

Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC)  
**Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera"**  
Departament d'Estructura i Dinàmica de la Terra

Programa de doctorat Ciències de la Terra  
Bienni 2006-2007

---

**CARACTERITZACIÓ ESTRUCTURAL I  
SISMOTECTÒNICA DE LA LITOSFERA EN EL  
DOMINI PIRENAICO-CANTÀBRIC A PARTIR DE  
MÈTODES DE SÍSMICA ACTIVA I PASSIVA**

---

**Tesi**

presentada per

Mario Ruiz Fernández

Al Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona

Directors:

Dr. Josep Gallart Muset

Dr. Jordi Díaz Cusí

Tutor: Dr. Francesc Sàbat Montserrat

## 1.-INTRODUCCIÓ

### 1.1.- Presentació, objectius i estructura de la tesis

La recerca que es presenta en aquesta memòria de tesi està estructurada en dos grans blocs: una primera part dedicada a la caracterització sismotectònica del sector occidental dels Pirineus, mitjançant l'anàlisi de noves dades sísmiques, i una segona part dedicada a l'anàlisi i interpretació de les noves dades de perfils de gran angle obtinguts al marge Cantàbric.

Aquesta estructuració es correspon al fet que la recerca s'ha desenvolupat en el marc de dos projectes finançats pel Pla Nacional de Medi Ambient i Recursos Naturals, el projecte GASPI (AMB98-1012-C02-01) i el projecte MARCONI (REN2001-1734-C03-01), la finalitat dels quals era completar diversos aspectes de caracterització sismotectònica i d'estructura cortical i litosfèrica al Nord peninsular.

Pel que fa a la temàtica de sismicitat, el sector occidental dels Pirineus i la serralada Cantàbrica són zones que tradicionalment han estat mal controlades pels serveis sismològics amb instrumentació permanent. La primera xarxa instal·lada al sector occidental dels Pirineus es va desplegar, a la vessant francesa de la serralada a finals dels anys 70 del segle passat, per estudiar la sismicitat de la regió d'Arette. Aquesta xarxa tenia en el seu origen un caràcter temporal però a la llarga es va consolidar integrant-se a la xarxa sísmica permanent francesa. Al sector oriental de la serralada, tant a la vessant francesa com a la catalana, es van desplegar a mitjans dels anys 80, denses xarxes sísmiques permanents que han permès tenir un control acurat de l'activitat sísmica que té lloc en aquest sector dels Pirineus, i efectuar-ne la seva caracterització sismotectònica. En canvi, a la vessant espanyola, a partir del sector central dels Pirineus fins a l'extrem occidental de la península, es pateix d'una baixa densitat d'instruments i d'una distribució poc apropiada per produir-hi catàlegs sísmics de qualitat. El primer desplegament de la xarxa sísmica del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN), efectuat a finals dels anys 80, consistia en una malla a nivell nacional amb els instruments molt espaiats que deixava un gran buit a la zona de la conca Basco-Cantàbrica i la Serralada Cantàbrica. Fins l'any 2001, amb l'inici del desplegament de

la nova xarxa digital de l'IGN, no hi havia cap estació entre les instal·lades a la regió de Galícia i el sector occidental dels Pirineus. Actualment la densitat d'instruments al sector nord peninsular continua essent baixa, fet que provoca que la informació sismotectònica disponible sigui poc detallada.

El projecte GASPI (1998-2001): '*Actividad sismotectónica, estructura litosférica y modelos de deformación Varisca y Alpina en el NO de la Península Ibérica*', es planteja dins d'un context de caracterització de risc sísmic i de zonificació sismotectònica, temàtica poc desenvolupada en aquesta regió. Es tracta d'analitzar l'activitat sísmica en relació amb l'estructura litosfèrica i amb els mecanismes de deformació Varisca i Alpina que van afectar la zona del N-NO de la Península Ibèrica, des de Galícia fins als Pirineus. Amb aquest objectiu es van desplegar tres xarxes sísmiques temporals localitzades a Navarra, Astúries i Galícia, a fi de recollir events sísmics locals, regionals i telesísmics.

En aquest treball s'analitzaran els terratrèmols locals i regionals obtinguts als Pirineus occidentals per la xarxa de Navarra. La sismicitat local i regional obtinguda per les xarxes de Galícia i Astúries ha estat objecte d'un altre treball de doctorat realitzat a la Universitat d'Oviedo (López-Fernández, 2007), mentre que els events telesísmics enregistrats van ser emprats per a estudis d'anisotropia i de funcions receptores (Díaz et al., 2002; Díaz et al., 2003).

