

UNIVERSITAT DE BARCELONA
DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA

ANÀLISI OBSERVACIONAL I MODELITZACIÓ NUMÈRICA
DE LES CONDICIONS DE PROPAGACIÓ ATMOSFÈRICA
DELS ECOS DE RADAR METEOROLÒGIC

Memòria presentada per

Joan Bech i Rustullet

Per a optar al grau de

Doctor en Física

Barcelona, setembre de 2003

PROGRAMA DE DOCTORAT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA

BIENNI 1994-1996

Memòria presentada per Joan Bech i Rustullet per optar al grau de

Doctor en Física

DIRECTORS DE LA TESI

Dr. Jerónimo Lorente Castelló

Dr. Bernat Codina Sánchez

Agraïments

Vull expressar el meu agraïment a totes aquelles persones que d'una forma o una altra han contribuït a la realització d'aquesta memòria. En moltes ocasions m'he sentit afortunat pel suport trobat en professors i companys que m'ha permès avançar. Els resultats obtinguts són, en bona part, fruit de la interacció constructiva amb d'altres persones; d'altra banda, els possibles errors o omissions d'aquesta memòria són completament responsabilitat meua.

En Jeroni Lorente i en Bernat Codina han dirigit aquesta tesi i sempre m'han brindat el seu recolzament científic i personal de forma incondicional. La seva experiència i paciència han estat claus per donar forma i contingut a aquesta memòria i dur-la a bon terme.

També he de donar gràcies a altres professors del Departament d'Astronomia i Meteorologia (DAM): A. Redaño pel seu suport entusiasta tant a la Universitat com durant la seva etapa al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC); M. C. Llasat i M. R. Soler pels comentaris sobre el control de qualitat de radiosondatges i del tractament de la capa fronterera, respectivament. Igualment van resultar fructífers els cursos de doctorat de J. M. Baldasano i L. Cremades on també participaven en J. Calbó i C. Soriano; anys després m'han facilitat articles i documentació útil per fer aquesta memòria.

Vull agrair als companys del DAM que vaig tenir durant el període 1994-1997: C. Cerro i F. Pastor, amb qui vam treballar en disdrometria i pluviometria –posteriorment he apreciat molt aquesta experiència–, així com A. Sairouni, T. Aniento, J. Vidal i J. Aymamí. A ells i tots els que van participar en el llançament dels globus de radiosondatges de la Facultat de Física cal agrair la seva tasca anònima.

L'estiu de 1996 vaig realitzar una estada amb l'equip de R+D de meteorologia radar del UK Met. Office a Bracknell, finançada pel Comissionat per Universitats de Recerca de la Generalitat de Catalunya, que va resultar extremadament profitosa. Gràcies a l'experiència i amabilitat de P. Hardaker, E. Archibald i C. Pierce vaig començar a treballar amb dades radar reals i iniciar-me a la plèthora de problemes que porten associats. La tardor d'aquell mateix any es posava en marxa el radar meteorològic de Vallirana i va resultar molt útil l'estada a Bracknell.

També aquella tardor començava el projecte europeu DARTH on es va plantejar el treball d'aquesta tesi doctoral. He d'agrair especialment l'A. Holt i D. Bebbington (Universitat de Essex), C. G. Collier (Universitat de Salford), M. Chandra (DLR i posteriorment Universitat de Chemnitz), P. P. Alberoni i S. Nanni (SMR d'Emilia-Romagna), M. Monai (ARPAV Veneto) i T. Andersson i D. Michelson (Swedish Meteorological and Hydrological Service). Tots ells van oferir el seu ajut i experiència, aportant documentació, exemples de propagació anòmala o idees que em van resultar de gran utilitat. La continuïtat del projecte DARTH en el CARPE DIEM, finançats per la Unió Europea, també ha estat crucial per poder realitzar aquesta tesi.

A finals de 1997 vaig incorporar-me al SMC. Professionalment va ser un canvi important; si bé continuava treballant en l'operació del radar meteorològic ara l'objectiu no era acadèmic sinó d'explotació operativa. A partir de llavors, disposava de més mitjans però també de major exigència i responsabilitat. Agraieixo aquells que van donar-me la seva confiança, O. Puig, E. Vilaclara i S. Paricio. Els seus comentaris van ajudar-me a replantejar alguns aspectes de la tesi, buscant un enfoc més pragmàtic i dirigit a resultats pràctics que penso han estat beneficiosos. També he d'agrair altres companys del SMC, majoritàriament procedents del DAM, amb qui hem comentat parts diverses d'aquesta memòria com en J. Moré, J. Toda, J. R. Miró, N. Pineda, R. Veciana, M. Aran i T. Rigo.

Treballant al SMC vaig tenir ocasió de fer el seguiment d'alguns projectes –i en alguns casos col·laborar-hi directament– relacionats amb el tema d'aquesta tesi i que finalment han reverterit positivament sobre ella. Així he d'agrair la documentació i comentaris d'A. Broquetes i X. Fàbregas (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC) en relació al càlcul de cobertures radar; E. Vilar i C. Catalán (Universitat de Portsmouth, Institut d'Estudis Espacials de Catalunya) sobre la implementació de models avançats de propagació i D. Sempere i R. Sánchez-Diezma (Grup de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia, UPC) en la l'estimació quantitativa de precipitació amb el radar. Igualment he d'agrair l'A. Rius i L. Cucurull (Institut d'Estudis Espacials de Catalunya i posteriorment a NCAR) pels comentaris sobre meteorologia GPS i propagació atmosfèrica.

