codi MTWAVELETS en l'anàlisi de les dades experimentals.
 - En el capítol 4 s'exposa el resultat de la modelització de l'experiment "Hontomín-font" amb el codi DIPOLE1D (Key, 2009), i es compara amb els resultats experimentals obtinguts amb el codi MTWAVELETS.
- Part III: Aplicacions.
 - En el capítol 5 es mostra l'anàlisi de sèries temporals MT mesurades a Lamezia Terme (Itàlia) i a Hontomín (Espanya), contaminades per diverses fonts de soroll cultural.
 - En el capítol 6 s'analitzen senyals geomagnètics amb un estat de polarització determinat a partir de sèries temporals mesurades a Tramutola (Itàlia) i a Huidobro (Espanya).

Les dades d'Hontomín i Huidobro les hem mesurat els membres del grup EXES de la Universitat de Barcelona. En canvi, les dades de Lamezia Terme i de Tramutola han estat adquirides per personal de l'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA) en col·laboració amb la Universitat de Bari (Itàlia), els quals les han cedit gentilment per a la realització d'aquesta tesi.

Finalment, es presenten les conclusions dels resultats obtinguts i s'enumeren diferents propostes per a treballs futurs. Es llisten les referències i s'adjunten tres annexos:

- Annex A: detalls matemàtics sobre el mètode desenvolupat;
- Annex B: característiques específiques de les dades analitzades i paràmetres utilitzats en el codi MTWAVELETS;
- Annex C: publicació en una revista del SCI que inclou una part dels resultats mostrats en el capítol 3:

Escalas, M.; Queralt, P.; Ledo, J.; Marcuello, A., 2013. Polarisation analysis of magnetotelluric time series using a wavelet-based scheme: A method for detection and characterisation of cultural noise sources. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 218, 31-50, doi: 10.1016/j.pepi.2013.02.006

En el CD que acompanya aquesta memòria s'inclouen dos annexos en format digital:

- Annex D: tots els resultats de l'anàlisi de l'experiment "Hontomín-font";
- Annex E: mapa geològic de l'entorn de Lamezia-Terme.