Respecte a l'estructura interna, durant les darreres dècades del segle XX, els Pirineus i el marge continental Cantàbric han estat objecte de nombrosos estudis de sísmica de reflexió profunda i de refracció/reflexió de gran angle destinats a obtenir imatges de l'estructura de l'escorça a la zona de contacte entre les plaques Ibèrica i Europea. Els estudis portats a terme als Pirineus en el marc de projecte ECORS van mostrar que les escorces mitja i inferior Ibèrica s'aprofundeixen cap al nord, enfonsant-se sota l'escorça Europea (Choukroune et al., 1990; Muñoz, 1992; Teixell, 1998). A la Serralada Cantàbrica, els perfils realitzats dins del programa ESCIN mostren una geometria similar a la de Pirineus, amb l'escorça mitja i inferior Ibèrica enfonsant-se sota l'escorça Cantàbrica (Pulgar et al., 1996; Gallart et al., 1997; Fernández-Viejo et al., 1998). Aquests estudis van permetre acotar la distribució de velocitats de la zona de transició de la conca del Duero cap a la Serralada Cantàbrica (Fernández-Viejo et al., 2000; Pedreira et al., 2003), però l'obtenció de la distribució de velocitats a la zona de la plataforma continental i a la planura abissal s'ha vist tradicionalment limitada per la manca de sismògrafs de profunditat (*Ocean-Bottom Seismometers* – OBS). L'obtenció de distribucions acurades de velocitats-fondàries és essencial per a caracteritzar de forma fidedigna l'estructura cortical del marge Nord-Ibèric i poder establir els límits entre l'escorça continental i l'escorça oceànica. La posició geogràfica

d'aquest límit estructural té importants implicacions en l'evolució geodinàmica del Golf de Biscaia.

El projecte MARCONI (2002-2005): '*Reconocimiento geológico y geofísico del margen continental Nor-Ibérico: estudio integrado de las cuencas sedimentarias y evolución geodinámica del Golfo de Vizcaya y la cordillera Pirenaico-Cantábrica*', té com a objectiu la caracterització de l'evolució geodinàmica del sector més oriental del marge continental Cantàbric, des de la formació de les conques sedimentaries Mesozoiques fins a l'actualitat. L'eix principal del projecte va consistir en l'adquisició de noves dades geofísiques, que incloïen sísmica de reflexió vertical i de gran angle, gravimetria i magnetisme al llarg del sector central i oriental del marge continental Cantàbric, i sísmica superficial i batimetria d'alta resolució a zones seleccionades. Per primera vegada es va abordar el doble objectiu d'obtenir una imatge detallada de la geometria de les estructures presents a la zona, mitjançant la sísmica vertical, i models de velocitat en fondària, utilitzant alhora OBS i estacions de terra, per a registrar perfils sísmics de gran angle perpendiculars a l'orogen. S'ha mostregat amb continuïtat la transició de la serralada Cantàbrica cap al marge continental Cantàbric precisant l'estructura cortical de la zona de col·lisió. Les noves dades permetran discutir sobre l'existència d'escorça oceànica en el seu sector més nord-occidental de la zona d'estudi. Durant aquest projecte, es van desplegar també xarxes sísmiques temporals a les regions de Galícia, Astúries i Navarra, amb les quals es van recollir noves dades telesísmiques al llarg de diversos perfils N-S i E-O situats a Astúries i Galícia, i es va fer el seguiment de les rèpliques de dos terratrèmols de magnitud superior a 4 ocorreguts durant el 2002 i 2004 a la regió de Navarra.

En aquesta memòria s'analitzaran les dades de gran angle obtingudes a la campanya marina MARCONI i la sismicitat relacionada amb les rèpliques dels terratrèmols de Navarra. L'anàlisi de la sísmica multicanal ha estat objecte de treballs de doctorat i post-doctorat portats a terme a la Universitat de Barcelona i d'Oviedo (Fernández-Viejo et al., 2007). Els telesísmes enregistrats a les xarxes temporals van permetre complementar els estudis d'anisotropia iniciats durant el projecte GASPI (Díaz et al., 2006).

La primera part de la tesi, després dels capítols 1 i 2 d'introducció, metodologia i context geològic i geofísic, està dedicada a la caracterització sismotectònica i localització hipocentral, i s'estructura al voltant de tres articles ja publicats en revistes científiques internacionals que sintetitzen els resultats més rellevants. Aquest bloc comença amb un capítol genèric (capítol 3) dedicat a la instrumentació i tractament de les dades. El capítol 4 exposa el primer article, dedicat a l'anàlisi de la sismicitat local i regional obtinguda a la regió de Navarra mitjançant la xarxa desplegada durant projecte GASPI. Els resultats obtinguts en

aquest estudi confirmen la importància de la sismicitat E-O de Pirineus, revelant la seva continuïtat cap a l'oest al llarg de la falla de Leiza, fins a la falla d'Hendaya. La falla de Leiza es manifesta com una estructura a nivell cortical amb una important activitat sísmica aprofundint-se cap al nord fins a 30 km de fondària. Així mateix, s'ha constatat un important nucli d'activitat al sector central de la falla de Pamplona. La referència de l'article és:

**Seismic activity at the Western Pyrenean edge.** M. Ruiz, J. Gallart, J. Díaz, C. Olivera, D. Pedreira, C. López, J.M. González-Cortina i J.A. Pulgar (2006). *Tectonophysics*, 412, 3-4, 217-235, doi:10.1016/j.tecto.2005.10.034.