Des del punt de vista instrumental del radar he d'agrair les lliçons pràctiques apreses al costat de J. López (MCV, S.A) –amb qui hem compartit i patit moltes hores pels radars del SMC– i l'equip de Sigmat Inc., fabricant de diversos components dels radars (R. Passarelli, E. Saltikova i, especialment, F. O'Hara), en concret per les discussions durant el curs de formació realitzat a Boston (EUA) el juny de 2002. Igualment vull recordar la bona acollida dispensada per A. Bellon i I. Zawadki en una breu però intensa visita al Marshall Radar Observatory a Montreal (Canadà).

Menció especial mereix l'impuls que m'ha suposat la participació a l'acció europea COST 717 sobre la utilització d'observacions radar en models de predicció numèrica i models hidrològics. He d'agrair profundament les facilitats i tracte cordial ofert pel chairman A. Rossa (MeteoSwiss) i també pel coordinador del grup on ha cristal·litzat part de la feina d'aquesta tesi, D. Frühwald (Deutscher Wetterdienst).

Igualment agraieixo la documentació i valuosos comentaris aportats en diverses ocasions per C. Ramis (Universitat Illes Balears) i J. L. Camacho, R. Pascual, J. Cuixart, A. Jansà i J. Arús (Instituto Nacional de Meteorología). Amb aquest darrer, juntament amb l'A. Mestres, he gaudit de la tasca feta a l'Associació Catalana de Meteorologia que ha permès acostar-me a l'extensa obra d'E. Fontserè i l'antic SMC.

Finalment, però no per això menys important, he d'agrair els ànims d'amics i família que m'envolta, en particular als meus pares, i molt, molt especialment als més propers amb qui comparteixo la vida diària: (per ordre invers d'arribada) la Laia, l'Oriol, en Martí i l'Encarnació. A ells dedico aquesta tesi.

A la Laia, l'Oriol, en Martí i l'Encarnació.

ÍNDIX

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

- 1.1. FACTORS QUE AFECTEN LA QUALITAT DE LES OBSERVACIONS RADAR 1-1
- 1.2. OBJECTIUS DE LA TESI 1-5
- 1.3. REFERÈNCIES 1-7

CAPÍTOL 2. PROPAGACIÓ ANÒMALA

- 2.1. MAGNITUDS RELLEVANTS EN LA RADIOPROPAGACIÓ 2-1
- 2.2. MODELS DE RADIOPROPAGACIÓ 2-6
- 2.3. PROPAGACIÓ NORMAL I ANÒMALA (PA) 2-11
- 2.4. TIPUS DE CONDUCTE 2-16
- 2.5. SITUACIONS METEOROLÒGIQUES ASSOCIADES A LA PA 2-20
- 2.6. REFERÈNCIES 2-22

CAPÍTOL 3. ANÀLISI OBSERVACIONAL DE LES CONDICIONS DE PROPAGACIÓ DE RADAR METEOROLÒGIC

- 3.1 DADES DE RADIOSONDATGE 3-1
- 3.2 REFRACTIVITAT SUPERFICIAL 3-7
- 3.3 GRADIENT VERTICAL DE REFRACTIVITAT 3-10
- 3.4 OCURRÈNCIA I DESCRIPCIÓ DE PA 3-27
- 3.5 CONDUCTES 3-37
- 3.6 CONDICIONS DE PROPAGACIÓ A LA MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL 3-40
- 3.7 PROPAGACIÓ ANÒMALA I OBSERVACIONS RADAR A LA ZONA DE BARCELONA 3-50
- 3.8 REFERÈNCIES 3-59

CAPÍTOL 4. PROPAGACIÓ ANÒMALA I BLOQUEIG TOPOGRÀFIC

- 4.1 BLOQUEIG TOPOGRÀFIC 4-1
- 4.2 CONDICIONS DE PROPAGACIÓ 4-4
- 4.3 SIMULACIÓ DE BLOQUEIG DEL RADAR DE VALLIRANA 4-7
- 4.4 RESULTAT I DISCUSSIÓ DE LA SIMULACIÓ 4-10
- 4.5 REFERÈNCIES 4-20

CAPÍTOL 5. PREDICCIÓ DE CONDICIONS DE PROPAGACIÓ DE RADAR METEOROLÒGIC

- 5.1 MODELITZACIÓ DE LA PROPAGACIÓ I PREDICCIÓ NUMÈRICA DEL TEMPS
5-1
- 5.2 PRONÒSTICS DE REFRACTIVITAT I EL SEU GRADIENT 5-5
- 5.3 PRONÒSTICS DE CAPES CONDUCTORES 5-18
- 5.4 REFERÈNCIES 5-31

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS

- 6.1 AVALUACIÓ DELS OBJECTIUS GENÈRICS 6-1
- 6.2 AVALUACIÓ DELS OBJECTIUS CONCRETES 6-2
- 6.3 LÍNIES DE TREBALL FUTUR 6-4

APÈNDIX 1. CONCEPTES BÀSICS DE METEOROLOGIA RADAR

- A1.1 SISTEMES RADAR 1
- A1.2 FONAMENTS DE MESURA I OBSERVABLES 9
- A1.3 REFERÈNCIES 20

APÈNDIX 2. UNA FUNCIÓ D'INTERCEPCIÓ SIMPLIFICADA

APÈNDIX 3. BIBLIOGRAFIA EXTESA

APÈNDIX 4. ACRÒNIMS

APÈNDIX 5. LLISTAT DE CONTRIBUCIONS

APÈNDIX 6. SELECCIÓ DE CONTRIBUCIONS

RESUMEN EXTENDIDO EN ESPAÑOL

EXTENDED ENGLISH SUMMARY