El 21 de Febrer del 2002, ja en el període d'execució del projecte MARCONI, va ocórrer un terratrèmol de magnitud 4.1 Lg amb epicentre situat molt a prop de la ciutat d'Irurtzun, a 15 km al NO de la ciutat de Pamplona (Navarra). Donat el nostre treball previ en aquesta zona, es va decidir instal·lar una xarxa sísmica d'intervenció per al registre de les rèpliques d'aquest event. L'aplicació de tècniques de correlació creuada a les dades obtingudes durant el mes de funcionament de la xarxa, van permetre obtenir localitzacions hipocentrals d'alta precisió. Això ens ha permès (capítol 5) establir una relació directa de la sismicitat enregistrada amb un procés de relaxació dels encavalcaments E-O que delimiten pel sud l'estructura d'Aralar. Aquestes estructures van ser activades pel moviment dextrògir de la Falla d'Egarrieta, d'orientació NNO-SSE, on s'hi produí l'event principal. La referència de l'article on es recullen els resultats d'aquest estudi és:

**Seismotectonic constraints at the western edge of the Pyrenees: aftershock series monitoring of the 2002 February 21, 4.1 Lg earthquake.** M. Ruiz, J. Díaz, J. Gallart, J.A. Pulgar, J.M. González-Cortina i C. López (2006). *Geophysical Journal International*. V. 166 (1), 238-252. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02965.x.

El 18 de Setembre del 2004 es va produir un terratrèmol de magnitud 4.6 mbLg a 20 km al ESE de Pamplona, a prop de l'embassament d'Itoiz, el qual va començar el seu emplenament al Gener del 2004. Un cop més, es va desplegar una xarxa sísmica d'intervenció per a obtenir informació detallada de la zona i ampliar els coneixements previs. Els resultats es presenten al capítol 6. Les localitzacions hipocentrals obtingudes durant el 2004 i 2005 mostren una activitat sísmica molt superficial concentrada a les rodalies de l'embassament. La falta d'una activitat remarcable abans de l'inici de l'emplenament del pantà, la correlació de les fluctuacions del nivell d'aigua embassada i l'activitat sísmica enregistrada, afavoreixen l'explicació d'aquesta crisi com un cas de Resposta Ràpida disparada per l'inici d'emplenat del pantà. La referència de l'article on es recullen els resultats obtinguts en aquest estudi és:

**Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M=4.6 earthquake at the Western Pyrenees: a case of Reservoir-Triggered Seismicity?**. M. Ruiz, O. Gaspà, J. Gallart, J. Díaz, J.A. Pulgar, J. García-Sansegundo, C. López-Fernández i J.M. González-Cortina (2006). *Tectonophysics*, 424, 223-243, doi: 10.1016/j.tecto.2006.03.037.

A la segona part de la tesi (capítols 7, 8 i 9) s'aborda el processat i la interpretació de 6 perfils de refracció de gran angle obtinguts durant la campanya del projecte MARCONI a bord del BIO Hespérides, resultats que encara no han estat publicats. L'aplicació de tècniques de deconvolució i filtres de coherència a les dades obtingudes ha permès millorar considerablement la continuïtat lateral del senyal enregistrat, així com la correlació i identificació de les principals fases sísmiques. La modelització de les dades s'ha portat a terme resolent el problema directe mitjançant un algoritme clàssic de traçat de raigs. Els tres perfils N-S estudiats en aquesta tesi, mostren l'indentació de l'escorça del Golf de Biscaia entre l'escorça superior i mitja Ibèrica, produint l'enfonsament cap al nord de l'escorça mitja i inferior Ibèrica. Aquests resultats permeten estendre, a la zona de transició dels Pirineus cap a la serralada Cantàbrica, les estructures ja interpretades anteriorment en els perfils ECORS. Els altres perfils marins interpretats, d'orientació E-O, mostren un important aprimament cortical cap a la part central del Golf de Biscaia, amb estructures pròpies de les zones de transició continent-oceà.

Dins del marc dels projectes GASPI i MARCONI, també s'ha participat activament en la realització de tres articles ja publicats, que han permès familiaritzar-se en les metodologies relacionades amb l'obtenció i la interpretació de les dades d'anisotropia i funcions receptores, però que no han estat inclosos en aquesta tesi. Les seves referències són:

**Teleseismic imaging of alpine crustal underthrusting beneath N Iberia.** J. Díaz, J. Gallart, D. Pedreira, J.A. Pulgar, M. Ruiz, C. López i J.M. González-Cortina (2003). *Geophysical Research Letters*, 30, 11, 1554, doi:10.1029/2003GL017073.

**Anisotropic features of the Alpine Lithosphere in Northern Spain.** J. Díaz, J. Gallart, M. Ruiz, J.A. Pulgar, C. López i J.M. González-Cortina (2002). *Geophysical Research Letters*, 29, 24, 2225, doi: 10.1029/2002GL015997.

**Probing seismic anisotropy in North Iberia from shear wave splitting.** J. Díaz, J. Gallart, M. Ruiz, J.A. Pulgar, C. López-Fernández i J.M. González-Cortina (2006). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 158, 210-225, doi: 10.1016/j.pepi.2005.12.011.

## 1.2.- Dispositius experimentals i mètodes d'interpretació utilitzats

En aquest apartat es farà una breu descripció dels dispositius experimentals utilitzats durant els projectes GASPI i MARCONI, i que han permès d'obtenir les dades en les que es basa aquest treball. Una descripció més detallada dels experiments es podrà trobar al capítol o article corresponent.

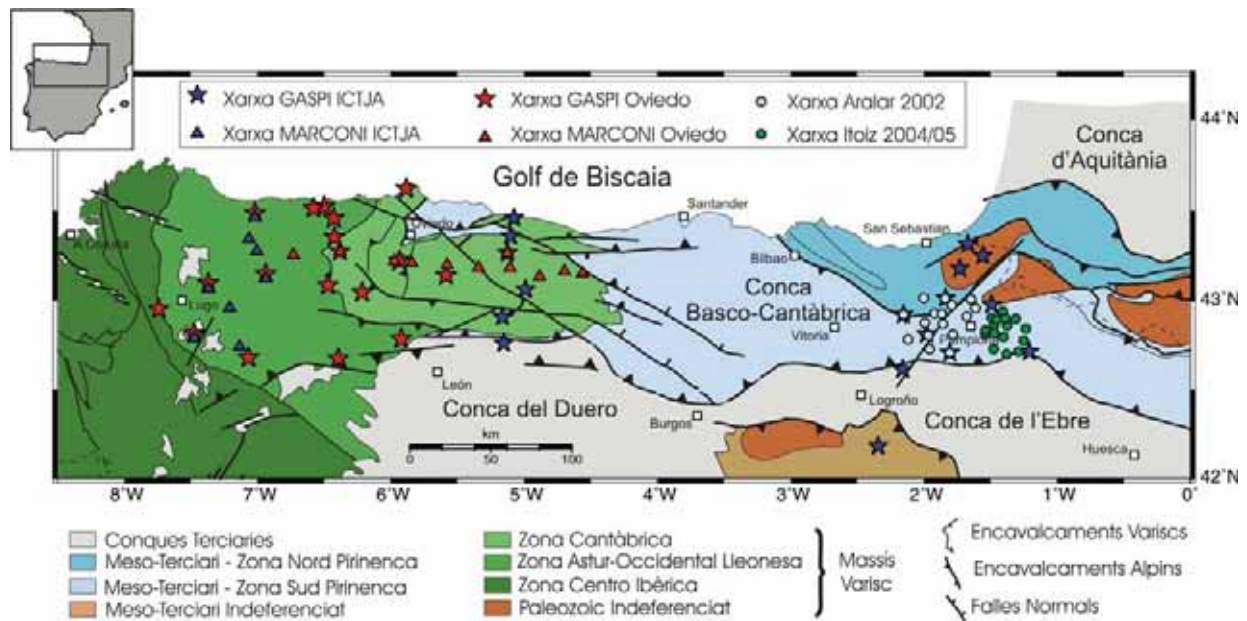
Així mateix, es farà una breu introducció a les tècniques emprades per l'anàlisi i interpretació de les dades resultants.

Encara que s'ha participat activament en la posta en marxa i funcionament de tots els dispositius experimentals i s'ha cooperat en els estudis d'anisotropia i de funcions receptores, en aquesta tesi només es desenvoluparà la part de sismicitat, localització hipocentral i caracterització sismotectònica, lligada a l'anàlisi i interpretació dels senyals sísmics locals i regionals enregistrats a les xarxes temporals al sector occidental dels Pirineus.

### 1.2.1.- Experiments de sísmica passiva

S'entén per sísmica passiva el fet d'enregistrar fonts sísmiques naturals, ja siguin events locals, regionals o telesísmics, a fi de caracteritzar una regió mitjançant diverses tècniques d'anàlisis.

Des de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera' i en col·laboració amb la Universitat d'Oviedo, s'han desplegat per tot el nord peninsular, des de mitjans de l'any 1999 fins a finals del 2005, una sèrie de xarxes sísmiques temporals amb l'objectiu d'enregistrar diferents tipus d'events sísmics (Figura 1.1). S'han dissenyat dispositius tant d'àmbit local per a fer el seguiment de les rèpliques de dos events de rellevància, com d'àmbit regional a fi de caracteritzar sismotectònicament una regió. Així mateix, s'han desplegat sensors de banda ampla, a fi d'analitzar, al llarg de diferents perfils, l'existència d'anisotropia al mantell a partir de la birrefringència (*splitting*) de fases telesísmiques SKS, o bé per estudiar l'estructura litosfèrica mitjançant l'ús de funcions receptores (*Receiver Functions*) obtingudes a partir de senyals telesísmics compresos en un rang de distàncies de 35° a 95°.



**Figura 1.1.-** Mapa geològic simplificat del nord de la península Ibèrica mostrant la distribució de les xarxes sísmiques desplegadas durant els projectes GASPI i MARCONI.

### Xarxes sísmiques d'àmbit regional

Durant el període d'execució del projecte GASPI es desplegaren tres xarxes sísmiques temporals localitzades a les regions de Navarra, Astúries i Galícia (Figura 1.1). La major part dels instruments funcionaren en mode registre continu, encara que també se'n desplegaren alguns que funcionaven en mode dispar (*Trigger*) amb algorismes de detecció STA/LTA (*short time average/long time average*).

La xarxa de Galícia, disposada entre l'est de la província de Lugo i l'oest Asturià, i el manteniment de la qual va estar a càrrec d'investigadors de la Universitat d'Oviedo, va ser equipada amb geòfons de curt període, estacions Lennartz MarsLite en registre continu i Lennartz Mars88 funcionant en mode detecció. Aquesta xarxa va estar en funcionament des del mes d'Abril de l'any 1999 fins al mes de Gener del 2002, i ha permès precisar els paràmetres hipocentrics i l'estat d'esforços de la zona amb major sismicitat recent (López et al. 2002; López-Fernández et al. 2004a; López-Fernández et al. 2004b; López-Fernández, 2007).

Des de l'institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera", es van gestionar preferentment dues xarxes, una a l'orient Asturià i l'altre a Navarra. La xarxa de Navarra va funcionar en dues etapes, la primera entre Març i finals d'Agost de l'any 1999, i la segona entre mitjans de Setembre del 2000 i finals de Juny del 2001. En el període intermedi es va muntar la xarxa d'Astúries. El principal objectiu d'aquests dispositius experimentals era



obtenir dues transectes litosfèriques N-S mitjançant funcions receptores (Díaz et al. 2003), i estudiar-hi l'existència d'anisotropia a partir del *splitting* de fases telesísmiques SKS (Díaz et al. 2002). Les xarxes es van equipar amb instruments Reftek i Leas Hathor en registre continu i sensors amb períodes propis de fins a 20 segons. La transecta de Navarra va ser complementada amb estacions fora de la línia equipades amb sensors de curt període que, junt amb les estacions de la xarxa permanent del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN) i de les xarxes franceses de Pirineus, *Reseau National de Suirveillance Sismique* (RENASS) i *Commissariat à l'Energie Atomique* (CEA), van servir per ampliar la cobertura del dispositiu i realitzar estudis sismotectònics mitjançant els sismes locals i regionals enregistrats (Veure capítol 4). La transecta N-S de l'orient asturià serví alhora per ampliar la cobertura de la xarxa de Galícia cap a l'est i complementar els catàlegs de sismicitat local emprats en els estudis sismotectònics d'aquesta regió (López-Fernández et al., 2004a; López-Fernández, 2007).

Dins el marc del projecte MARCONI es van desplegar simultàniament, des de mitjans de Juny del 2002 fins el Maig del 2003, dues xarxes sísmiques: un perfil N-S que s'estenia per la frontera de les regions de Galícia i Astúries, i un perfil E-O a cavall entre les regions d'Astúries, Lleó i Cantàbria (Figura 1.1). El Perfil N-S, el manteniment del qual es portava a terme des de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera', contava amb un total de 8 estacions Leas Hathor funcionant en mode registre continu i equipades amb geòfons de banda ampla. El perfil E-O va estar a càrrec la Universitat d'Oviedo, i estava format per 6 estacions Reftek i una Lennartz MarsLite equipades amb geòfons de 5 i 20 segons. Aquesta transecta va constar de 11 emplaçaments, funcionant sempre en mode registre continu, i que van haver de ser ocupats en dues fases. Durant la primera etapa es va ocupar la part més occidental del perfil, dins de la regió d'Astúries, connectant en el seu extrem de més a l'oest amb la part central del perfil N-S, i a la segona fase es van desplaçar part de les estacions cap a l'orient, ocupant els emplaçaments de Lleó i Cantàbria, però mantenint intacta la part central del perfil.

L'objectiu d'aquestes transectes era estudiar l'estructura profunda a partir de funcions receptores i avaluar l'existència d'anisotropia (Díaz et al., 2006).

### **Xarxes sísmiques d'àmbit local**

A finals del mes de Febrer del 2002 fins a finals de Març del mateix any es va desplegar al NO de Pamplona (Navarra) una xarxa temporal per fer el seguiment de les rèpliques del terratrèmol d'Irurtzun, ocorregut el 21 de Febrer del 2002 i que va assolir una magnitud de 4.1 Lg (Figura 1.1). Es van ocupar un total de 16 emplaçaments en un radi

inferior als 25 km entorn a la zona epicentral. Fins a un total de 13 estacions van funcionar al mateix temps, totes elles equipades amb sensors de curt període. Es disposaren sis estacions funcionant en mode registre continu, equipades amb instruments Reftek i Lennartz MarsLite, i la resta d'emplaçaments foren equipats amb instruments Lennartz Mars88, en mode detecció.

Els resultats d'aquesta xarxa posen de relleu la importància sismotectònica de l'estructura d'Aralar, situada a l'extrem més occidental dels Pirineus, i que fins ara, amb les escasses dades provinents de les xarxes permanents presents en aquesta regió, no havia estat possible avaluar (veure capítol 5).

Arran del terratrèmol de magnitud 4.6 mbLg que va tenir lloc el 18 de Setembre del 2004 a les proximitats de l'embassament d'Itoiz, a l'est de la ciutat de Pamplona, es varen desplegar dues xarxes temporals per fer el seguiment i estudiar l'evolució de les rèpliques associades a aquest sisme (Figura 1.1).

La primera xarxa va entrar en funcionament dos dies després de l'event principal i va estar enregistrant durant tot un mes. Estava formada per 13 instruments Leas Hathor funcionant en mode registre continu i equipats amb sensors de curt període.

La segona xarxa es va muntar l'Abril del 2005 i va romandre activa fins a finals d'any. L'objectiu d'aquesta segona xarxa era estudiar l'evolució de la sismicitat en relació a les proves de càrrega i buidat del pantà que estaven programades per aquell any seguint els protocols d'enginyeria necessaris per garantir la seguretat i l'estabilitat de l'estructura. La xarxa estava formada per 7 instruments Leas Hathor en registre continu i geòfons de curt període. Es van reocupar part dels emplaçaments de l'experiment anterior, encara que se'n varen buscar de nous per garantir la cobertura de la xarxa.

Els resultats obtinguts durant aquests dos períodes de registre afavoreixen l'explicació de la crisi sísmica estudiada com un cas de resposta ràpida, un dels tres possibles casos de sismicitat detonada per embassaments (*Reservoir Triggered Seismicity* o *RTS*), disparada per l'inici d'emplenat del pantà, durant el mes de Gener del 2004 (Veure capítol 6).

### **Mètodes d'interpretació**

Els terratrèmols enregistrats a les xarxes temporals del sector occidental de Pirineus han estat localitzats amb precisió emprant, quan ha estat possible, informació de les xarxes permanents presents a la regió. S'ha realitzat sempre una primera inversió hipocentral amb

algoritmes clàssics com ara el programa Hypo71 (Lee i Lahr, 1975), i després les determinacions han estat refinades aplicant algoritmes d'inversió hipocentral per dobles diferències (Waldhauser i Ellsworth, 2000), emprant el paquet HypoDD (Waldhauser, 2001).

L'algoritme d'inversió per dobles diferències permet emprar qualsevol combinació de temps de propagació absoluts, provinents de lectures simples de primeres arribades d'ones P i S, i temps de propagació diferencials, obtinguts d'aplicar tècniques de correlació creuada (*Cross-Correlation*) als senyals de grups d'events amb característiques i propietats similars (Waldhauser, 2001; Massa et al., 2006).

A l'experiment regional, portat a terme amb les dades de la xarxa sísmica del projecte GASPI a Navarra, es va aplicar el mètode de dobles diferències emprant temps absoluts. En canvi, en els dos estudis de les rèpliques, va ser possible aplicar mètodes de correlació creuada per a identificar famílies d'events amb similituds a la seva forma d'ona (Maurer i Deichmann, 1995) i obtenir temps de propagació relatius (Deichmann i García-Fernández, 1992; Saccorotti et al., 2002). Aquests temps relatius han estat introduïts posteriorment, junt amb els temps absoluts dels events que no pertanyen a cap grup, a l'algoritme de dobles diferències, a fi d'obtenir determinacions hipocentrals de major precisió.

Per altre banda s'ha emprat el programa FPFIT (Reasenberg i Oppenheimer, 1985) per a calcular els mecanismes focals dels sismes amb millor cobertura azimutal i per als que es disposés d'un major nombre de lectures de polaritat.

En el cas de les dues crisis sísmiques estudiades, s'ha abordat el càlcul de paràmetres estadístics. S'ha estudiat l'evolució temporal de la sismicitat, ja sigui aplicant models de decaïment exponencial com el descrit per la llei d'Omori (Utsu, 1961; Utsu et al., 1995) o models més complexos de tipus epidèmic, o ETAS (*Epidemic Type of Aftershock Sequences*), on cada event de la crisi genera la seva pròpia prole de sismes (Guo i Ogata, 1997; Ogata, 1999). S'ha estudiat també la distribució del nombre de sismes en funció de la magnitud, calculant el valor  $b$  de la llei de Gutenberg-Richter (Guo i Ogata, 1997; Utsu, 1999). Abans però, a fi de poder precisar les magnituds locals dels terratrèmols enregistrats, s'ha hagut d'ajustar, per a cada experiment, una fórmula de la magnitud. Degut a que s'ha treballat amb instruments portàtils, on és difícil disposar de calibracions precises dels geòfons i efectuar lectures d'amplituds isomètriques per a totes les estacions, s'ha optat per ajustar una magnitud local depenent de la duració temporal del terratrèmol i de la distància epicentral (Lee et al., 1972).

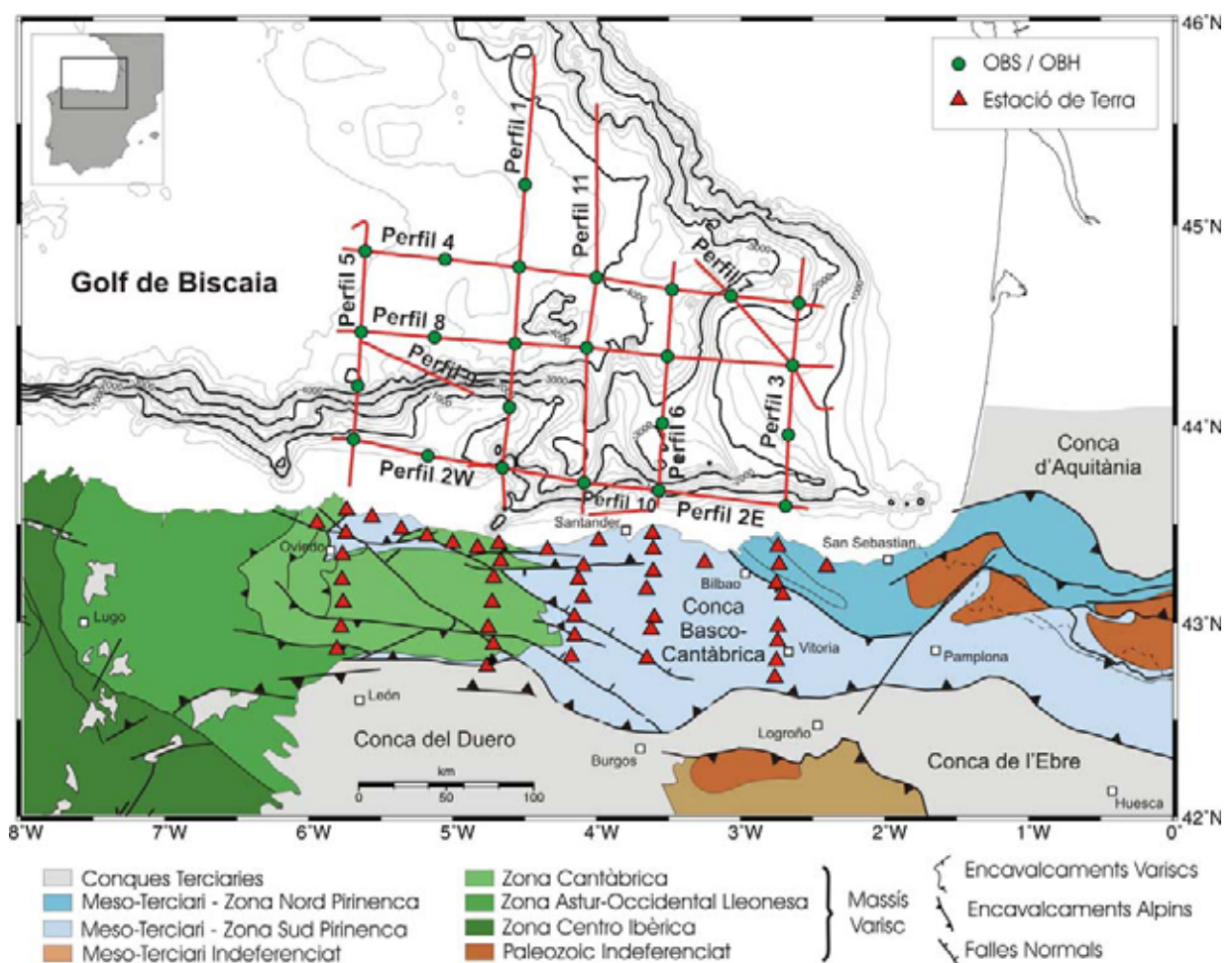
### 1.2.2.- Experiments de sísmica activa

Tal com s'ha esmentat anteriorment, el projecte MARCONI va fer possible l'adquisició d'una gran quantitat de noves dades geofísiques, entre elles perfils de sísmica de reflexió vertical i de gran angle, al llarg de la part central i oriental del marge continental Cantàbric.

La campanya d'adquisició marina es va realitzar a bord del vaixell d'investigacions oceanogràfiques Hespérides entre els dies 30 d'Agost i 20 de Setembre del 2003.

#### Descripció dels perfils de refracció MARCONI

Durant la campanya del projecte MARCONI es van adquirir 11 perfils de reflexió vertical i de reflexió/refracció de gran angle, junt amb dades de gravimetria, magnetisme i batimetria multifeix al llarg de totes les transectes (Figura 1.2).



**Figura 1. 2.-** Mapa geològic simplificat del nord de la península Ibèrica mostrant la geometria de l'experiment de sísmica de reflexió/refracció de gran angle del projecte MARCONI.

El registre dels perfils de gran angle es va realitzar amb 24 sismògrafs de profunditat (*Ocean-Bottom Seismometer*), 20 d'ells de la Unitat d'Investigació Geodinàmica de l'institut de Ciències Marines (IFM-GEOMAR- Universitat de Kiel, Alemanya) i els 4 restants de la Unitat de Tecnologia Marina del Consell Superior d'Investigacions Científiques (UTM-CSIC). Un total de 35 estacions sísmiques es van desplegar simultàniament a terra, distribuïdes al llarg de 46 emplaçaments, per registrar les reflexions i refraccions de gran angle. Es van emprar 16 estacions Leas Hathor cedides per l'Institut de Physique du Globe de París (IPGP), 7 estacions Reftek i 8 Leas Hathor de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera' i 4 estacions Lennartz MarsLite de la Universitat d'Oviedo. Les estacions sísmiques terrestres es van equipar principalment amb sensors de curt període, encara que s'utilitzaren també alguns sensors de banda ampla, de 20 segons. Dels 24 sismògrafs marins, 16 estaven equipats amb geòfons de 3 components i un hidròfon (*OBS - Ocean-Bottom Seismometers*) i els 8 restants tenien només un hidròfon com a sensor (*OBH - Ocean-Bottom Hydrophone*).

Un cop finalitzat el desplegament dels OBS/H i les estacions de terra, es va procedir a registrar els perfils de reflexió vertical, els dispers dels quals van ser també enregistrats per les estacions de terra i de fons marí, i van permetre determinar el model de distribució vertical de velocitats i les seves variacions laterals a escala cortical.

### **Mètodes d'interpretació**

El primer pas en el processat i l'anàlisi de les dades de gran angle obtingudes en aquest experiment, després de generar les seccions sísmiques, va consistir en deconvolucionar i filtrar les dades a fi de potenciar les fases sísmiques enregistrades. S'aplicaren filtres passa-banda dependents de la distància, per reforçar el rang de freqüències on es troba el senyal, i filtres F-K per eliminar l'ona d'aigua i els seus múltiples. Finalment es van aplicar filtres de coherència lateralment dependents de la freqüència (Schimmel i Gallart, 2007), tècnica que no és habitual en el processat de les dades de gran angle i que ha permès potenciar les senyals coherents de les seccions sísmiques.

Tot seguit es va procedir a la identificació i correlació de les principals fases sísmiques presents als registres, corresponents a ones refractades i reflexades en els diferents nivells estructurals de l'escorça.

L'obtenció dels models de velocitat s'ha realitzat seguint l'esquema de modelització directa, tant del traçat de raigs com d'amplituds, mitjançant el paquet Rayinver (Zelt i Elis, 1988; Zelt i Smith, 1992). S'ha optat per aquest mètode d'assaig i error ja que després

de fer alguns tests emprant programes d'inversió dels temps d'arribada (Korenaga et al., 2000), es va arribar a la conclusió de que l'espaiat entre estacions era massa gran per a que el programa d'inversió convergís a solucions unívocues. Per altra banda, el fet de poder modelitzar les amplituds relatives entre diferents fases al llarg del perfil, i comparar-les amb les enregistrades a les seccions sísmiques, aporta una valuosa informació sobre els gradients i els contrastos de velocitats dels model, i alhora representa una segona condició de contorn, després dels ajusts temporals, que ajuda a decidir sobre la validesa del model obtingut.

La sísmica multicanal, processada i interpretada per altres estudiants de doctorat i post doctorat de la universitat d'Oviedo i Barcelona, s'ha emprat durant la modelització dels perfils sísmics de gran angle per a acotar la geometria de les conques sedimentàries i els sectors més superficials de l'escorça.